NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Ny Jærbane i tunnel

Tidligstudium

Karoline Rød Klausen

Master i Bygg- og miljøteknikk
Innlevert: juni 2018
Hovedveileder: Pål Drevland Jakobsen, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Terminologi

Borhode	Sirkulært roterende hode på TBM påmontert kuttere
Bolt	Stålstang av forskjellig kvalitet som benyttes til å sikre og stabilisere fjell (Jernbaneverket, 2015)
Cut and cover	Tunnelen bygges som en betongkonstruksjon som graves ned i løse masser og dekkes over med massene når konstruksjon er ferdig (railsystem.net, 2015).
Drive	Å drive en tunnel vil si hvordan tunnelen bygges gjennom berget. Det er ulike drivemetoder for å få bergmassen ut fra fjellet slik at underjordsåpning etableres.
Forbolting	Sikringsmetode slik at ikke bergmasser faller ut når det arbeides foran stuff.
Injeksjon	Ved injisering i tunnel sprøytes sement inn i bergsprekkene i tunnelveggene og hengen hvor det renner vann, og tetter igjen sprekkene i berget (Nilsen, 2016).
Heng	Taket i tunnelen (Jernbaneverket, 2015)
Inndrift	Lengde utbrutt bergrom i fjellet, ofte målt pr. uke
Kontur	Teoretisk omkrets av en tunnel (Jernbaneverket, 2015)
Konvensjonell driving	Tunnelen drives med boring og sprenging av berget
Mineral	Naturlige forekommende grunnstoff eller kjemiske forbindelser i jordskorpa (Nilsen, 2016)
Rensk	Fjerning av løs stein fra vegger og heng etter salve (Jernbaneverket, 2015)
Salve	Sprengning av et visst volum fjell i tunnel, vanligvis ca. 5 meter (Jernbaneverket, 2015)
Sikring	Arbeid for å stabilisere fjell, dvs. å hindre nedfall av stein og blokk, der dette er nødvendig (Jernbaneverket, 2015)

Sprøytebetong	Betong som sprøytes på vegger og heng for å stabilisere fjellet (Jernbaneverket, 2015)
Sprøytebetongbuer	Buer av sprøytebetong, normalt med armering dimensjonert etter bergmassekvaliteten i. Plasseres som ekstra sikring under områder med dårlige bergmasseforhold i tunnel.
Stuff	Endeveggen i tunnelen – så langt som tunnelen er kommet (Jernbaneverket, 2015)
Såle, ligg	Gulvet i tunnelen (Jernbaneverket, 2015)
Sonderboring	Undersøkelsesboring benyttet til å kartlegge bergmassekvaliteten foran stuff. Det er spesielt viktig mot svakhetssoner for å kunne bestemmes sonens omfang og eventuelle tiltak. Dette bestemmes ved å måle hvor mye vann som kommer ut av sonderingshullene (Jernbanekompetanse, 17).
Tunnelhvelv	Bueformet overdekning over sålen i en tunnel.
Tverrslag	Atkomsttunnel som fører ned til hovedtunnelen (Jernbaneverket, 2015)

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2018 ved Institutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU. Oppgaven representerer avslutningen på sivilingeniørstudiet ved studieprogrammet Bygg- og Miljøteknikk, med hovedprofil Anleggsteknikk.

Hovedveileder for oppgaven har vært Pål Drevland Jakobsen. Tusen takk for all støtte og god veiledning gjennom hele semesteret.

Jeg vil takke Karl Gunnar Holter for hyggelige møte og gode innspill til oppgaven. Takk til Amund Bruland som også har hjulpet meg med deler av oppgaven.

Til slutt vil jeg takke venner for fin studietid i Trondheim.

Trondheim 07. juni 2018

Karoline Klausen

Sammendrag

Grunnet befolkningsvekst og økt transportbehov har Bane NOR startet planlegging av dobbelt jernbanespor mellom blant annet Øksnevad, Klepp og Bryne stasjon i Rogaland. I denne rapporten undersøkes muligheten for å bygge det nye dobbeltsporet i en 6810 m lang kontinuerlig tunnel mellom stasjonene. Formålet er å spare et viktig jordbruksområde i Rogaland. Ut i fra fremskaffet informasjon om de geologiske forholdene i området, er det studert ulike tunnelløsninger og drivemetoder, samt kostnad og inndrift for disse.

Et viktig forhold i oppgaven er geologien i området, samt de drivetekniske parameterne, som påvirker prosjekteringen av tunnelen. Det er også avgjørende for inndrift og kostnader, som er grovt estimert i oppgaven og vises i tabellen nedenfor:

Løsning	**Kostnad [NOK]**	**Inndrift [m/uke]**
Ett løp 123 m^2 dobbeltsporet tunnel – konvensjonell drift	953 000 000	55
To løp 83 m^2 enkeltsporet tunnel – konvensjonell drift	1 021 000 000	71
To løp 81 m^2 enkeltsporet tunnel – fullprofilboring	1 303 000 000	70

Kostnadsresultatene for tunnelene fra tabellen inkluderer driving, forinjeksjon, bolting, sprøytebetong og vann- og frostsikringsløsning. Avhengig av tunnelkonsept og drivemetode varierer estimatet for tunnelløsningene fra 953 000 000 til 1 303 000 000 kr, og byggetiden fra 55-71 m/uken.

Foreløpig finnes flere av løsningene mulige. Geologisk informasjon er for begrenset og estimert kostnad og byggetid er for usikkert på nåværende tidspunkt til å konkludere entydig. For å være mer sikker på valg av tunnelkonsept og drivemetode bør det gjøres flere undersøkelser av:

- Fjelloverdekning og bergmassekvalitet
- Endelig grunnvannstand
- Bergartenes borsynk- og slitasjeegenskaper samt oppsprekkingsgraden, evaluert ved hjelp av prøver fra området
- Kartlegging av svakhetssoner
- Overdekning og spenningsforhold ved stasjonsområdene

Når de overnevnte grunnundersøkelsene er utført kan det gjøres mer detaljerte studier av følgende:

- Utrede en plan for nord for Øksnevadporten og sør for Bryne stasjon
- Sensitivitetsanalyse i forhold til kostnad
- Mer nøyaktig vurdering av nødvendig sikring
- Oppetid og vedlikeholdskostnader for to løp i forhold til ett
- Forhold knyttet til risiko, sårbarhet og samfunnssikkerhet
- Se på andre løsninger, som flytting av stasjonsområder og endre ruten til jernbanestrekningen av geologiske eller samfunnsmessige årsaker

Summary

Due to population growth, The Norwegian National Rail Administration have started planning a double railway track between the stations Øksnevad, Klepp and Bryne in Rogaland. This master thesis examines the possibility for building the 6810-meter-long railway track between the stations, in a tunnel. The purpose is to save an important agricultural area in Rogaland. Different methods for design and excavation of the tunnel is investigated in the thesis, based on obtained information of the geological conditions. Also, the excavation costs and time is calculated.

An important condition for the construction of the tunnel is the geology in the area, as well as the corresponding engineering geological parameters. Knowledge about the geology is essential for the excavation time and costs, presented in the table down below.

.

Design	**Excavation Costs [NOK]**	**Excavation time [m/week]**
One-run 123 m^2 double track – Drill and Blast	953 000 000	55
Two-run 83 m^2 single track – Drill and Blast	1 021 000 000	71
Two-run 81 m^2 singel track – Tunnel Boring Method	1 303 000 000	70

The cost of the tunnels includes excavation, grouting, bolting, shotcrete and water and frost protection. Depending on the tunnel design, the estimate varies from 953 000 000 NOK to 1 303 000 000 NOK, and excavation time from 55 to 71 m/ week.

Currently, several of the tunnel designs are possible. Because of the limited geological information and uncertainty of the estimated excavation costs and time, it's too early to conclude with one clear solution. To be sure of the tunnel design and excavation method, further investigations of the following should be carried out:

- Rock mass over cover and excavated rock mass quality
- Final groundwater level
- Samples from the project area that evaluate the drilling rate, bitwear and degree of fracturing
- Map out weakness zones
- Overburden and stress ratio around the stations

Further on, more detailed studies should be done:

- Research work for north of Øksnevadporten and south of Bryne station
- Sensitivity analysis regarding the excavation costs
- A more precise estimate regarding the support of the tunnel
- Opening time and maintenance cost in a two-run tunnel compared with one-run tunnel
- Health-environment, society and risk relationships
- Evaluate other solutions, as moving railway stations, and whether the planned route should be changed due to geological or social considerations

Innhold

Forord 3

Sammendrag 5

Summary 7

1. Introduksjon 12

1.1 Bakgrunn for valg av oppgave 12

1.2 Prosjektbeskrivelse 14

1.3 Begrensninger 14

2. Teori 16

2.1 Geologiske forhold som har innvirkning på prosjekter i berg 16

2.2 Ingeniørgeologiske undersøkelser for anlegg i berg 17

2.3 Konvensjonell drift 20

2.4 Fullprofilboring med tunnelboremaskin 21

2.5 Drivetekniske parametere 23

2.6 Bergsikring 30

2.7 Vann- og frostsikring 31

3. Metode 32

3.1 Innhenting av informasjon 32

3.2 Befaring 32

3.3 Samtaler 33

3.4 Dataprogram 34

3.5 Vurdering i oppgaven 34

4. Geologisk informasjon 35

4.1 Grunnlagsmateriale 35

4.2 Bergmasser 37

4.3 Løsmasser 40

5. Ingeniørgeologiske vurdering 42
5.1 Bergarter 42
5.2 Løsmasser 44
5.3 Oppsprekking 46
5.4 Svakhetssoner 47
5.5 Bergspenning 48
5.6 Grunnvann og lekkasjer 49
5.7 Sikring og injeksjon 50
5.8 Skredfare 51
6. Prisliste for sikring 52
6.1 Bolter og forinjeksjon 52
6.2 Kostnad for vann- og frostsikring 53
7. Tunnelkonsept 54
7.1 Ett løp – Dobbeltsporet tunnel 56
7.2 To løp – enkeltsporet tunnel 57
8. Kostnad og inndrift for drivemetode og tunnelkonsept 58
8.1 Ett løp dobbeltsporet tunnel – konvensjonell drift 59
8.2 To løps enkeltspor – konvensjonell drift 61
8.3 To løps enkeltspor – fullprofilboring 63
8.4 Resultat 65
9. Diskusjon 66
9.1 Drivemetode og designløsning ut ifra geologiske forhold 66
9.2 Drivekostnad og inndrift 69
9.3 Tunnelkonsept 70
9.4 Hensyn til omgivelsene 71
10. Videre arbeid 73
10.1 Drivemetode og designløsning ut i fra geologiske forhold 73

10.2 Drivekostnad og inndrift 74

10.3 Tunnelkonsept 75

10.4 Hensyn til omgivelsene 75

11. Konklusjon 76

Referanser 78

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn for valg av oppgave

Jærbanen er jernbanestrekningen mellom Stavanger og Egersund i Rogaland. Strekningen går over det flate kystlandskapet Jæren, hvor blant annet Klepp kommune befinner seg. Klepp ligger på vestkysten på den midtre delen av Jæren. Øst i kommunen passerer Jærbanen stasjonene Øksnevadporten og Klepp. Videre går den sørover mot Bryne stasjon, som ligger i Hå kommune, se Figur 1.1. Dagens enkeltspor har betydelig lokaltrafikk på strekningen til Stavanger og Sandnes i nord og Egersund i sør (SNL, 2017).

Figur 1.1: Skjermbilde fra norgeskart.no: Togene på Jærbanen kjører forbi Øksnevadporten (blå ring lengst nord på bildet), Klepp og Bryne stasjon.

Klepp er blant landets betydeligste jordbrukskommuner, og 65 % av arealet i kommunen er dyrket jord. Jordbruk er Rogalands viktigste næring etter oljeindustrien (Norsk Bonde- og Småbrukarlag, 2016). Den beste jorden på Klepp finnes i de sentrale strøk mellom Orrevatnet og Frøylandsvatnet (se Figur 1.1), et bakket og leirholdig morenelandskap med stedvis fast berg i dagen. Flere våtmarksområder i området er vernet (SNL, 2017).

I januar 2014 ba Samferdselsdepartementet Bane NOR om å starte planlegging av dobbeltspor mellom strekningen Sandnes og Nærbø på Jærbanen, se Figur 1.2. Bane Nors perspektivanalyse mot 2050 viser at jernbanen bør få en større rolle i persontransporten grunnet betydelig vekst i befolkningen og arbeidsplasser på Nord-Jæren (Bane NOR A, 2016). Bane NOR har gitt ut en

silingsrapport i første fase som omhandler planlegging av dobbeltspor på strekningen Sandnes – Nærbø for fremtiden.

Figur 1.2: Jærbanen i dag (Bane NOR B, 2014).

For utbygging av dobbeltspor mellom stasjonene Øksnevad, Klepp og Bryne, presenterer Bane NOR fem ulike traséalternativ i dagen, og drøfter konfliktene med disse. De ulike alternativene kan føre til endringer, som flytting av Klepp stasjon, fjerning av Øksnevadporten, inngrep i eksisterende boligområder og tap av jordbruksareal (Bane NOR A, 2016).

Deler av Klepp kommunestyre ønsker at jernbanen skal bygges i tunnel for å verne om jordbruksareal, unngå konflikter med kryssende trafikk og for å slippe å flytte på nåværende stasjoner. De mener det vil være gunstig for overlevelsen av tettstedet og at det er en fordel at mesteparten av byggingen gjøres skjult.

1.2 Prosjektbeskrivelse

I oppgaven undersøkes muligheten for å bygge det nye dobbeltsporet i en 6810 m lang kontinuerlig tunnel mellom stasjonene Øksnevad, Klepp og Bryne (Figur 1.3). Ulike tunnelløsninger og drivemetoder er undersøkt. En del av undersøkelsen har vært å fremskaffe nødvendig informasjon om grunnforholdene i det aktuelle området, for å kunne vurdere ingeniørgeologien og drivetekniske parametere.

Figur 1.3: Skjermdump fra norgeskart.no: Blå linje er antatt tunneltraseen i mulighetsstudiet. De røde ringene er nåværende stasjoner. Lengst nord er Øksnevadporten. Lengden på traseen fra Øksnevadporten til Bryne stasjon er 6810 m.

Oppgaven inneholder et kapittel hvor teori om geologiske forhold, ingeniørgeologiske forundersøkelser, drivemetoder, drivetekniske parameter samt sikring blir beskrevet. Deretter beskriver metodekapittelet hva slags design og metoder som er brukt for å besvare forskningsspørsmål og hvilke vurderinger som er foretatt i henhold til gyldighet og pålitelighet. Neste kapittel presenterer all aktuell geologisk informasjon som er anskaffet om området og langs studiets tunneltrasé. Ut ifra geologisk informasjon presenterer neste kapittel ingeniørgeologiske vurderinger og drivetekniske parameter, som er betydningsfullt for de neste kapitlene som omhandler tunnelkonsept, drivemetoder, inndrift og kostnader. Drivemetoder vil si konvensjonell driving og fullprofilboring. Til slutt blir resultatene diskutert, og det blir foreslått momenter til et eventuelt videre arbeid, og avslutningsvis kommer en konklusjon.

Formålet med undersøkelsen er å se på tunnelløsning som kan spare et viktig jordbruksområde i Rogaland.

1.3 Begrensninger

For å sikre god fremdrift og fornuftig ressursbruk, starter drivingen fra en adkomsttunnel, kalt tverrslag. Lokalisering og kostnader av tverrslag er ikke vurdert i dette mulighetsstudiet.

Det er tenkt at tunnelen skal gå under jord nord for Øksnevadporten, og komme opp igjen sør for Bryne stasjon. Planlegging, kostnader, byggetid og stigning/fall til traseen nord for Øksnevadporten og sør for Bryne stasjon, er ikke tatt med i oppgaven. Tunneltraseen i studiet er begrenset til å begynne ved Øksnevadporten og slutter ved Bryne stasjon.

Det er antatt at det vil lønne seg å bygge jernbanestrekningen i en kontinuerlig tunnel, uten at traseen går opp til overflaten ved stasjonene, og ned i jorden etter. Dette er grunnet korte avstander mellom stasjonene og trolig store løsmassemektigheter. Derfor er det tenkt at stasjonene skal bygges i fjellhaller eller i betongkonstruksjoner som graves ned. Det er avhengig av berg- og løsmasseforholdene. Ingeniørgeologiske prinsipper for og utformingen av fjellhaller er ikke beregnet.

I oppgaven vil tunneltraseen gå i rettest mulig linje mellom stasjonene. Denne løsningen gir kortest mulig tunnel og er dermed den billigste løsningen før geologiske parametere sier noe annet. Det er også gunstig for togenes hastighet. Siktutvidelse er ikke vurdert i oppgaven, da traseens kurvatur er lav.

Geologiske og ingeniørgeologiske grunnlagsmateriale er blant annet basert på kart og tidligere ingeniørgeologiske rapporter. Rapportene har vært utført i et begrenset omfang og gir begrenset informasjon om geologi i området og nært tunneltrasé. Grunnundersøkelsen i oppgaven er mangelfull sammenlignet med en full geologisk undersøkelse langs tunneltraseen. Slike undersøkelser blir normalt gjennomført ved reguleringsplan og detaljprosjektering av tunnel.

Forhold knyttet til risiko, sårbarhet og samfunnssikkerhet skal vektlegges ved utarbeiding av plan etter Plan og bygningsloven. Dette er ikke vurdert i oppgaven. Bygging av en fjelltunnel vil skape et masseoverskudd. Håndtering og plassering av disse massene er ikke vurdert i oppgaven, men vil være et viktig tema ved en eventuell videre plan.

Kostnadsresultatene i oppgaven inkluderer driving, forinjeksjon, bolting, sprøytebetong og vann- og frostsikringsløsning. Kostnader for rigg og drift, uforutsette kostnader og administrative kostnader er ikke inkludert i oppgaven.

2. Teori

I dette kapittelet vil det bli gått igjennom grunnleggende teori om tema som er relevant for oppgaven. Først beskrives geologiske forhold og ingeniørgeologiske undersøkelser. Deretter forklares arbeidsoperasjoner som er typiske ved konvensjonell driving og ved fullprofilboring. Videre beskrives teori om drivetekniske parameterne. Til slutt blir teori om bergsikring og vann- og frostsikring gitt.

2.1 Geologiske forhold som har innvirkning på prosjekter i berg

Geologisk sett er fastlands-Norge en typisk «hard-rock» -provins som sammen med Sverige, Finland og Kolahalvøya utgjør det Baltiske grunnfjellsskjold. I løpet av de siste 1-2 millioner år har berggrunnen i Norge som resultat av flere istider blitt utsatt for betydelig erosjon. Dette preger i stor grad dagens bergoverflate, etter som sterkt oppsprukket berg, svakhetssoner/forkastninger og svake bergarter har blitt betydelig sterkere erodert enn lite oppsprukket berg og sterke bergarter (Ramberg, 2013).

Alle bergarter er sammensatt av mineraler. Mineralene kan identifiseres på grunnlag av fysikalske egenskaper som farge, strek, densitet, glans, ripehardhet, spalteriss, magnetiske og andre egenskaper. Bergartens sammensetning av mineraler gir bergarten fysikalske og mekaniske egenskaper. Egenskapene kan også variere fra bergart til bergart, avhengig av mineral-kornenes størrelse, form og orientering, samt sammenbinding mellom kornene. Sammensetningene og egenskapene til mineralene har innvirkning på hvordan det er å bygge bergrom og tunnel i bergmasse (Nilsen, 2016).

Sammenlignet med tradisjonelle byggematerialer som stål, betong etc. er egenskapene til bergmasser vesentlig mer komplisert å måle. Enkelte egenskaper lar seg ikke måle, og det må derfor ofte benyttes observasjoner og erfaringsdata i vurderinger og beregninger. Samtidig er dimensjonene ved undergrunnsanlegg så store at det økonomisk og teknisk er vanskelig å foreta tester i full skala. Derfor må beregninger og vurderinger gjøres på grunnlag av forenklede undersøkelser/tester og observasjoner (Palmstrøm & Norconsult, 2003).

2.2 Ingeniørgeologiske undersøkelser for anlegg i berg

Den ingeniørgeologiske prosjekteringen skal gi en oversikt over de geologiske, og geotekniske forhold i det aktuelle område. Informasjonen brukes til å evaluere anleggstekniske forhold, samt å identifisere mulige problemer, som kan unngås eller løses før utbyggingen eller under bygging av prosjektet. Ingeniørgeologiske og bergmekaniske forhold sier noe om bergmassekvaliteten og hydrogeologiske forhold, som påvirker bygging, stabilitet og drift av prosjekter på og i berg.

Hensikten med å utføre forundersøkelser for undergrunnsprosjekter er å fremskaffe tilstrekkelig grunnlag, informasjon og data for å kunne planlegge og vurdere konsekvensene ved gjennomføring av et berganlegg. I disse ligger blant annet:

- Bestemmelse av optimal trasé og eller beliggenhet ut fra gitte forutsetninger
- Innvirkning på miljø, samfunn og sikkerhet i nærhet, spesielt vannlekkasjeforhold
- Bestemmelse av opplegg og metoder for bygging
- Beregning av kostnader og byggetid for det aktuelle prosjektet for det stadiet det befinner seg på

(Palmstrøm & Norconsult, 2003)

Tabell 1 er en tabell over hvilke geologiske forhold som bør kartlegges, og hvorfor de bør kartlegges.

Tabell 1: Geologiske forhold som bør kartlegges (Nilsen, 2016) (Palmstrøm & Norconsult, 2003).

Hva må undersøkes	**Hvorfor**
Løsmasser	De må kartlegges primært for at en skal kunne ha kontroll over bergoverdekningen, og eventuelt bygging av tunnel gjennom løsmassesoner.
Styrke og hardhet til bergmassen	Stabilitetsanalyse og bearbeiding i form av boring og sprenging. Det er også viktig å vite med tanke på hva utsprengte masser skal brukes til etterpå.
Oppsprekkingsgrad til bergmassen	Det har stor betydning for hvordan bergmassen som materiale vil reagere på påkjenninger som sprenging. Den vil også påvirke stabiliteten og sikkerheten mot blokkfall. Det er også viktig å vite hvor enkelt bergmassen kan bores med TBM.
Svakhetssoner i berggrunnen	De kan ha stor innvirkning på drive- og stabilitetsforholdene.
Vannforhold i berggrunnen	Det kan ha stor innvirkning på tunneldrivingen og konsekvenser for omgivelsene.
Spenningsforhold	Ved uheldig plassering og geometrisk form i forhold til spenningsforholdet kan spenningen bli så store at bergmassen ikke kan stå imot dem.
Materialtekniske egenskaper	De må undersøkes for få en oversikt over stabilitet og planlegging av sikring.

Nivåer av forundersøkelser

Det er normalt tre nivå i forbindelse med grunnundersøkelser for tunneler og undergrunnsanlegg i Norge. Detaljeringsgraden av undersøkelsene tilpasses til hvilket plannivå prosjektet er i. Se Tabell 2 for detaljer.

Tabell 2: Nivå av forundersøkelser (Nilsen, 2016, s. 117).

Før bygging			**Under bygging**	**Etter bygging**
Konseptstudier	Gjennom-førbarhetsstudier	Detalj-undersøkelser		
Etablering av grunnleggende kunnskap om forholdene	-Studier av kart, flybilder, rapporter -Feltkartlegging av nøkkelpunkter -Befaring av nærliggende anlegg	-Ing.geologisk kartlegging -Geofysikk -Boring -Prøvetaking -Lab.testing	-Tunnel-kartlegging -Sonderboring -Målinger (bergspenninger) -Prøvetaking -Lab.testing	Måling (ekstensometer) -Sluttkartlegging, dokumentasjon -Kvalitetskontroll
→Identifisering av hoved-utfordringer	→Preliminær design	→«Endelig design»	→Modifisering av design	→Vedlikehold

Kvaliteten til bergmassene påvirker kostnadene knyttet til driving som utgjør en vesentlig del av de totale byggekostnadene for anlegg i berg. Dette gjør at kostnadene for driving og sikring varierer sterk fra bergart til bergart, og kan også variere betydelig innenfor en og samme bergartstype (Nilsen, 2016).

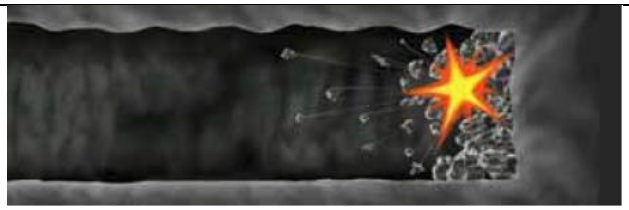
Refraksjonsseismikk

Refraksjonsseismikk er en akustisk undersøkelsesmetode som gir informasjon om geologisk materiale med fundamentalt ulike egenskaper. Blant annet benyttes det for å bestemme dybden og kvaliteten til fjell, samt gi informasjon om løsmasser. Metoden har derfor et bredt anvendelsesområde og kan benyttes ved mineral-, grunnvanns-, miljø- og ingeniørgeologiske undersøkelser. I Norge benyttes metoden mye ved forundersøkelser for tunneler både på land og undersjøiske tunneler. Metoden er basert på at lydens forplantningshastighet forandrer seg med mediets elastiske egenskaper. Refraksjonsseismikk måler hastigheten i berggrunnen og forteller om bergmassens karakter og kvalitet. Hard og sterk bergmasse har vanligvis høyere seismiske hastigheter, mens myke, løse og porøse bergmasser har lavere hastigheter (NGU, u.d.).

2.3 Konvensjonell drift

Ved konvensjonell drift drives tunnelen med en syklus av flere operasjoner. Arbeidsoperasjonene for en typisk drivesyklus er vist i Tabell 3:

Tabell 3: Typisk drivesyklus for boring og sprening (Bruland A. , Anleggsteknikk GK Kompendium, 2016).

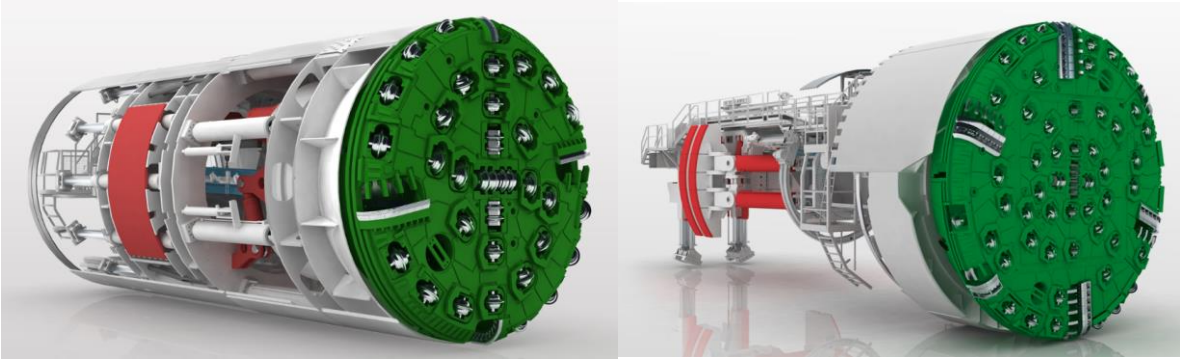
Forinjeksjon: Hull rundt tunneltversnittet og i stuff bores. Sement pumpes med høyt trykk inn i hullene. Sementen tetter sprekkene i fjellet for å hindre/redusere innsig av vann i tunnelen.	
Boring og ladning: Etter at forinjeksjonen er herdet, bores det hull. Hullene fylles med sprengstoff.	
Sprenging og ventilasjon: Sprengingen tilpasses tilstanden på fjellet om det omliggende miljøet så skader på bygg unngås. Etter hver sprengt salve må det ventileres for å tynne ut sprenggasser og tilføre frisk luft.	
Utlasting: De utsprengte bergmassene lastes opp på kjøretøy og kjøres til deponi eller til bruk andre steder.	
Rensk og sikring: Løst fjell pigges ned. Blokker og sprekker i tunneltaket sikres med bolter. Boltene støpes fast med betong i borhullet. Fjellet sikres med minst 8 cm tykt lag med sprøytebetong.	

For ca. hver tredje drivesyklus gjennomføres en sonderboring. Dersom sonderboringen påviser dårlig bergmasse eller svakhetssoner kan det bli aktuelt å bolte foran stuff. Annet arbeid som ikke foregår ved stuff kan utføres samtidig som drivingen går. Eksempler på dette kan være ventilasjonssystem og innretningsarbeid (Nilsen, 2016).

Konvensjonell driving med boring og sprengning er en fleksibel metode når fjellforhold, innlekkasje og tunnelgeometri er varierende. Denne drivemetoden er fleksibel der hvor hensyn til omgivelsene stiller strenge krav til å unngå innlekkasje og man kan gjøre systematisk forinjeksjon og vanntetting av tunnelen (Jernbaneverket A, 2015).

2.4 Fullprofilboring med tunnelboremaskin

Fullprofilboring vil si at hele tunneltverrsnittet drives ut i en kontinuerlig operasjon, uten bruk av sprengstoff. Figur 2.1 viser et eksempel på en tunnelboremaskin (TBM). En TBM for berg baserer seg på å bryte berg gjennom å presse rullemeisler mot tunnelstuffen. Rullemeislene er montert på et roterende kutterhode med en konstant innbyrdes radiell avstand, slik at det dannes konsentriske sirkulære spor i tunnelstuffen. Det oppstår da en knusningssone under rullemeislerne, samt radiell rissdannelse ut i fra knusningssonen. Den nedfragmenterte bergmassen løftes opp i skuffer i borhodet, og transporteres videre ut fra borhodet og over på maskinens transportbelte. (NFF, 2015).



Figur 2.1: Venstre: Dobbeltskjold TBM (Herrenknecht, 2018). Høyre: Åpen gripper TBM (Herrenknecht, 2018).

Dersom forholdene er riktige, kan anleggstiden og kostnadene bli vesentlig lavere i lange tunneler med TBM, sammenlignet med konvensjonell driving, på grunn av større drivehastighet, mindre ventilasjonsbehov og lavere sikringskostnader. Ved driving i bymessige områder eller områder som er ømfintlig for endring av grunnvannstand er TBM en mer skånsom drivemetode (Nilsen, 2016). Det finnes TBM for hardt berg, løsmasser og en kombinasjon av disse.

TBM-er for hardt berg

For TBM-er i hardt berg skilles det mellom åpen, enkel- eller dobbeltskjold TBM. For åpen eller gripper TBM, er bergmassen eksponert eller åpen rett bak kutterhode. Den fremre delen av en åpen TBM er forsynt med et takskjold og to sidestøtter (en på hver side). Disse bygger ca. en halv til ¾ tunneldiameter fra stuffen og bakover. Det er ingen kontinuerlig stabilisering bak takskjoldet og sidestøttene, annet en mulig forinjeksjon. Driften brukes i relativt gode bergforhold. Maskinen er fastspent til tunnelveggen ved hjelp av kraftige hydrauliske grippere. Gripperne trykkes mot bergoverflaten og drives fremover (Herrenknecht, 2018).

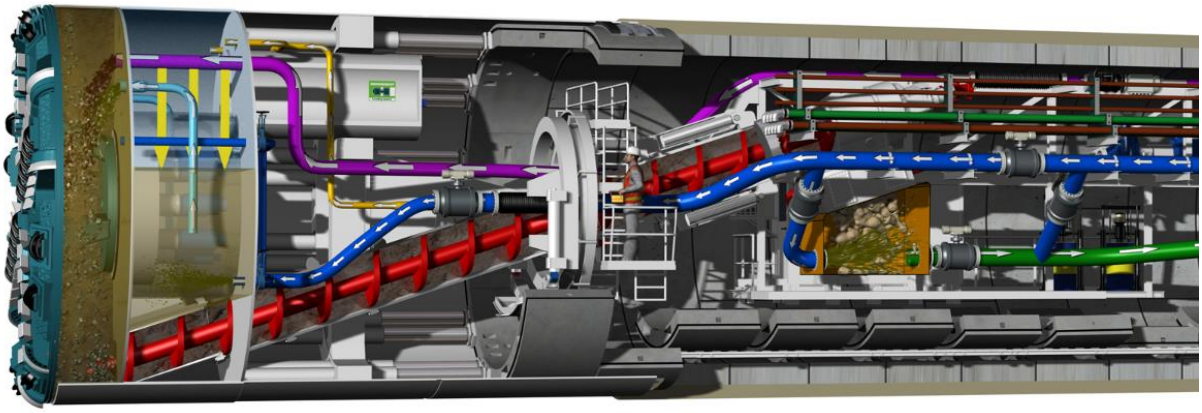
Enkel- og dobbeltskjold har et omliggende stålskjold for å beskytte maskin og mannskap, samt for å gi umiddelbar stabilitetssikring av berget. I normal operasjon trykker gripperne det bakre skjoldet mot bergoverflaten. Kraften overføres frem til kutterhode gjennom matesylindere. I svakt berg som deformeres eller går til brudd grunnet trykket fra gripperne, opererer maskinen kun med det enkle skjoldet (single shield mode) (Herrenknecht, 2018).

TBM-er for løsmasser

De typene som i hovedsak brukes for å drive tunnel i løsmasser og svakt berg er jordtrykksbalansert TBM (Earth Pressure Balance, EPB) og Slurry Shield TBM. Disse maskinene kan også benyttes til å drive tunnel hvor berg og løsmasser er kombinert. Funksjonsprinsippet til slike TBM-er er å stabilisere stuff og montere umiddelbar og kontinuerlig sikring med betongelementkledning, samt å ta ut masse kontrollert for å unngå setninger på overflaten og kollaps rundt tunnelen. Dette gjøres ved å generere et mottrykk som tilsvarer jordtrykket for så å ta ut masse kontrollert. Betongelementene monteres inni det bakre skjoldet kontinuerlig (NFF, 2015).

Kombinasjonsmaskiner (Multi-mode TBM)

Kombinasjonsmaskiner kan bore både i hardt berg og i løsmasser med relativ små tilpasninger. En Multi-mode TBM er vist i Figur 2.2. Maskinene som driver under disse forholdene er Slurry/ Hard rock TBM og EPB/ Hard Rock TBM. De har et kutterhode hvor løsmasseverktøyene kan byttes ut med rullemeisler i de ulike posisjonene (Herrenknecht, u.d.).



Figur 2.2: En del av en Multi-mode TBM (Herrenknecht, u.d.).

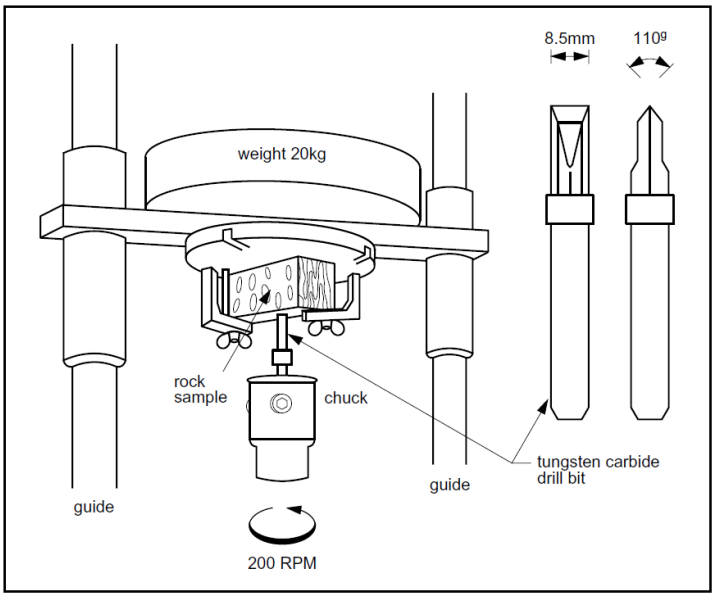
2.5 Drivetekniske parametere

Drivetekniske parameter forteller noe om borbarheten til bergarter, og er grunnlaget for estimering av kostnader og inndrift i tunnelen. Drivetekniske parametere som er vurdert i oppgaven er borsynk (DRI), borslitasje (BWI), kutterlevetid (CLI), sliteevne (VHNR) og sprengbarhet (SPR). Teorien om parameterne er hentet fra rapport «Hard Rock Tunneling, Drillability Test Methods». Rapporten er utviklet av Institutt for geovitenskap og petroleum og Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU, og beskriver blant annet hvordan de laboratoriske metodene til testene av bergarters DRI, BWI, CLI og VHNR er utført (Bruland, 1998).

Testmetoder

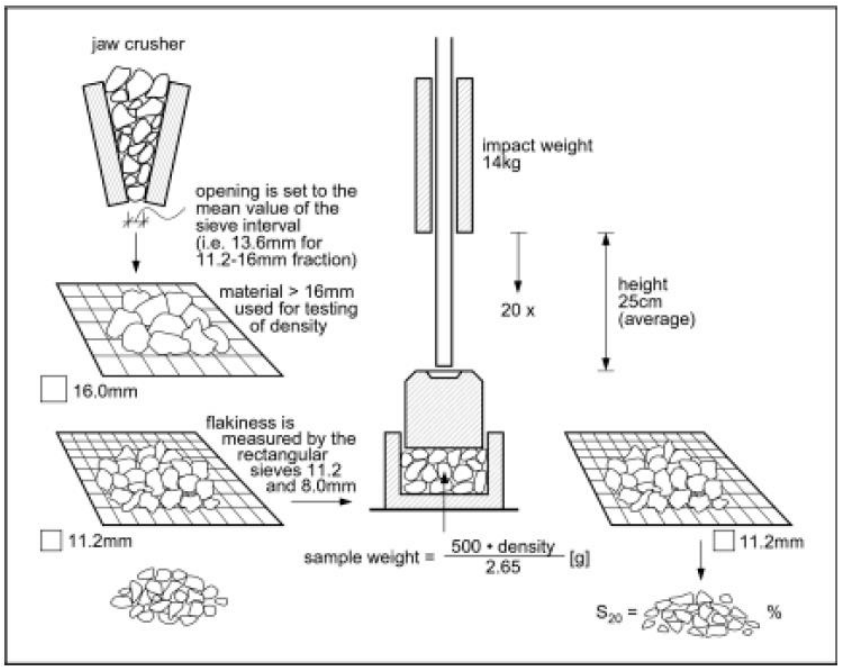
I rapporten er de drivetekniske parameterne vurdert på grunnlag av to laboratorietester, «Sievers' Miniature Drill Test» og «Spørhetstallet» (The Brittleness Test).

«Sievers' Miniature Drill Test» gir et mål på hardheten til overflaten på bergarten. Hardheten til forskjellige bergarter testes ved at en bor presses ned med 20 kg mot bergstykker av bergartene, se Figur 2.3. Etter 200 omdreininger, målt i 1/10 mm på bergstykkene bestemmes hardheten til de ulike bergartene, kalt for Sievers' J-verdien. Verdien beskriver penetrasjonsdybden borverktøyer kan oppnå.



Figur 2.3: The Sievers' Miniature Drill test (Bruland, 1998, s. 25).

Sprøhetstallet gir et mål på evnen bergarten har til å motstå oppknusing ved gjentatte slag. Ut i fra testen får bergarten en verdi, sprøhetstall, S_{20}, som gir en indikasjon på mengde energi som kreves for å starte en sprekkdannelse i bergmassen. En prøve tilsvarer 500 gram av en bergart, med fraksjon 16-11,2 mm og med en densitet på 2,65 g/cm^3. Etter 20 slag på 14 kg får bergarten et sprøhetstall S_{20}, ut i fra den prosentvise vektandelen som har passerer fraksjonen 11,2, se Figur 2.4. Sprøhetstallet blir gjennomsnittsverdien ut i fra 3-5 parallelle tester.



Figur 2.4: The brittleness Test (Bruland, 1998, s. 26)

Borbarhet

Borbarhet er en generell betegnelse på hvor enkelt eller vanskelig en gitt geologisk masse er å bore ut (NFF, 2015). Bergmassens borbarhet er et mål på bergarters borsynk (netto inndrift) som oppnås ved boring av et hull med en bestemt diameter under bestemte arbeidsbetingelser, samt den slitasje som bergarten forårsaker på borverktøyet. Borbarhet er et relativt begrep fordi ulike arbeidsbetingelser gir forskjellig resultat for inndrift og slitasje.

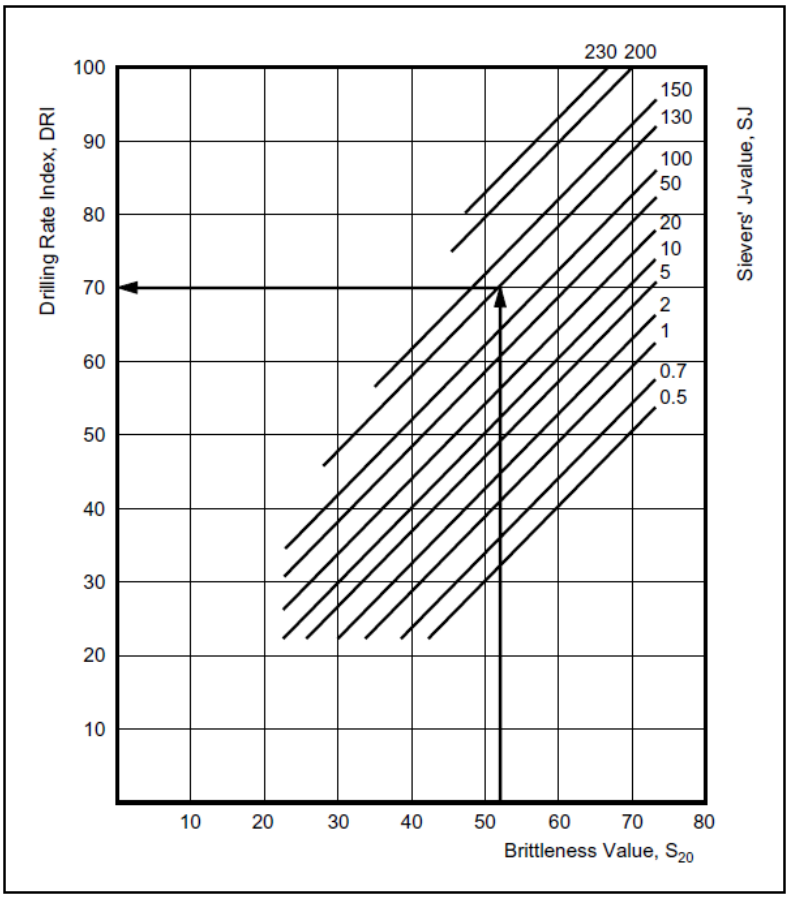
De viktigste bergartsforhold som påvirker borbarheten er:

- Enkeltkornenes styrke og sliteevne
- Bindingskraften mellom kornene
- Elastisitetsegenskapene
- Sprøhet
- Porøsitet
- I tillegg bergmassens oppsprekking og skifrighet

Ved anlegg i berg har borbarheten vesentlig betydning for kostnader og tidsforbruk, samt valg av drivemetode og utstyr (Bruland A. , Anleggsteknikk GK Kompendium, 2016). For å oppnå helt nøyaktig klassifisering av borbarhet må bergartsprøver fra stedet til det aktuelle utbyggingsprosjektet testes i et laboratorium. Det vil gi et mer nøyaktig estimat av inndrift og kostnader.

Borsynkindeks (Drillingrateindex, DRI)

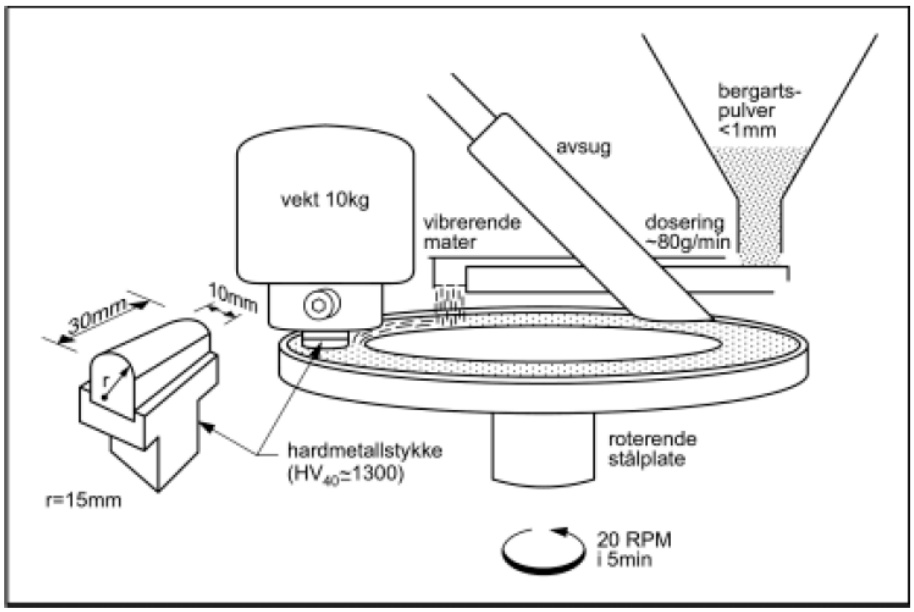
Boresynkindeksen kan oppfattes som sprøhetstallet korrigert etter hardheten på bergets overflate. Ved bruk av Figur 2.5 bestemmes borsynkindeks, DRI ut i fra sprøhetstallet S_{20} og Sievers' J-verdien. DRI forteller hva bergets forventede borsynk er.



Figur 2.5: Diagram for vurdering av DRI (Bruland, 1998, s. 9)

Borslitasjeindeks (Bitwearindex, BWI)

Borslitasjen benyttes som grunnlag for å bestemme levetid på borkroner, borruller, etc. BWI uttrykker levetid i bormeter eller utboret volum. Den blir beregnet ut ifra borsynkindeksen DRI og en målt slitasjeverdi AV, se Figur 2.6.



Figur 2.6: Prinsippskisse for måling av slitasjeverdi, AV (Bruland, 1998, s. 13).

Kutterlevetidsindeksen (Cutterlifeindex, CLI)

Kutterlevetidsindeksen, CLI gir uttrykk for levetid i bortimer for kutterringer av stål ved fullprofilboring. CLI beregnes ut fra Sievers J-verdi og slitasjeverdien AVS. Slitasjeverdien AVS måles etter samme prinsipp som AV, bare med et prøvestykke av stål fra en ubrukt kutterring (Bruland, 1998). Ved å teste levetiden til kutterringer mot bergarter kan man bruke tallene til å beregne hvor ofte ringene må skiftes. Dette krever stans i drivingen, og påvirker kostnader og tidsbruk.

Sliteevneparameteren, VHNR

VHNR står for Vickers Harndess Number Rock og er et hardhetstall for bergartens mineralhardhet etter de ulike mineralers prosentvise andel i bergarten. Bergartens mineralsammensetning er med på å bestemme den «effektive» tidsavhengige sliteevnen nedknust bergartspulver har på borverktøyet. Tabell 4 viser utregning av samlet VHNR for bergarten gneis etter mineralsammensetningen.

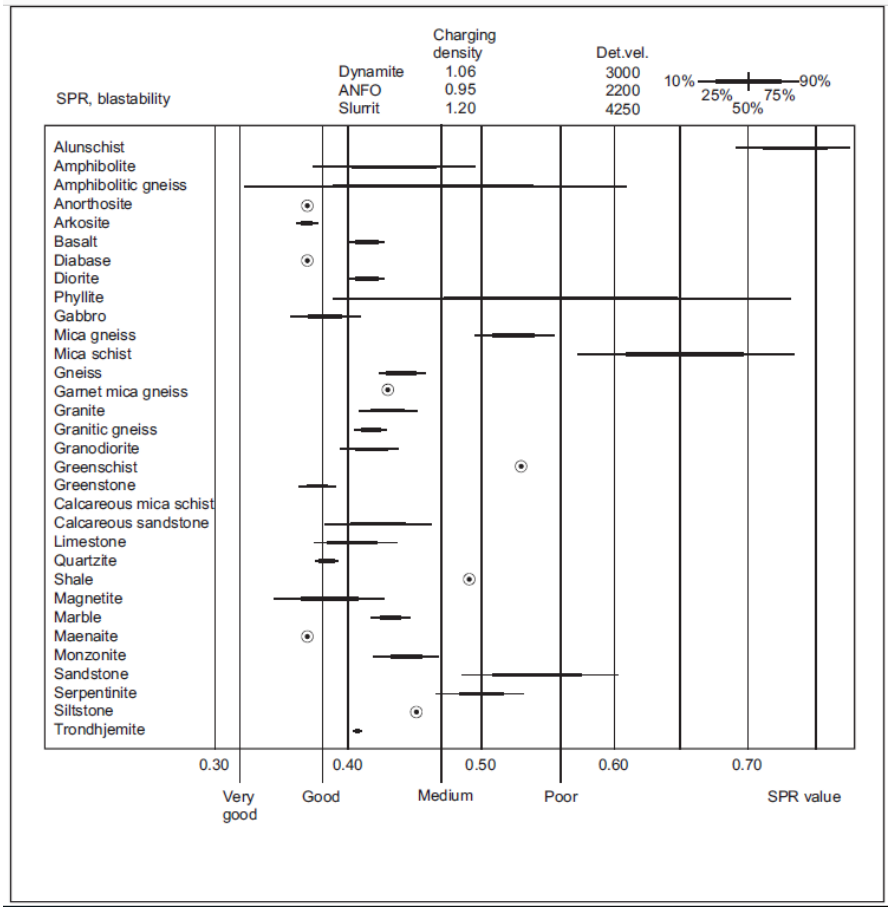
Tabell 4: Eksempel på beregning av VHNR for bergarten gneis (Bruland, 1998, s. 15).

Mineral	Andel, %	Mineralhardhet, VHN	Andel samlet hard-het
Kvarts	30	1060	318
Plagioklas	63	800	504
Amfibol	2	600	12
Biotitt	5	110	6
Samlet hardhet, VHNR			840

Sprengbarhet, SPR

Bergartens sprengbarhet er gitt ved en sprengbarhetsindeks, SPR. Den forteller hvor mye mengde sprengstoff (kg/m^3) som trengs for å knuse berget ned til fragmenteringsstørrelsen hvor 50% av det knuste berget er under 250 mm (d50 = 250 mm) (Bruland A. , Drill and Blast Tunnelling Blast Design, 2008). Tabell 5 viser SPR verdier for prøver av ulike bergarter testet på geoteknisk laboratorium ved NTNU.

Tabell 5: Sprengbarhetsindeksen til ulike bergarter (Bruland A. , Drill and Blast Tunnelling Blast Design, 2008, s. 16).



Streckeisen diagram

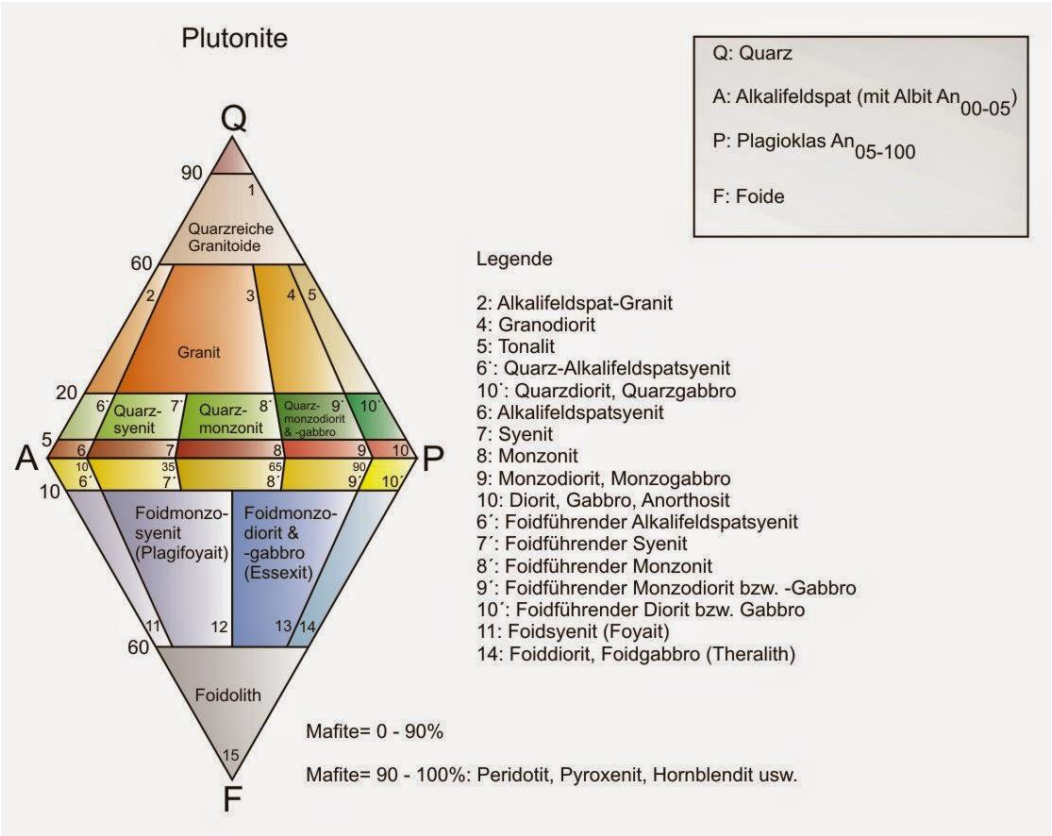


Diagram 1: Streckeisen diagram (Geologyin, 2015)

Et Streckeisen diagram (Diagram 1) klassifiserer vulkanske bergarter basert på mineralogisk sammensetning. Mineralgruppene som klassifiseres i diagrammet er bergartens innhold av kvarts, alkali feldspar, plagioclase og feldspathoid. Mineralinnholdet i bergarten har betydning for blant annet sliteevneparameteren, VHNR (Geologyin, 2015).

2.6 Bergsikring

De ingeniørgeologiske og bergmekaniske forholdene langs et berggrom eller en trasé bestemmer i stor grad stabilitetsforholdene. Ut ifra forholdene bestemmes et sikringsomfang og sikringsmetoder, som monteres i heng og vegger for å stabilisere og sikre. Før valg av sikringsomfang og sikringsmetode vektlegges følgende, i henhold til tekniske regelverk:

- *Bergets egenskaper (Q-systemet)*
- *Lekkasjeforhold, frostmengde*
- *Metode for vann- og frostsikring*
- *Trafikkmengde og toghastighet*
- *Krav til vedlikehold*

  (Norsk jernbaneskole, 2015)

I Norge brukes et klassifiseringssystem kalt Q-systemet. Bergmassen rundt bergrom og tunneler får en Q-verdi som beskriver bergmassens stabilitet. Q-verdien beregnes ut fra seks parametere ved hjelp av ligningen:

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

De seks parameterne er:

- RQD = Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)
- J_n = Tall for sprekksett
- J_r = Sprekkeruhetstall
- J_a = Tall for sprekkefylling
- J_w = Sprekkevannstall
- SPF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)

Sammen uttrykker de hovedfaktorene oppsprekkingsgrad, bergmassens minimale skjærfasthet og opptredende spenning, som beskriver stabiliteten i tunneler og bergrom (NGI, 2015).

Videre deles sikringsopplegget deles opp i:

- *Standard sikring, med sikringsmetodene:*
  - *Bolter (spredt eller systematisk)*
  - *Sprøytebetong med eller uten fiber*

- *Tung sikring, med sikringsmetodene:*
    - *Forbolting (spiling)*
    - *Sprøytebetongbuer*
    - *Full utstøping*

  (Norsk jernbaneskole, 2015)

Berget inneholder sprekker og porer som kan være vannførende. Vannmengden og vannstrømningsforholdene i berget er avhengig av hydraulisk konduktivitet som igjen avhenger av bergartens type, oppsprekkingsgrad og porøsitet. Å drive tunnel gjennom et berg er som å dra ut en propp av berget. Det begynner å lekke ut av sprekkene i tunnelen der det før var fast fjell (Nilsen, 2016). For å tette igjen berget så godt som mulig slik at tunnelen blir tørr, injiseres det. Injeksjon bidrar til å stabilisere berggrunnen, og hindrer grunnvannsenkning og inntrenging av vannmengder i tunnelen. Likevel vil det lekke fra berget, og derfor monteres vann og frostsikring for å unngå drypp og is på veg- og jernbaner.. Injeksjonsbehovet er enten systematisk (kontinuerlig løpende forinjeksjon), eller bestemmes ut fra behovsprøver som måles ut fra vanntrykk og vannmengder i sonderhull (Statens Vegvesen A, 2016).

2.7 Vann- og frostsikring

Veg- og jernbanetunneler sikres spesielt mot vann og is. På bakgrunn av ulike bergtekniske forhold, klimafaktorer og trafikkbelastninger er det utviklet ulike vann- og frostsikringsløsninger for å beskytte tunnelbanen. I tillegg til å hindre vann og frost i tunnelene stilles det også krav til utseende, overflateegenskaper og brannmotstand for vann- og frostsikringskonstruksjonene (Nordisk Vegteknisk Forbund, 2008).

Vann- og frostsikring (VoF) utgjør en stor del av den totale byggekostnaden til tunneler. I dag er disse fire løsningene vanlige i Norge:

1. Betongsegmenter for TBM /element på berg
2. Sprøytebetong i kombinasjon med sprøytbar vanntettingsmembran
3. Hvelv av betongelementer i kombinasjon med PE-skum og sprøytebetong
4. Plasstøpt betong med membran / full utstøping med membran

3. Metode

3.1 Innhenting av informasjon

For å danne et større grunnlag for å analysere data, er det hensiktsmessig med et innledende teorikapittel. Informasjonen i teoridelen er hentet fra vitenskapelige artikler og rapporter, doktor- og masteravhandlinger fra biblioteket og litteratursøk ved NTNU. I tillegg ble kompendium fra tidligere fag som anleggsteknikk og ingeniørgeologi ved NTNU benyttet. Høst 2017 skrev jeg prosjektoppgave om vann- og frostsikring, som var nyttig for teorikapittelet og senere i oppgaven.

Tilgjengelig geologisk informasjon i området er kart og tidligere geologiske rapporter. Geologisk data ble observert mangelfull og det ble da nødvendig med en befaring. For å evaluere geologien ble kartene til Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) studert. Norges Geologiske Undersøkelse er landets sentrale institusjon for kunnskap om berggrunn, mineralressurser, løsmasser og grunnvann i Norge (NGU, 2017). Kartene berggrunn og grunnvannsborehull (GRANDA) ble spesielt brukt (NGU, 2018).

3.2 Befaring

I løpet av februar 2018 ble det foretatt en befaring i området, og et møte med medlem av kommunestyret på Klepp for å få et innblikk i deres visjon. Hensikten med befaringen var å finne bergblotninger og få en oversikt over landskapet. Det var også ønskelig å finne en blokk fra berget som kunne fraktes til Trondheim og testes i laboratorium for å finne ut mer om bergets art og egenskaper i området. Landskapet er relativt flatt og dekket av mektige løsmasser, Store deler av jorden på strekningen mellom stasjonene er dyrka mark. Det ble ikke funnet noen bergblotninger på befaringen, og det ble derfor gjort en ny befaring 06.04.2018. Det ble ikke funnet noen bergblotninger denne gang heller. Figur 3.1 var de største steinene funnet på befaringen, og er mest sannsynlig ikke bergblotninger.

Figur 3.1: Fotografier fra befaringer.

3.3 Samtaler

Kontaktperson for silingsrapporten Bane NOR har utarbeidet ble kontaktet og datarapport for geoteknisk grunnundersøkelser fra silingsrapporten ble tilsendt. Datarapporten var informativ fordi den gav resultater fra refraksjonsseismikk og totalsonderinger. En begrensning med informasjonen er at undersøkelsene bare var utført rundt Bane NORs trasealternativ. Optimalt ville en geologisk undersøkelse langs tunneltraseen vurdert i oppgaven gitt betydelig mer oversiktlig informasjon om hvilke forhold som ventes.

Det har jevnlig blitt holdt møter med veileder Pål Drevland Jakobsen gjennom skriveporesessen for å planlegge, beregne og arbeide i samråd med han. Ellers er det holdt møter med Karl Gunnar Holter og Amund Bruland for innspill til synspunkt og vurderinger av tunnelkonsept, drivemetode og ingeniørgeologi. En utfordring med å være i samtaler med spesialister innenfor fagområdet var å sile ut objektiv informasjon.

3.4 Dataprogram

For å estimere drivekostnader og byggetid for tunnelen er programmene «Tunsim» og «Anleggsdata Fullprof» benyttet.

For beregning av drivekostnader og byggetid til konvensjonell driving er Windows programmet TUNSIM benyttet. Programmet er utviklet av NTNU, og er basert på erfaringstall. Prognosene kommer fra Report 2-05 DRILL AND BLAST TUNNELLING, utarbeidet ved NTNU i 2006 som en del av doktorgradsavhandlingen til Shokrollah Zare.

Programmet «Anleggsdata Fullprof» er benyttet for utregning av drivekostnader og byggetid for fullprofilboring i hardt berg. Programmet er utviklet av Anleggsdata AS i samarbeid med Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU (NTNU, u.d.).

Programmene gir omtrentlige estimater for drivekostnader og byggetid for de to ulike drivemetodene, men er sensitive for endring av parametere. Denne sensitiviteten gjør at det er enkelt å påvirke estimatet i ønsket retning ved å endre små verdier ved geologien. I tidlig undersøkelsesfase uten prøveboringer fra området er det vanskelig å si hva verdiene faktisk er, og ved utførelse av prosjektet kan antatte kostnader variere $\pm$ 25 % (Nilsen, 2016).

3.5 Vurdering i oppgaven

Vurderingene i oppgaven er i basert på kunnskap tilegnet gjennom skriveprosessen av masteroppgaven, men også fra tidligere lærdom tilegnet i løpet av studiet. De er også basert på samtaler med veileder og fagpersoner fra anleggsbransjen.

En begrensning med vurderingene er forfatterens mangel på erfaring, og at det generelt er mange subjektive oppfatninger i bransjen som blant annet kan påvirke litteraturmateriale og samtaler med fagpersoner. En stor begrensning i oppgaven er det mangelfulle geologiske grunnlagsmateriale som vurderingene er basert på. Drivemetode, kostnad, inndrift og andre parameter er avhengig av grunnforholdene i området. For å oppnå mest mulig realistiske resultater må de geologiske og drivetekniske parameterne være presise. Oppgavens parametere er basert på erfaringstall, og ikke på resultater direkte fra aktuelt område. Det er derfor stor usikkerhet rundt parameterne som følger resultatene i oppgaven.

4. Geologisk informasjon

4.1 Grunnlagsmateriale

Geologisk informasjon fra området er hentet fra ulike kart og kilder. Berggrunnsgeologiske kart og kvartærgeologiske kart er målestokkavhengige, og er i målestokkområdet 1:250 000 og gir en grov, regional oversikt.

- Berggrunnsgeologisk kart N250 (NGU, 2005) er brukt til å hente inn informasjon om bergartstyper i området.
- Kvartærgeologisk kart (NGU, 2005) er brukt til å hente inn informasjon om løsmassetyper i området.
- Kartet Grunnvannsborehull (GRANADA) (NGU, 2017) er brukt til å hente inn informasjon fra fjell- og grunnvannsbrønner i området. Informasjon fra fjellbrønn nr: 92389, 37086, 68589 og 66467 har vært nyttig for oppgaven. Brønnrapportene finnes i Vedlegg 1.

Aktsomhetskart for skred (målstokkområde 1:50 000) er hentet fra Norges vassdrags- og energidirektorat sine sider.

- Aktsomhetsområder for jord- og flomskred er en nasjonalt dekkende kartserie som viser potensielt jord- og flomskredutsatte områder på oversiktsnivå. Kartene viser potensielle utløpsområder for jord- og flomskred (NVE, 2014). Kartet er brukt til å undersøke jord- og flomskredmuligheter i området.
- Aktsomhetsområder for snøskred er en nasjonalt dekkende kartserie som viser potensielt snøskredutsatte områder på oversiktsnivå. Kartene viser potensielle løsneområder og utløpsområder for snøskred (NVE, 2017). Kartet er brukt til å undersøke snøskredmuligheter i området.
- Aktsomhetskart for steinsprang viser potensielle utløysings- og utløpsområder for steinsprang. De viser potensielle utløsnings- og utløpsområde for steinsprang, og sier ikke noe om sannsynligheten for steinsprang (NVE, 2017). Kartet er brukt til å undersøke steinsprang- og steinskredsmuligheter i området.

Silingsrapport Bane NOR, 2016: Sørlandsbanen (Egersund) – Stavanger, Dobbeltspor Sandnes – Nærbø (Bane NOR A, 2016), vurderer ulike trasemuligheter og gir et overblikk over dagens situasjon. Rapporten er brukt til å få et overblikk, og til innhenting av informasjon om geoteknikk og grunnforhold i området.

Datarapport Geofysiske grunnundersøkelser Multiconsult 2015: Sandnes – Nærbø dobbeltspor (Multiconsult, 2015), inneholder undersøkelser fra refraksjonsseismikk, utført i forbindelse med silingsrapporten til Bane NOR. Resultatene fra rapporten er brukt til å finne informasjon om bergmassekvalitet.

NTNUs Borbarhetsdatabase inneholder informasjon om ingeniørgeologi rundt om i Norge. Databasen er brukt til å få informasjon om drivetekniske parameter i området ved tunneltraseen.

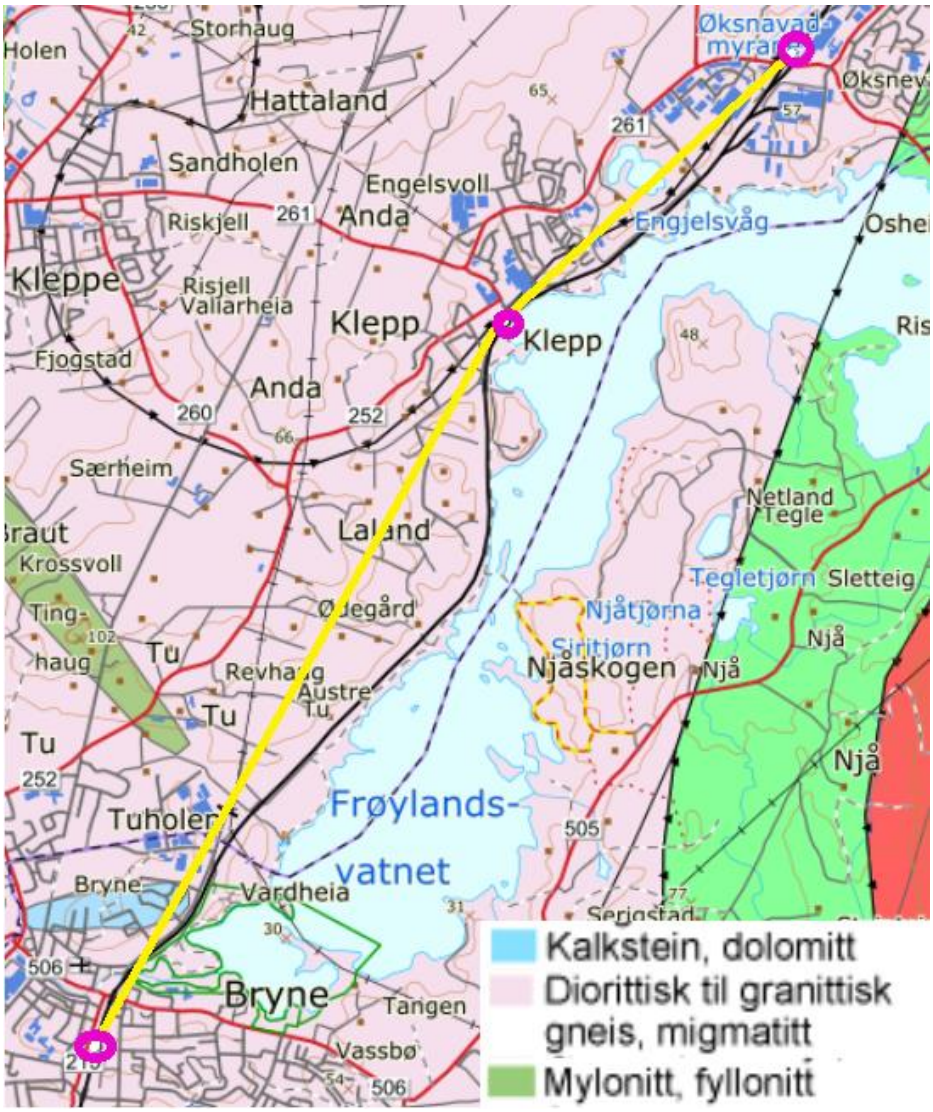
Det er mangler og usikkerheter med grunnlagsmaterialet. Blant annet mangler det informasjon om:

- Bergspenninger
- Kartlegging av svakhetssoner
- Q-verdi til bergmasse
- Nøyaktig avstand fra overflate til fast fjell
- Hydrogeologiske forhold
- Mer refraksjonsseismikk og fjellkontrollboringer
- Nøyaktige drivetekniske parametere fra området

4.2 Bergmasser

Berggrunnen i hele kommunen hører til de kaledonske dekkene, særlig glimmergneis; noe fyllitt og granitt heilt i nordøst. I Prekambrium ble Svekonorvegiske fjelldannelse utviklet. De yngste svekonorvegiske dannelsene bevitnes av større formasjoner av magmatisk granitt og metamorf gneis (SNL, 2017).

I følge berggunnskart (Figur 4.1) fra NGU ventes bergartene langs tunneltraseen og ved stasjonsområdene til å være dorittisk til granittisk gneis og migmatitt. Det ventes at traseen passerer et område med kalkspatmarmor og kalksilikatgneis ca. 300 m nord for Bryne stasjon.

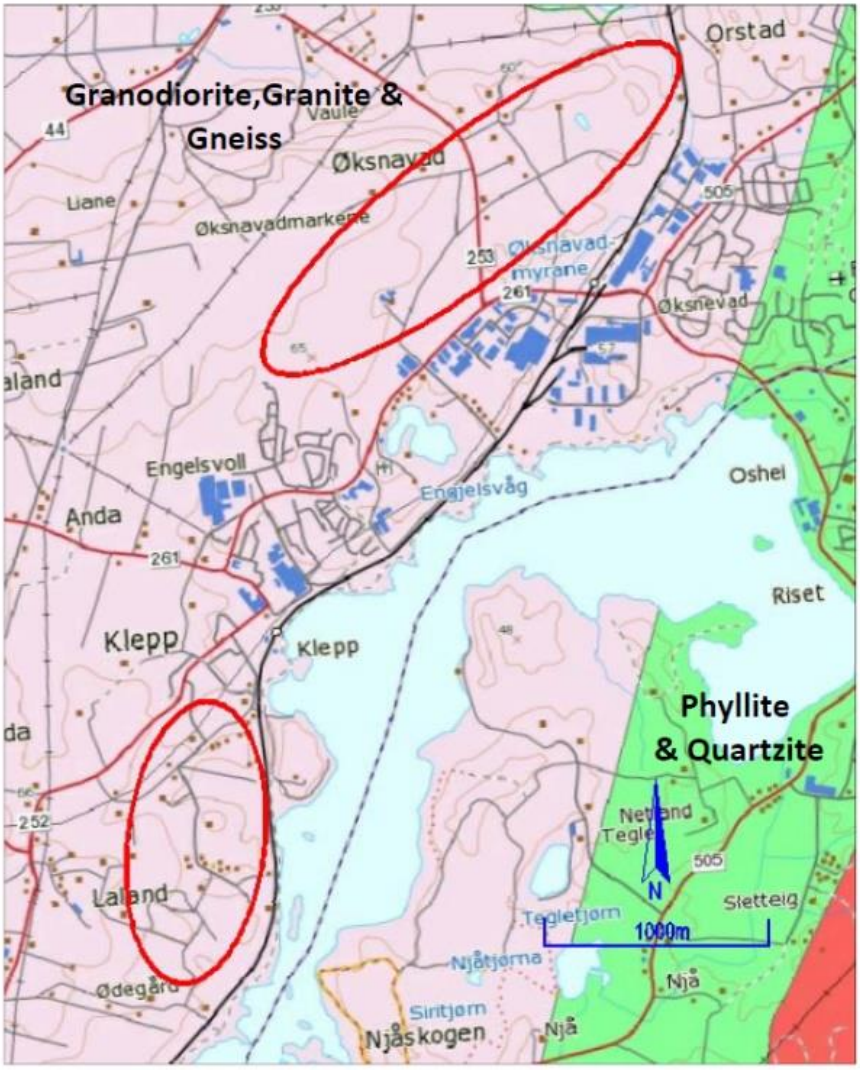


Figur 4.1: Skjermbilde fra berggrunnskart til NGU: Berggrunnskart langs tunneltraseen (gul linje). Traseens stasjoner er markert med rosa sirkler.

Informasjonsmateriale

Fjellbrønner fra grunnvannsdatabasen til NGU er brukt som informasjonsmateriale om berggrunnen. Vedlegg 1 viser brønnenes lokasjon og brønnparametere til fjellbrønnene i området.

Geotekniske grunnundersøkelser i forbindelse med datarapport til Bane NOR har ved bruk av refraksjonsseismikk, funnet en typisk lagdeling basert på P-bølgehastigheten for området nord og sør for Klepp stasjon, se Figur 4.2. Tabell 6 og 7 gir typisk lagdeling i områdene.



Figur 4.2: I områdene med røde ringer er det utført refraksjonsseismikk (Multiconsult, 2015).

Tabell 6: Typisk lagdeling område nord (Multiconsult, 2015).

Lag	P-bølgehastighet (m/s)	Gjennomsnittlig P-bølgehastighet (m/s)	Tykkelse av lag (m)	Gjennomsnittlig tykkelse (m)	Tolkning (basert på figur 4-2)
1	185-784	387	0,7-3,6	1,9	Matjord/silt/sand/grus
2	702-1449	1112	0,1-12,8	5,1	Morene (tørr)
3	1233-2581	1800	8,1-42,8	20,9	Løs/hard morene
4	3211-6838	4126			Granitt/gneis

Tabell 7: Typisk lagdeling i område sør (Multiconsult, 2015).

Lag	P-bølgehastighet	Gjennomsnittlig P-bølgehastighet	Tykkelse av lag	Gjennomsnittlig tykkelse	Tolkning (basert på figur 4-2)
1	227-588	384	1,2-4,2	2,4	Matjord/silt/sand/grus
2	866-1589	1252	0,2-11,7	5,1	Morene (tørr)
3	1422-2307	1892	1,1-14,4	5,9	Løs/hard morene
4	3256-6767	4944			Granitt/gneis

Tolkningen av P-bølgehastigheten er basert på en rapport fra NGU, vist i Tabell 8. S-bølgehastigheten er ofte lik ca 60% av P-bølgehastigheten (varierer). Oppsprekking av bergarten og leiromvandling vil kunne redusere hastighetene betydelig (NGU, u.d.)

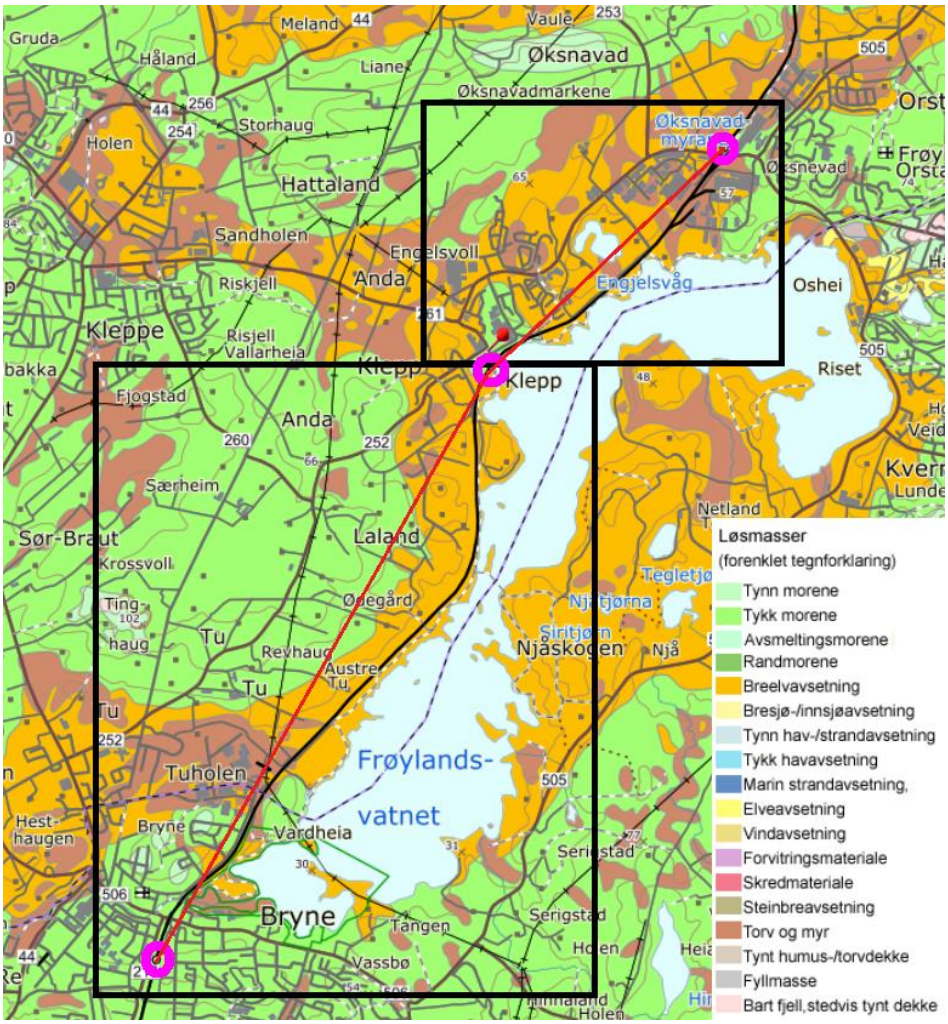
Tabell 8: P-bølgehastigheten i noen geologiske materialer. Data er hentet fra norske erfaringer (NGU og Geomap as).

Jordarter	P-bølgehastighet (m/s)	Bergarter, ikke oppsprukket	P-bølgehastighet (m/s)
Torv	150 – 500	Sandstein	3000 – 3500
Leire (tørr)	600 – 1200	Kalkstein	4000 – 6000
Sand (tørr)	400 – 900	Dolomitt	2500 – 6500
Grus (tørr)	400 – 1000	Kvartsitt	5500 – 6000
Morene (tørr)	400 – 1600	Granitt	4800 – 5500
Leire (vannmettet)	1200 – 1600	Gneis	4700 – 5800
Sand (vannmettet)	1400 – 1800	Diabas	5700 – 6500
Grus (vannmettet)	1400 – 1900	Gabbro	6200 – 6700
Morene (løs)	1500 – 1900	Ultramafisk	6500 – 7500
Morene (hard)	1900 – 2800		

Fra NTNUs borbarhetsdatabase er det hentet ut ingeniørgeologiske verdier fra området på Jæren. Databasen angir bergartene granodiorittisk gneis og granittisk gneis i området. Databasen er basert på prøveboringer, hvor parameter som DRI, BWI, CLI og VHNR er testet.

4.3 Løsmasser

I følge løsmassekart vist i Figur 4.3 fra NGU ventes løsmassene langs tunneltraseen og ved stasjonsområdene til å være tykk morene, breelvavsetninger og torv og myr.



Figur 4.3: Skjermbilde NGU: Løsmassekart som viser forventet løsmassetyper langs tunneltraseen (rød linje). Traseens stasjoner er markert med rosa sirkler.

Følgende informasjon fra silingsrapporten til Bane NOR kan ha interesse ved planleggingen av tunneltrasé:

Mot Øksnevadporten er det store forekomster av torv og myr på vestsiden av eksisterende spor. Det er funnet torv og myr med mektighet opptil 5 m. Generelt har massene under torv og myren svært stor fasthet. Disse består av antatt svært fast leire.

Bunnen av Frøylandsvatnet langs strandsonen ved Klepp stasjon består av lag av mudder med registrert mektighet opp mot 3 m, men det er antatt at mektigheten stedvis kan være større. Ellers er det funnet lag av bløte masser med mektighet opp mot 8 m rundt Klepp stasjon. Generelt består løsmassene av matjordslag, stedvis noe sand og grusholdig, over fastere lag av grov sand og grus. Bløte masser antas å ha blitt utskiftet hvor det er bebyggelse. Dybden til berg er mellom 10-15 m rundt Klepp stasjon.

I Frøylandsvatnet mellom Bryne og Klepp er det generelt store forekomster av torv, myr og gytje. Grunnforholdene på strekningen mellom stasjonene består av matjord, sand/grus og morene. På vestsiden langs strandsonen ved Frøylandsvatnet ved Klepp til Bryne stasjon er det lag av gytje, torv og myr med mektighet fra 3 – 8 m (Jernbaneverket B, 2016, s. 67).

5. Ingeniørgeologiske vurdering

Dette kapittelet inneholder en vurdering på grunnlag av informasjonen hentet i Kapittel 4, som beskriver forventet geologi i området og nært tunneltraseen.

5.1 Bergarter

Terrenget på Jæren er flatt og uten for mye høye fjell og varierende topografi. Bergmassene langs tunneltraseen er antatt i hovedsak å bestå av samme bergart langs tunneltraseen og til å være relativt homogene. Dette kan kjerneboringer bekrefte ved en eventuell videre plan.

Ut ifra informasjon fra Kapittel 4, er det i hovedsak angitt fire bergarter i området. Disse er:

- Granodioritt
- Doritt
- Granitt
- Gneis

I følge berggrunnskart fra NGU passerer tunneltraseen også en strekning med kalkstein som hovedbergart på ca 300 meter.

Bergartenes drivetekniske parameter er vist i Tabell 9. Parameterne er hentet ut og vurdert fra ulike kilder. Kildene er NTNUs borbarhetsdatabase, rapport «Hard Rock Tunneling, Drillability Test Methods» og Datarapport Geofysiske grunnundersøkelser. I enkelte av kildene er parameterne til noen av bergartene allerede ferdig beskrevet. Ellers er VHNR vurdert etter Streckeisen Diagram og DRI, SPR og BWI etter rapport «Hard Rock Tunneling, Drillability Test Methods».

Tabell 9: Bergartenes drivetekniske parameter.

Bergart	DRI	BWI	CLI	SPR	Mineralinnhold, %	VHNR
Granodioritt	26	69	9	0,42	Q: 20-60 P: 65-90 A: 10-35 (Geologyin, 2015)	888
Doritt	33	40	13	0,41	Q: 9, P: 51, A:4, F: 23 (NTNUs borbarhetsdatabase)	672
Granitt	50	44	7	0,43	Q: 20-60 P: 35-10 A: 90-65 (Geologyin, 2015)	849
Gneis	40	61	8	0,44	Q: 30, P:63 A: 2, F: 5 (NTNUs borbarhetsdatabase)	840
Kalkstein (ca 4% av strekningen)	58	10	78	0,42	Kalsitt: 99 Muskovitt: 1 (Wilhelmsen, 2010)	125
Gjennomsnitt	**37 (dårlig)**	**53 (høy)**	**7,9 (middels)**	**0,416 (God)**		**807**

Ut i fra DRI, BWI og CLI klassifiseres bergarten fra kategori lav til høy, se Tabell 10.

Tabell 10: Kategorier for boreindekser (Bruland, 1998, s. 18).

Kategori	DRI	BWI	CLI
Ekstremt lav	- 25	- 10	< 5
Meget lav	26 - 32	11 - 20	5,0 - 5,9
Lav	**33 - 42**	**21 - 30**	**6,0 - 7,9**
Middels	**43 - 57**	**31 - 44**	**8,0 - 14,9**
Høy	**58 - 69**	**45 - 55**	**15,0 - 34**
Meget høy	70 - 82	56 - 69	35 - 74
Ekstremt høy	82 -	70 -	≥ 75

5.2 Løsmasser

Langs tunneltraseen varierer tykkelsen på løsmassene. Ved Øksnevadporten er det antatt løsmasser med stor mektighet. Tunneltraseen beveger seg fra nord mot Øksnevadporten vil krysse store mektigheter løsmasser, før den kommer inn i fast berg.

Ut i fra informasjonen i Kapittel 4 er fjelloverdekningen og terrengprofilet kartlagt i Diagram 2. Diagram 2 er laget ved hjelp av norgeskart.no. Diagrammet viser høydeprofilen til dagens terreng i en rett linje mellom stasjonene Øksnevad, Klepp og Bryne, og høydeprofilen til fjelloverdekningen.

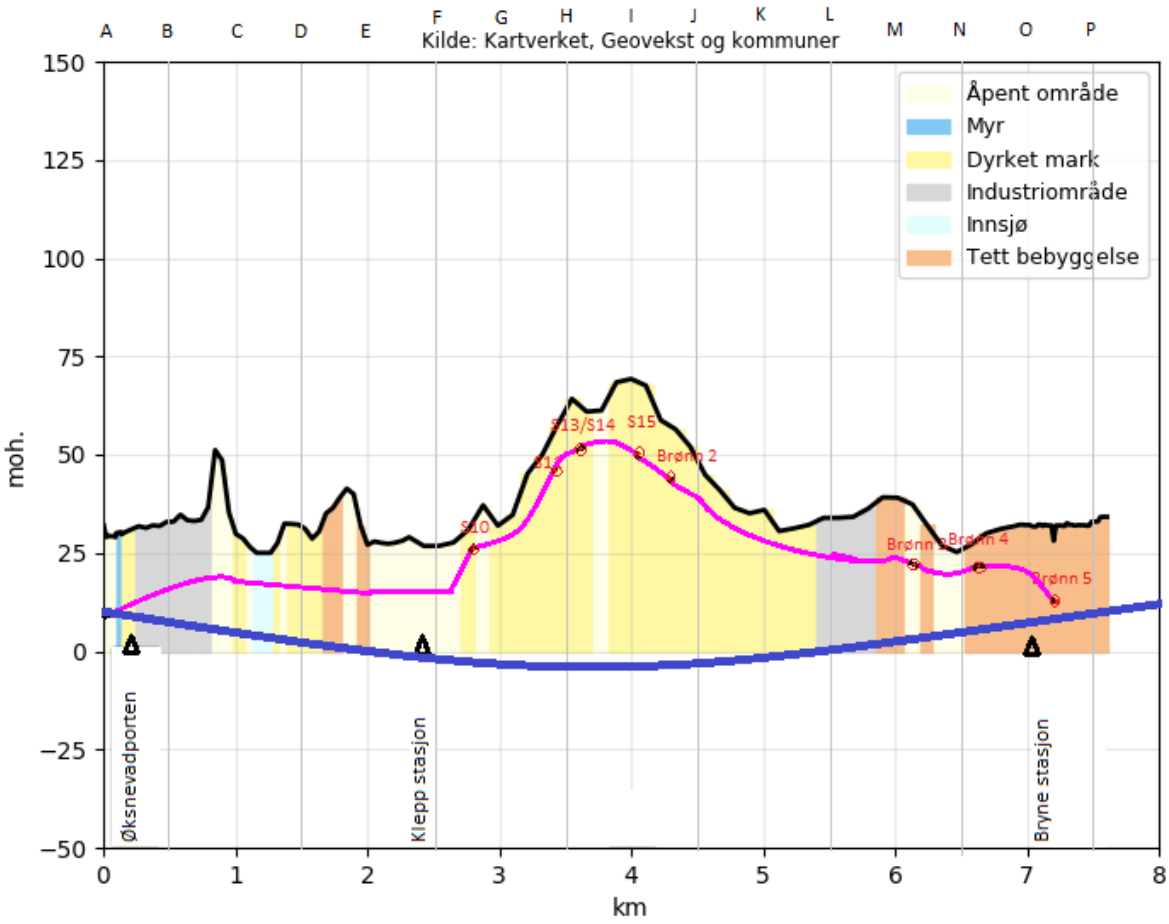


Diagram 2: Sort linje viser høydeprofilet til dagens terreng. Rosa linje viser bergoverflaten, basert på fjellbrønner fra NGU og Datarapport «Geofysiske grunnundersøkelser». Den blå linjen er et eksempel på hvordan tunneltraseen kan gå.

Avstanden fra terreng til fast berg er bestemt ut i fra:

Mellom A og C: Typisk gjennomsnittlig tykkelse 20,9 m nord-vest for Øksnevadporten (Multiconsult, 2015)

Mellom E og F: Dybden til berg er mellom 10-15 m rundt Klepp stasjon (Jernbaneverket, 2016)

Mellom F og G: Sonderingspunkt S10: 6 m til fast fjell (Multiconsult, 2015)

Mellom G og H Sonderingspunkt S11: 7 m til fast fjell (Multiconsult, 2015)

Mellom H og I; sonderingspunkt S 13 og S 14: 11 og 7 m til fast fjell. Punktene ligger på hver sin side av tunneltraseen (Jernbaneverket, 2016)

Akkurat på I: sonderingspunkt S15: 17,5 m (Multiconsult, 2015)

Mellom I og J: Fjellbrønn nr 2: ngu 15 m 2,8 m fra bryne

Mellom J og L: Totalsonderingene her indikerer et tynt lag med matjord over et lag med sand/grus eller morene. Alle sonderingene er avsluttet i antatt berg mellom 3,1 til 9,7 m dybde (Jernbaneverket, 2016)

Mellom M og N: fjellbrønn nr. 3: 15 m. 750 m fra Bryne stasjon (ngu.no)

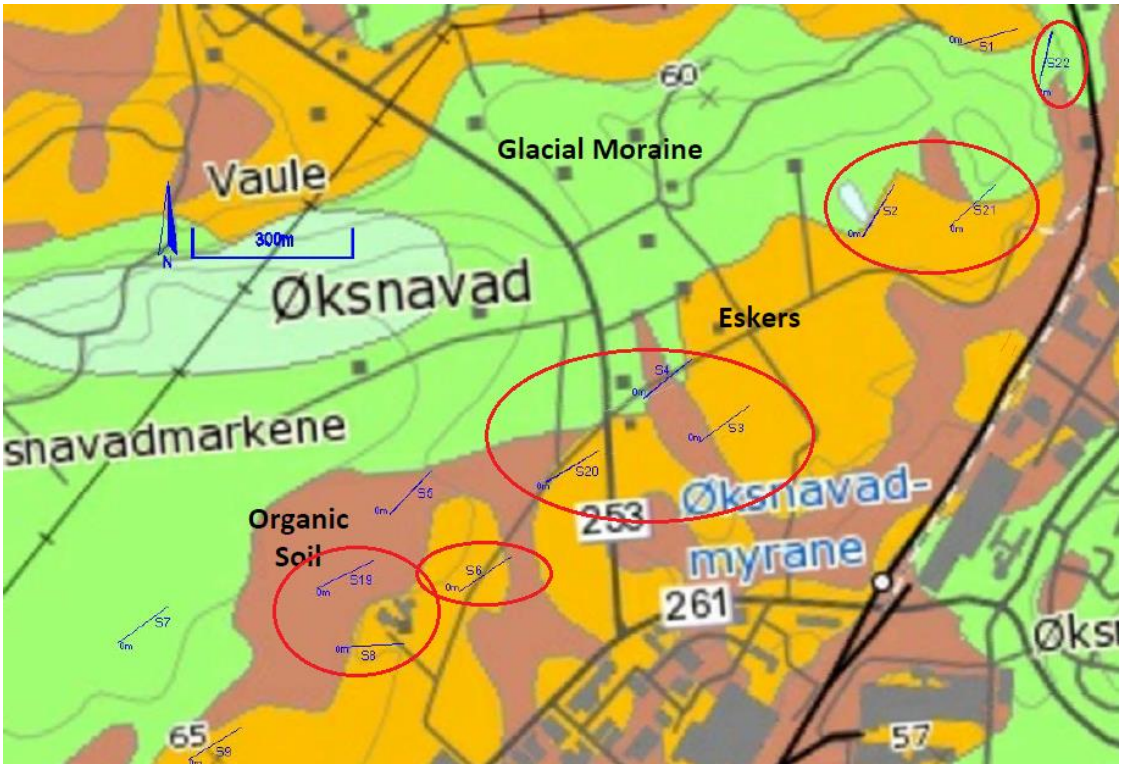
Mellom N og O: Fjellbrønn nr. 4: 9 m. 400m fra Bryne stasjon (ngu.no)

Mellom O og P: Fjellbrønn nr. 5: 16,5 m til fast fjell. 150 m sør for Bryne stasjon. (ngu.no)

Det er viktig å avklare usikkerheten ved Diagram 2, da fjelloverdekningen kan ha stor konsekvens for drivemetodevalg. Dersom linja til fjelloverdekningen ligger lenger nede i profilet, kan det føre til store kostnadsoverskridelser dersom tunnelen skulle vært drevet konvensjonelt. Usikkerheten med tegningen er stedvis høy. For eksempel har fjellbrønner fra NGU høyere sikkerhet enn i området A til F og J til M, som er basert på cirka tall fra silingsrapporten til Bane NOR.

5.3 Oppsprekking

«Datarapport Geofysiske grunnundersøkelser Multiconsult 2015: Sandnes – Nærbø dobbeltspor» (Multiconsult, 2015), har målt til ca. 40 meters dyp, og punktene med rød ring rundt i Figur 5.1 har en P-bølgehastighet mellom 1700-3000 m/s på det dypeste. Det kan bety at det er store mengder løsmasser i området og mulighet for forvitret og/eller oppsprukket bergmasse som lav hastighet kan tilsi.



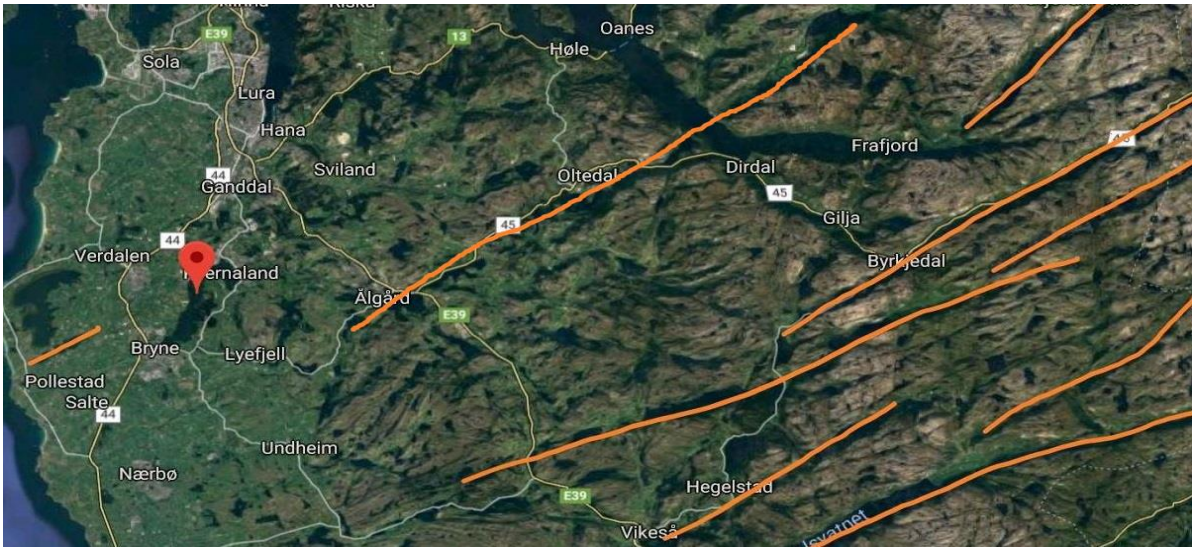
Figur 5.1: Punktene med rød ring har en P-bølgehastighet på 1700-3000 m/s ned til 40 m dyp (Multiconsult, 2015).

I NGUs grunnvannsdatabase er det en fjellbrønnsrapport rett ved Bryne stasjon som beskriver brønnlagene. Bergoverdekningen begynner etter 16 m fra overflaten, og rapporten informerer om innhold av mye vann og mørkt støv til 30 meters dybde. Fra 105 til 165 meters dybde beskrives fjellet som dårlig og porøst, og at boret kiler seg. Fra 165-200 m er det godt fast fjell. Bergart er ikke nevnt i fjellbrønnsrapporten.

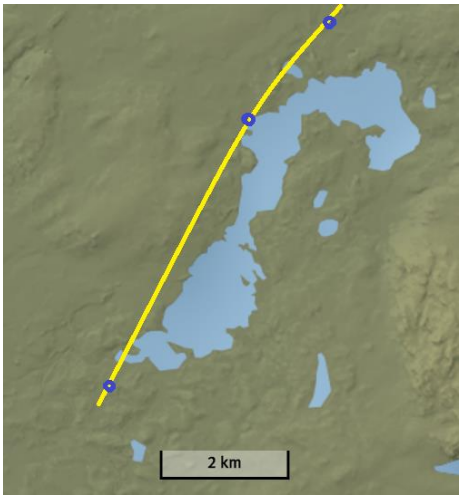
Rapporter og fjellbrønner beskriver bergmassen fast fjell på strekningen mellom Klepp og Bryne stasjon, med en P-bølgehastighet på 5000-6000 m/s.

5.4 Svakhetssoner

Geomorfologiske lineamenter avspeiler i de fleste tilfeller overflatesporene til svakhetssoner i berggrunnen slik som bruddsoner, sprekkesoner eller forkastningssoner (Statens Vegvesen B, 2016). De viktigste lineamentsretningene tolket fra Figur 5.2 i området er SV-NØ og noen mindre NNØ. Det regionale svakhetsmønsteret gir en indikasjon på det dominerende retningene for svakhetssonene i området, som kan krysse tunneltraseen en eller flere ganger.



Figur 5.2: Skjermdump fra www.maps.google.com: Ved å se på området fra større avstand går svakhetssonene SV-NØ. Rødt merke er Frøylandsvatnet.



Figur 5.3: Skjermbilde fra norgeskart.no: Det er ingen klare svakhetssoner nært tunneltraseen (gul strek), da området er dekket av større mengder løsmasser og dyrket mark.

Grunnet store mengder løsmasser over berget i området er det vanskelig å si hvor svakhetssonene langs tunneltraseen går. Området er dekket av dyrket mark og tettbygget strøk, som gjør det vanskelig å anta. Ingen svakhetssoner langs og på tvers av traseen kommer frem på grunn av løsmassetykkelsen, se Figur 5.3. Refraksjonsseismikk fra Datarapport «Geofysiske grunnundersøkelser» viser generelt lav hastighet i bergmassene i området nord-vest for Øksnevadporten. Undersøkelsen viser hardt berg med hastighet 5000-6000 m/s i området sør for Klepp. Det reduserer sannsynligheten for en eventuell svakhetssone parallelt med traseen fra Øksnevadporten til Klepp stasjon. Undersøkelser langs og på begge sider av tunneltraseen kan gi mer bestemte resultater.

En hypotese kan være at langsiden av Frøylandsvatnet er en retning for andre svakhetssoner, gitt at Frøylandsvatnet ligger i en svakhetssone, men det er uklart. Dersom Frøylandsvantet er dannet i en lav seismisk sone, kan det også være svakhetssoner som finnes parallelt. Fra kartet har Orrelandsvatnet noe samme lengderetning som Frøylandsvatnet. Som sagt er dette en hypotese, og mest sannsynlig går svakhetssonene i SV-NØ og noe i NNØ som man ser tydeligere når man zoomer ut fra Frøylandsvatnet på Figur 5.2.

5.5 Bergspenning

Det foreligger ikke resultater fra bergspenningsmålinger fra området. Bergmasseoverdekningen for tunnelen er etter refraksjonsseismiske undersøkelser antatt god i området sør for Klepp på Figur 4.2 med hardt berg og videre sør mot Bryne.

I områdene ved Øksnevadporten og Klepp stasjon tyder resultatene fra utført refraksjonsseismikk på redusert overdekning og dårlige bergmasser. Hvor det er redusert overdekning er bergmassen dårlig innspent og det må påregnes forbolting, sprøytebetong og eventuelt armerte sprøytebetongbuer. Ved Øksnevadporten er det målt en gjennomsnittstykkelse på løsmassene på 20,9 m før bergoverdekningen. Det er få tilgjengelig borredata ved Bryne stasjon. En fjellboringsrapport fra NGU informerer om støv og vann i brønnen ved Bryne stasjon.

Horisontal tektoniske spenninger er kjent i Norge, og kan være gunstig for stabiliteten til studiets tunnel.

5.6 Grunnvann og lekkasjer

Store vannlekkasjer kan forekomme dersom tunnelen skulle påtreffe karstkanaler i marmor-/kalkstein. I følge NGUs kart er det et område med kalkstein og kalkspatmarmor nord for Bryne stasjon. Refraksjonsseismikk i dette område kan avdekke forholdene her. Ellers forventes lokalt enkelte moderate vannlekkasjer i forbindelse med kanaldannelse langs sprekker i forbindelse med sprekkesoner eller knusningssoner. Siden det ikke er utført målinger av Q-verdi eller funnet noen sprekke- eller knusningssoner er dette svært usikkert. Grunnvannstanden er ikke kjent i detalj, men antas å ligge 2-5 m under terreng (Bane NOR A, 2016, s. 12). En tunnel gjennom bergmassen kan skape endringer i grunnvannstanden, da grunnvannet kan lekke inn i tunnelen. Det er mulig å tette sprekker som fører vann inn i tunnelen med injeksjon, men risikoen for endringer vil fremdeles være der.

NGU sin brønndatabase viser at det er få grunnvannsbrønner i området. Grunnvannsbrønnene antas å være fjellbrønner som forsyner enkelthus. Det kan bety at berget i området er permeabelt dersom det brukes som vannforsyning. Store deler av arealet over tunneltraseen består av dyrket mark. Det er også myr og vann i nærheten av traseen, som er sårbare ved grunnvannsendringer. En forutsetning for et vellykket tunnelprosjekt er at det ikke forårsaker endringer i grunnvannstand som utsetter vegetasjon for uønskede konsekvenser (Palmstrøm & Norconsult, 2003). Videre forventes det langt større uønskede konsekvenser for de sårbare områdene arealmessig ved et daginngrep. Et alternativ kan være en vann- og frostsikring med fullt hydrostatisk trykk, som fører til at tunnelen er tett og at grunnvannet ikke synker. Dette er forutsatt at tunnelen drives med TBM.

5.7 Sikring og injeksjon

En vurdering av omfang av bergsikring og injeksjon er basert på bergkvalitet og mulige svakhetssoner som krysser tunneltraseen (Statens Vegvesen B, 2016). Siden det ikke er utført målinger av Q-verdi eller funnet noen svakhetssoner er prognosering av bergmasse og dimensjonering av sikring i tunnelen svært usikkert.

Tabell 11 og 12 er derfor kun ment som en rettledning og et hjelpemiddel, endelig sikring- og injeksjonsomfang må bestemmes på stedet under driving (Statens Vegvesen C, 2016).

Tabell 11:Typiske bergmasser i de ulike bergkvaliteter og antatt fordeling (Statkraft, 2008).

BERGKLASSER	ANTATT FORDELING	TYPISKE BERGMASSER
1. God til meget god	80 – 90 %	Bergarter med liten til moderat oppsprekking
2. Middels til noe dårlig	5 – 10 %	Moderat oppsprukne bergmasser. Inkluderer også sprekksoner uten leire
3. Dårlig	0	Sterkt oppsprukne bergmasser, ofte med tynne leirfyllinger (som i enkelte moderate svakhetssoner)
4. Meget dårlig	5 – 10 %	Oppknuste bergmasser med eller uten leire, som i enkelte moderate leirsoner og i store komplekse knusningssoner

Antatt fordeling er bestemt i samarbeid med veileder og er basert på geologisk informasjon fra Kapittel 4 og vurderinger i Kapittel 5. Tabell 12 viser sikringsomfanget i de fire bergklassene.

Tabell 12: Gjennomsnittlig sikring i de fire bergklassene (Statkraft, 2008).

BERGKLASSE	GJENNOMSNITTLIG SIKRING I DE ULIKE BERGKLASSENE			
	Bolter	Fiberarmert sprøytebetong	Sprøytebetong-ribber	Andre sikringstiltak
1. God til meget god	Spredt bolting / Få bolter i hengen	8 cm tykk i hengen	-	-
2. Middels til noe dårlig	2,5 x 2,5 m bolting i hengen	8 cm tykk i heng og stedvis i vegger	-	-
3. Dårlig	2 x 2 m bolting i heng og vegger	8-12 cm tykk i heng og vegger	-	-
4. Meget dårlig *	Stedvis forbolting. 1,5 x 1,5 m bolting i heng og vegger	15 cm i heng og vegger, også på stuffen	Stedvis 1,5 – 2,5 m ribbe-avstand (+ bolter)	Stedvis sålestøpt, event. betong-utstpøing
* Driving med redusert salvelengde				

5.8 Skredfare

Det er ingen typer skredfarer eller registrert tidligere skredhendelser i området ifølge skredkart fra Norges vassdrags- og energidirektorat. Dette er naturlig ettersom terrenget er relativt flatt, uten forekomster av kvikkleire.

6. Prisliste for sikring

6.1 Bolter og forinjeksjon

I kilden til Tabell 13 og 14, er tabellene basert på fire tunnelprosjekter som er bygget i nyere tid i Norge. Tunnelprofilene fra prosjektene er T9,5 profil. Prisene som er presentert i Tabell 13 gjelder tetting og stabilisering ved forinjeksjon. Tallene som er valgt gjelder standard sement, med pakninger plassert 5-10 meter inn i borhullene, som vanligvis gjøres når bergkvaliteten er dårlig (Tveten, 2016). Tabell 14 viser en gjennomsnittlig kostnad for bolter fra de fire prosjektene.

Tabell 13: Forinjeksjon; pakning 5-10 m inn, standard injeksjonsmasse (Tveten, 2016).

Prosjekt	**Boring NOK/m**	**Pakning NOK/stk**	**Rigging NOK/stk**	**Materiale NOK/kg**	**Arbeid NOK/time**
1	16,19	227,21	2908,00	0,53	2443,50
2	17,32	547,72	2163,45	0,53	1980,34
3	38,79	1226,88	2423,06	0,53	1523,60
4	57,31	536,44	-	0,93	5414,76
Gjennomsnitt	32,40	634,56	2498,17	0,63	2480,55
Pris for en injeksjonsrunde	20 412 NOK	22 209,6 NOK	2498,17 NOK	55 125 NOK	48 232,92 NOK

Summert utgjør prisen for en injeksjonsrunde 148 000 NOK. I kilden er det antatt 12 m driving før neste injeksjonsrunde. Prisen for forinjeksjon ender på 12 400 NOK/m for et T9,5 tunnelprofil.

Tabell 14: Stykkpris for forbolter (Tveten, 2016).

Prosjekt	**Ø 25 [NOK/bolt]**	**Ø 32 [NOK/bolt]**
1	1306,36	1875,06
2	470,82	626,44
3	517,41	672,81
4	717,65	1125,18
Gjennomsnitt	**753,06**	**1074,87**

Sannsynligheten for å treffe på et vannførende system i bergmassen er økende med tverrsnittsstørrelsen. I dette studiet er det antatt at økende tverrsnitt lineært fører til økende forinjeksjonsbehov, men i praksis kan økningen være høyere.

Sprøytebetong koster fra ca. 1000 kr per m^3 til 2500 kr per m^3, avhengig av egenskaper og fiber (Drevland, 2018). Som utgangspunkt i oppgaven er det antatt til 1500 kr per m^3.

I følge Norsk Forening for fjellsprengningsteknikk reduseres sikringsomfanget kraftig i en boret berg-tunnel i forhold til en sprengt tunnel. Erfaringstall fra norske utbygginger viser en reduksjon av sikringsmidler på 40-90 % i forhold til konvensjonell driving (NFF, 2015, s. 17).

6.2 Kostnad for vann- og frostsikring

Tabell 15 er en oversikt over priser til ulike vann- og frostsikringsløsninger. Den er hentet fra forfatterens prosjektoppgave, høst 2017. Prosjektoppgaven presenterte fire ulike vann- og frostsikringsløsninger brukt i norske tunneler. Løsningenes funksjoner, kostnad og monteringstid ble studert i oppgaven, og prisene er basert på anbudspriser fra ulike prosjekt (Klausen, 2017). Tabell 15 beskriver kledningstypenes kostnad per kvadratmeter.

Tabell 15: Priser for vann- og frostsikringsløsninger (Klausen, 2017).

Kledningstype	Kostnad NOK/m^2
Betongelementer for TBM / Element på berg	1400-2000
Sprøytebetong i kombinasjon med sprøytbar vanntettningsmembran	700-1100
Hvelv av betongelementer i kombinasjon med PE-skum og sprøytebetong	1400-1800
Full utstøping med membran / helstøpt tunnelhvelv	1400- 2200

7. Tunnelkonsept

I dette kapittelet vurderes ulike tunnelkonsept. Kravene for jernbanetunneler bestemmes av byggherre, Bane NOR, som er Norges statlige foretak med ansvar for den nasjonale jernbanestrukturen i landet. Bane NOR har ansvar for blant annet å planlegge, utbygge, forvalte, drifte og vedlikeholde det nasjonale jernbanenettet i Norge (Bane NOR C, 2016). Grunnlag for valg av tunnelkonsept gjøres på bakgrunn av følgende kriterier:

- Dimensjonerende trafikk (behov for sporveksler og effektivt vedlikehold)
- Lengden på tunnelen og tverrtunneler
- Beliggenhet, grunnforhold og påvirkning fra omgivelsene
- Sikkerhet
- Økonomi
- Byggetid
- Vibrasjon og støy
- Koordinering med tilstøtende prosjekter
- Eksisterende-/ sensitive-/ underjordiske tunneler og anlegg

(Jernbaneverket A, 2015)

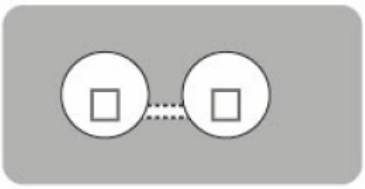
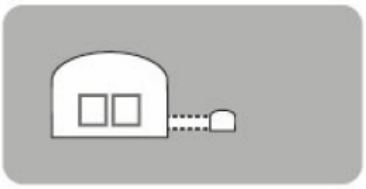
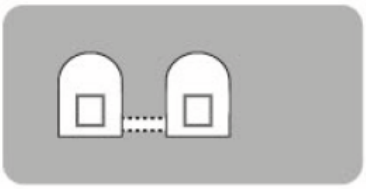
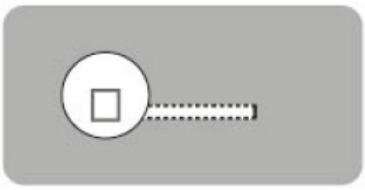
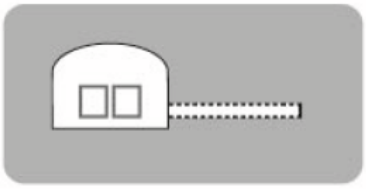
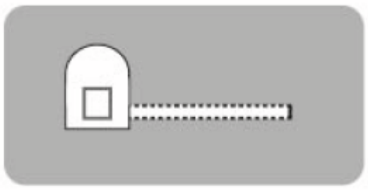
Følgende tunnelløp benyttes for jernbaner i Norge:

- *En stor dobbeltsporet tunnel med rømningsveier til det fri eller annen sikkerhet sted minimum hver 1000 m.*
- *En stor dobbeltsporet tunnel med parallell service- og arbeidstunnel med tverrforbindelse for rømning for minimum hver 1000 m.*
- *To separate enkeltspors tunnel med tverrforbindelse mellom disse hver 500 m.*

(Jernbaneverket A, 2015)

Bane NOR anbefaler dobbeltspors- eller enkeltspors tunnel for tunneler med lengde 5-15 km. Tabell 16 viser prinsipielle løsninger for tunnelkonsepter.

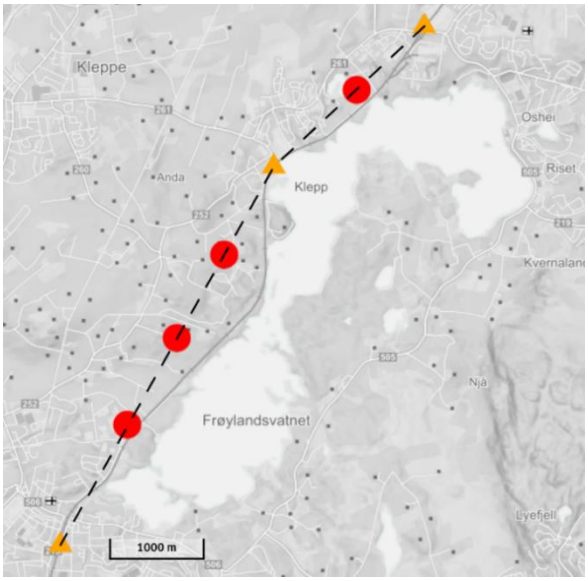
Tabell 16: Prinsipielle løsninger for tunnelkonsepter (Jernbaneverket A, 2015, s. 57)

TBM driving - Enkelspors tunnel	Konvensjonell driving - Dobbeltspors tunnel	Konvensjonell driving - Enkeltspors tunnel
 To løp - enkeltsporet tunnel – TBM.	 Ett løp – dobbeltsporet tunnel m/ vedlikeholds tunnel.	 To løp - enkeltspors tunneler.
 Ett løp - enkeltsporet tunnel – TBM.	 Ett løp – dobbeltsporet tunnel.	 Ett løp – enkeltspors tunnel.

De aktuelle løsningene for mulighetsstudiet er ett løp – dobbeltsporet tunnel med adkomsttunnel hver 1000 meter eller en service- og arbeidstunnel parallelt med en hovedtunnel, eller to løp – enkeltsporet tunnel, drevet konvensjonelt eller med TBM.

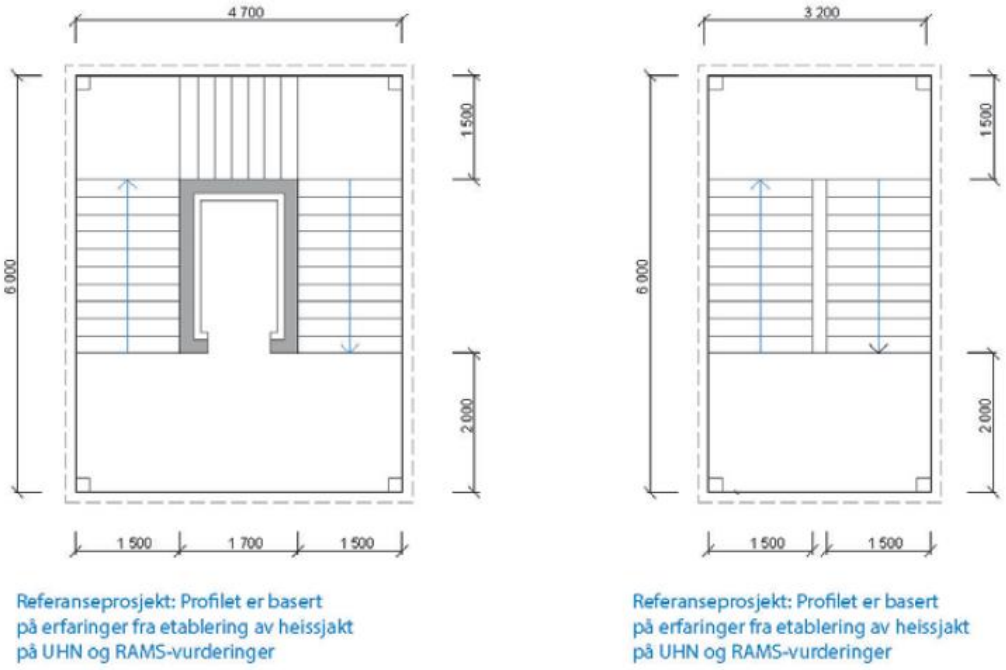
7.1 Ett løp – Dobbeltsporet tunnel

Ved ett løp – dobbeltsporet tunnel må det bygges en service- og arbeidstunnel parallelt med traseen, med tverrforbindelse hver 1000 meter. Service- og arbeidstunnelen fungerer som rømningsvei og en del tekniske installasjoner kan plasseres her uten å berøre trafikken.



Figur 6.1: Skjermbilde fra norgeskart.no: Røde prikker indikerer evakueringssjakter og skal plasseres hver 1000 meter langs tunneltraseen.

Det andre alternativet ved dette konseptet er å bygge adkomsttunnel til ut i dagen hver 1000 meter. På Figur 6.1 viser adkomsttunnel ca. hver 1000 meter for tunneltraseen i mulighetsstudiet. En utfordring med adkomsttunnel ut i dagen i et flatt landskap kan være universell utforming. Adkomsttunnelen vil sannsynlig bevege seg mer eller mindre 90 grader opp til overflaten. Det vil også føre til inngrep i området over evakueringssjaktene. Figur 6.2 viser et forslag til tverrsnitt for evakueringssjakter.



Figur 6.2: Forslag til tverrsnitt for evakueringssjakter (Jernbaneverket A, 2015).

Ett løp – dobbeltspors tunnel vil gi et mindre totaltverrsnitt som reduserer drivekostnaden sammenlignet med to enkeltløp. Det er også gunstig med stort løp ved brann, men ulempe med stor avstand mellom rømningsveiene. I store tunnelløp er det større sjanse for ulykker under bygging av tunnel, og større fare for kollisjon med motgående tog eller avsporing enn to mindre enkeltløp. All trafikk i begge retninger må stoppes ved feilretting, vedlikehold og inspeksjon (Byggeindustrien, 2018) (Jernbaneverket A, 2015).

7.2 To løp – enkeltsporet tunnel

Ved to løp – enkeltspors tunnel må det være tverrforbindelse hver 500 meter mellom de to parallelle tunnelene. På den måten utnyttes begge løpene både for trafikk og som rømningsvei (Jernbaneverket A, 2015). Konseptet krever større totaltverrsnitt som trekker opp drivekostnaden sammenlignet med et løp.

Ved to løps tunnel kan vedlikeholdsarbeid utføres i det ene løpet, mens trafikken i andre løp kan gå som normalt. Det er ingen fare for kollisjon med tog i motgående spor.

Topografiske forhold og mulige angrepspunkter for driving av tunnelen vil ha betydning for valg av konsept (Bane NOR D, 2017). Tradisjonelt blir det mest tatt hensyn til kostnader ved investeringen når kostnadsbildet skal vurderes, og drivekostnaden er avgjørende for valg av konsept. Ved å se på langtidskostnader og oppetid kan det likevel lønne seg å velge en dyrere løsning (Nordisk Vegteknisk Forbund, 2008).

8. Kostnad og inndrift for drivemetode og tunnelkonsept

Kapittelet presenterer kostnad for driving, bergsikring og vann- og frostsikring, samt inndrift for tre måter tunnelen kan bygges på:

- Ett løp dobbeltsporet tunnel – konvensjonell drift
- To løp enkeltsporet tunnel – konvensjonell drift
- To løp enkeltsporet tunnel – fullprofilboring

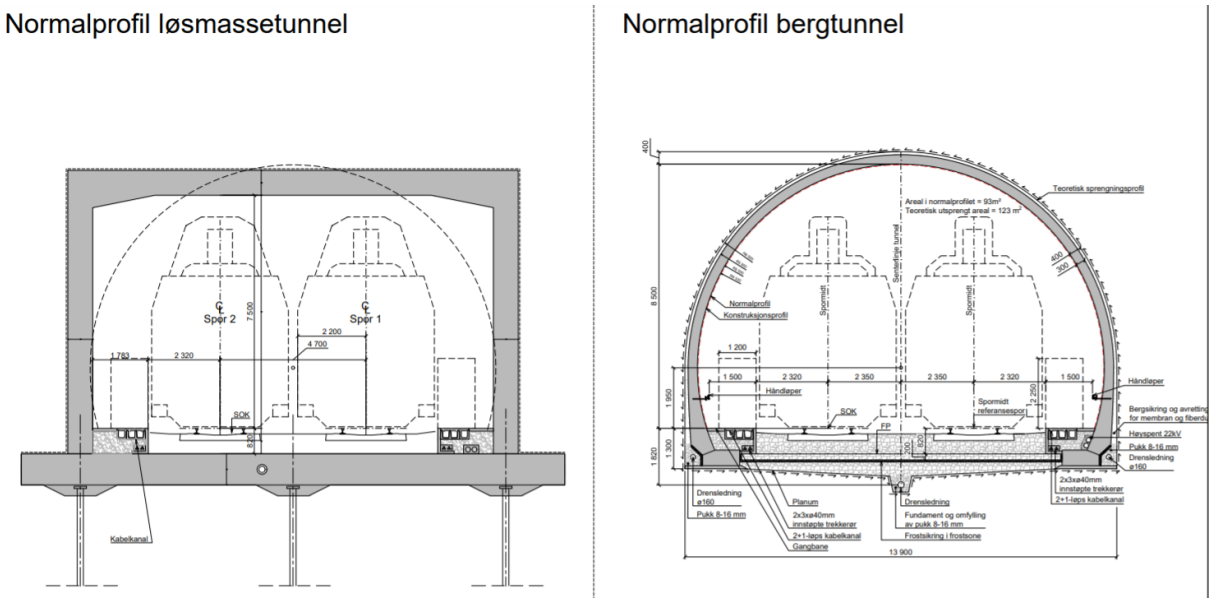
Programmet «Tunsim» er benyttet for utregning av drivekostnader og byggetid for konvensjonell drift. Drivekostnader innebefatter boring, sprenging, ventilasjon, lasting, transport og rensk. Programmet er utviklet av NTNU, og er basert på erfaringstall. Prognosene kommer fra Report 2-05 DRILL AND BLAST TUNNELLING, utarbeidet ved NTNU i 2006 som en del av doktorgradsavhandlingen til Shokrollah Zare. Eksempel på brukt data input i Tunsim for utregning av kostnad og inndrift finnes i Vedlegg 2.

Programmet «Anleggsdata Fullprof» er benyttet for utregning av drivekostnader og byggetid for fullprofilboring i hardt berg. Programmet er utviklet av Anleggsdata AS i samarbeid med Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU (NTNU, u.d.).

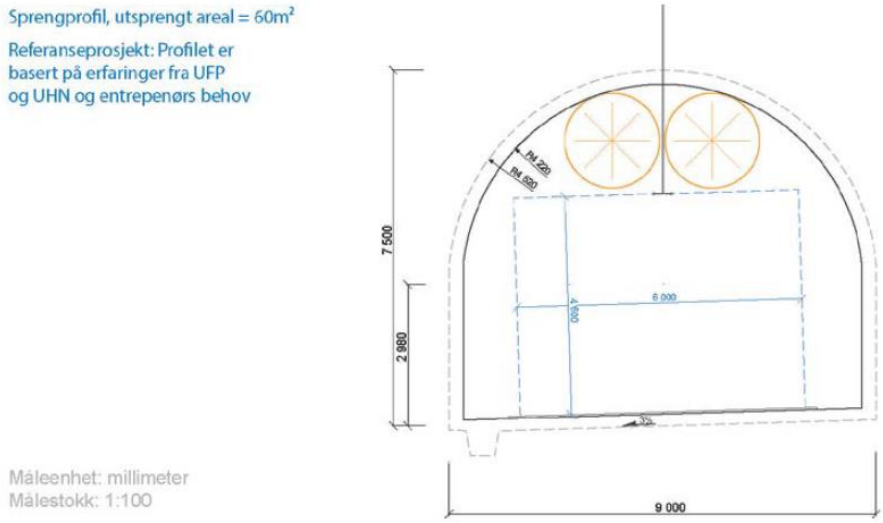
Drivekostnadene fra beregningsverktøyet «Tunsim» og «Anleggsdata Fullprof» ekskluderer sikringskostnader. Sikringskostnadene beregnet ut ifra bergklasse og gjennomsnittlig sikring i Tabell 11 og 12. Kostnader for forinjeksjon og bolting finnes i Tabell 13 og 14. Sprøytebetongbuer og andre sikkerhetstiltak for større geologiske utfordringer er ikke tatt med i mulighetsstudiet. Kostnader for vann- og frostsikring er hentet fra Tabell 15. Nødvendig forinjeksjon, bolter og sprøytebetong, samt utregning av sikringskostnadene finnes i Vedlegg 3 for alle tunnelprofil.

8.1 Ett løp dobbeltsporet tunnel – konvensjonell drift

Valgt tunneltverrsnitt for ett løp – dobbeltsporet tunnel er på 123 m^2, med en arbeids- og servicetunnel på 60 m^2. Valgene er basert på det dagsaktuelle prosjektet Ringeriksbanen, som Figur 7.1 og 7.2 er hentet fra (Bane NOR E, 2016).



Figur 7.1: Venstre: Forslag til løsmassetunnel.
Høyre: Tunnelprofilet er brukt som utgangspunkt i mulighetsstudiet (Bane NOR E, 2016). Profilet er 123 m^2 og er dimensjonert for tog som går 200-250 km/h.



Figur 7.2: Tverrsnitt for arbeids- og servicetunnel, som er brukt i mulighetsstudiet. Profilet er 60 m^2. (Jernbaneverket A, 2015, s. 74).

Drivekostnader og inndrift for hovedtunnel med et tverrsnitt på 123 m^2 og arbeids- og servicetunnel på 60 m^2 vises i Tabell 17.

Tabell 17: Fra Tunsim: Drivekostnader og inndrift for dobbeltspor tunnel 123m^2 og arbeids- og servicetunnel på 60m^2.

	Drivekostnad	***Inndrift***
Dobbeltspor tunnel 123 m^2	35 296 NOK/m	55 m/uke
Arbeids- og servicetunnel 60 m^2	21 366 NOK/m	94 m/uke
Total	**56 661 NOK/m**	

Totale kostnader for hovedtunnel og arbeids- og servicetunnel vises i Tabell 18. Vann- og frostsikringsløsningen for dette konseptet er valgt til betongelementer. I service- og arbeidstunnelen er VoF sett bort i fra. Lokale lekkasjer i arbeids- og servicetunnelen kan håndteres ved å bli drenert ned i drenssåle.

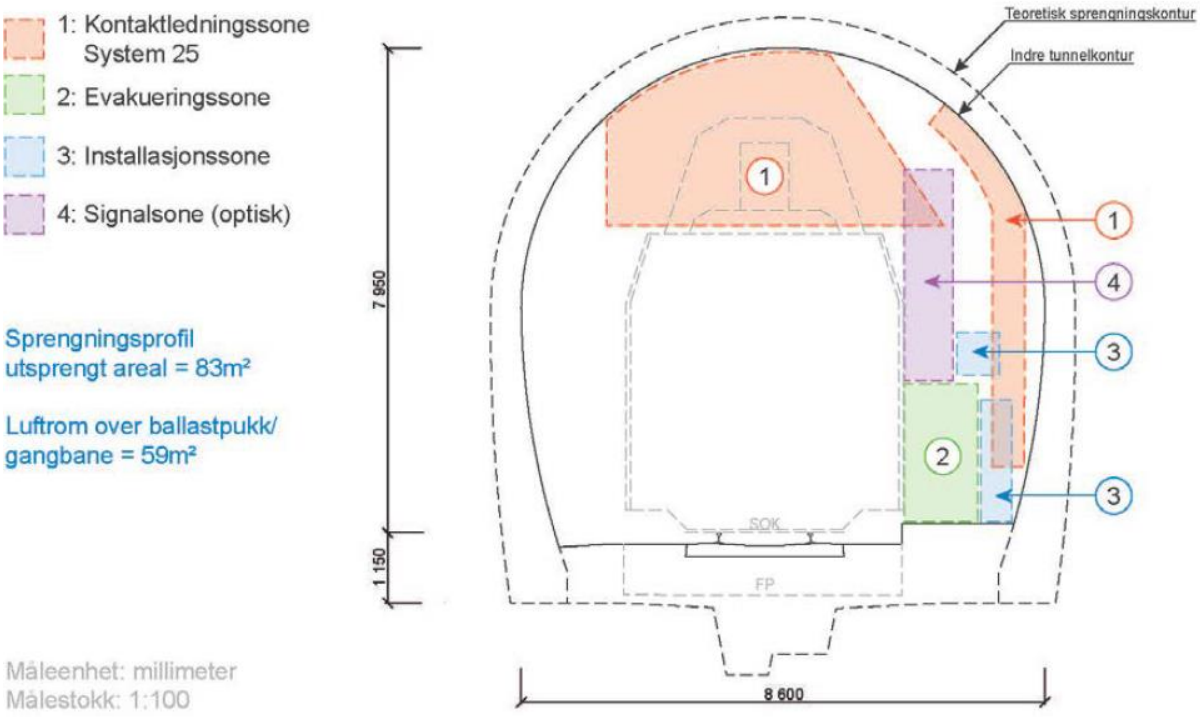
Tabell 18: Total kostnad for tunnelløpene.

	Hovedtunnel [NOK/m]	***Service- og arbeidstunnel [NOK/m]***	***Hovedtunnel [NOK]***	***Service- og arbeidstunnel [NOK]***	***Totalkostnad [NOK]***
Drivekostnad	35 296	21 366	240 365 760	145 502 460	385 868 220
Forinjeksjon	22 844	11 143	141 175 920	68 863 740	210 039 660
Bolter	2982	1425	20 310 141	9 707 225	30 017 366
Sprøytebetong	2269	1624	15 451 800	11 058 624	26 510 424
Vann- og frostsikring	1700	-	301 002 000	-	301 002 000
Total kostnad					**953 437 670**

Totalkostnaden for driving og sikring av tunnelløsningen med konvensjonell drift er beregnet til 953 437 670 kr, eller 140 006 kr/m. For hovedtunnelen er det estimert en inndrift på 55 m/uke med et eget tunnellag uten vekseldrift. Ved vekseldrift mellom hovedtunnel og arbeids- og servicetunnel kan kostnadene reduseres og inndriften gå noe ned.

8.2 To løps enkeltspor – konvensjonell drift

I mulighetsstudiet er profilet for to løps – enkeltsporet tunnel valgt til 83 m^2. Figur 7.3 er en skisse av profilet, som er hentet fra Teknisk Designbasis for Intercity av Jernbaneverket 2015 (Jernbaneverket A, 2015).



Figur 7.3: Tverrsnitt i enkeltsporstunnel med konvensjonell driving (Jernbaneverket A, 2015, s. 72). Figuren er beregnet til vann- og frostsikringsløsningen membranduk.

Tabell 19 viser drivekostnad og inndrift til to tunnelløp med et tverrsnitt på 83 m^2.

Tabell 19: Fra Tunsim: Drivekostnad og inndrift for to tunnelløp på 83 m^2.

	Kostnad	***Inndrift***
Enkeltspor 83 m^2	35 898 NOK/m	71 m/uke
Enkeltspor 83 m^2	35 898 NOK/m	71 m/uke
Total	71 796 NOK/m	

Totale kostnader for to tunnelløp vises i Tabell 20. Valgt vann- og frostsikringsløsning for dette konseptet er sprøytebetong i kombinasjon med sprøytbar vanntettingsmembran. Ved bruk av denne vann- og frostsikringsløsningen kan det være nødvendig med økt forinjeksjon, da løsningen er avhengig av tørrere tunnelvegger enn andre vann- og frostsikringsløsninger. Kostnad for forinjeksjon kan derfor forventes å være høyere. Totale kostnader for tunnelløpene blir som følger i Tabell 20.

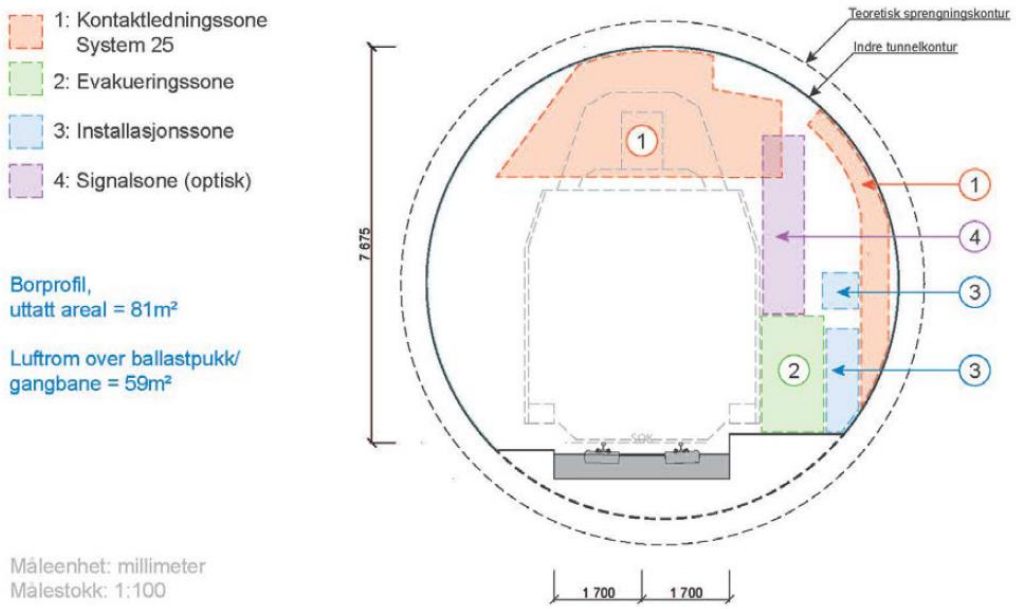
Tabell 20: Total kostnad for to tunnelløp på 83 m^2.

	To løp NOK/m	***Totalkostnad NOK***
Drivekostnad	71 796	488 930 760
Forinjeksjon	30 830	209 954 692
Bolter	4236	28 851 451
Sprøytebetong	3540	24 110 450
Vann- og frostssikring	2 × 900	269 676 000
Totalkostnad NOK		**1 021 523 353**

Totalkostnaden for driving og sikring av tunnelløsningen med konvensjonell drift er beregnet til 1 021 523 353 kr, eller 150 003 kr/m. Det er estimert en inndrift på 71 m/uke dersom tunnelløpene drives av hver sitt tunnellag uten vekseldrift. Ved vekseldrift mellom de to løpene kan kostnadene reduseres og inndriften gå saktere.

8.3 To løps enkeltspor – fullprofilboring

I mulighetsstudiet er profilet for to løps enkeltspor med TBM satt til 81 m^2. Figur 7.4 er en skisse av profilet, som er hentet fra Teknisk Designbasis for Intercity av Jernbaneverket 2015 (Jernbaneverket A, 2015).



Figur 7.4: Tverrsnitt i enkeltsporstunnel drevet med TBM (Jernbaneverket A, 2015, s. 74). Tunnelen vann- og frostsikres med betongelementer.

Tabell 21 viser drivekostnad og inndrift med TBM til to tunnelløp med et tverrsnitt på 81m^2.

Tabell 21: Fra «Anleggsdata Fullprof»: Drivekostnad og inndrift med TBM for to tunnelløp på 81 m^2.

	Kostnad	***Inndrift***
Enkeltspor 81 m^2	36 101 NOK/m	70 m/uke
Enkeltspor 81 m^2	36 101 NOK/m	70 m/uke
Total	72 202 NOK/m	

Totale kostnader for tunnelløpene blir som følge i Tabell 22. Vann- og frostsikringsløsning for dette tunnelkonseptet er valgt til «Element på berg». Løsningen er en tett løsning og vann i berg trenger ikke inn i tunnelen. Bergsikring er inkludert i løsningen, og forinjeksjon kan reduseres dersom det er lav overdekning, og dermed lite trykk. Det må forinjiseres mer dersom det oppstår lokale soner med store vannlekkasjer.

Tabell 22: Total kostnad for to tunnelløp på 81 m^2.

	To løp NOK/m	***Totalkostnad NOK***
Drivekostnad	72 202	491 695 620
Forinjeksjon 40-90% i forhold til to løps enkeltspor – konvensjonell drift	3083 – 18498	73 483 305
Sikring (bergsikring og vann- og frostsikring)	2 × 1700	738 149 520
Total kostnad		1 303 328 445

Totalkostnaden for driving og sikring av tunnelløsningen med konvensjonell drift er beregnet til 1 303 328 445 kr, eller 191 384 kr/m. Inndrift er estimert til 70 m/uke dersom tunnelløpene drives av to maskiner.

8.4 Resultat

Kostnadsresultatene er samlet i Tabell 23. Ett løp dobbeltsporet tunnel, drevet konvensjonelt har en kostnad på 953 437 670 NOK, som er den rimeligste måten å bygge tunnelen i studiet på. To løp enkeltsporet tunnel, drevet konvensjonelt er en 6,7 % dyrere løsning, mens to enkle løp fullprofilboret er en 26,8% mer kostbar løsning sammenlignet med den rimeligste løsningen.

Tabell 23: Kostnad for ulike løsninger

Konsept og drivemetode	***Kostnad***
Ett løp dobbeltsporet tunnel – konvensjonell drift	953 437 670 NOK
To løp enkeltsporet tunnel – konvensjonell drift	1 021 523 353 NOK
To løp enkeltsporet tunnel – fullprofilboring	1 303 328 445 NOK

Resultatene fra de ulike løsningenes inndrift er samlet i Tabell 24. To enkle løp, drevet konvensjonelt er estimert til å ha kortest inndrift på 71 m/uken dersom de drives av to uavhengige tunnellag. Totalt vil det ta 95,9 uker å drive ferdig tunnelen med denne løsningen. For to enkle løp, fullprofilboret, vil det ta 97,3 uker å drive tunnelen med to TBM, mens for ett dobbelt løp drevet konvensjonelt vil det ta 123,8 uker.

Tabell 24: Inndrift for ulike løsninger

Konsept og drivemetode	***Inndrift***
Ett løp dobbeltsporet tunnel – konvensjonell drift	55 m/uke
To løp enkeltsporet tunnel – konvensjonell drift	71 m/uke
To løp enkeltsporet tunnel – fullprofilboring	70 m/uke

9. Diskusjon

9.1 Drivemetode og designløsning ut ifra geologiske forhold

Det er mange avveininger for å bestemme riktig drivemetode. Hva som er den mest passende drivemetoden er ikke gitt, ettersom ulike parametere og forhold er varierende for hvert enkelt prosjekt, og påvirker byggekostnadene og byggetiden. Geologisk informasjon kommer også underveis i et prosjekt, etter hvert som geologiske forundersøkelser utføres under driving.

I Vedlegg 4 finnes det en oversikt ulike forhold som spiller inn ved bestemmelse av drivemetode, og hvilke forhold som er tatt hensyn til i dette mulighetsstudiet. Oversikten er basert på «D&B versus TBM: Review of the parameters for a right choice of the excavation method» (Macias & Bruland, 2014).

Oppgavens ingeniørgeologiske perspektiv er i hovedsak basert på tidligere ingeniørgeologiske rapporter og kart fra NGU som beskriver forventet geologi i området og nært tunneltraseen. Grunnundersøkelser som ligger til grunn for oppgaven er mangelfull sammenlignet med en geologisk undersøkelse for detaljprosjektering. Usikkerheten kan være avgjørende for både høydeprofil til tunneltrasé, drivemetode og utforming av stasjoner (fjellhaller eller betongkonstruksjoner).

Geologiske usikkerheter som fjelloverdekning og bergmassekvalitet på steder hvor overdekningen er liten er avgjørende for om tunnelen bør drives med fullprofilboring eller boring og sprenging. Den er også avgjørende for utforming av stasjoner på Øksnevad, Klepp og Bryne.

TBM har fordeler ved sensitive miljøer, lav og manglende fjelloverdekning og ved bergarter som ikke gir for høy kutterslitasje. Geologiske forhold må være godt kjent når foreslått løsninger er TBM. Fullprofilboring minsker risikoen for setningsskader på grunn av senkning av grunnvann i driveperioden. Derimot er konvensjonell driving en mer fleksibel drivemetode ved uforutsette utfordringer som ras, mektige svakhetssoner og store uventede vanninnlekkasjer (Jernbaneverket A, 2015).

Fra Kapittel 5 vurderes terrenget i området til å være relativt flatt med lite varierende topografi, og bergmassene antas å være relativt homogene. Bergartene i området har et kvartsinnhold på ca. 25 %, og en middels kutterlevetidindeks (CLI) på 7,9. Harde bergarter med mye kvartsinnhold reduserer kutterlevetiden til TBM-en, som gjør at kutterne må skiftes. Det er kostbart og tidskrevende. For konvensjonell driving er store deler av funnet bergarter i området mest sannsynlig er stabile for boring og sprenging.

Konvensjonell driving

Det ventes store mengder løsmasser og mulighet for forvitrede og/eller oppsprukne bergmasser før og ved Øksnevadporten. På grunn av mektige løsmasser over fast fjell kan tunneler nord for Øksnevad etableres som cut and cover før traseen når fast fjell. Dette innebærer utgraving for tunnel, etablering av en tunnelkonstruksjon og tilbakefylling til opprinnelig terrengnivå. Løsmassene i området har trolig økende fasthet med dybden.

I anleggsfasen ved etablering av cut and cover kan en sikring av stabile graveskråninger bli en utfordring. Dersom massene består av sandige og siltige masser vil det være fare for hydraulisk grunnbrudd. Det kan bli behov for terrassering av graveskråinger og etablering av pumpebrønner for å senke grunnvannstanden som er antatt til å ligge 2-5 m under terreng. Denne metoden vil kreve et stort areal i anleggsføringen (Bane NOR A, 2016). Videre antas overdekningen på strekningen mellom Klepp og Bryne til å ligge mellom 3-15 m under terreng i hardt berg. Dersom berget er av bra kvalitet med nok overdekning på resten av strekningen kan den videre drives med boring og sprenging til utenfor tettbygd strøk i Bryne sentrum. Cut and cover krever et stort areal i anleggsføringen, og er et stort inngrep i naturen. Samtidig er løsningen fleksibel og kan tilpasses geologiske forhold.

Fullprofilboring

Forutsatt at deler av traseen har lav fjelloverdekning og går periodevis gjennom mengder med løsmasser kan det lønne seg å bruke en Multi-mode TBM som drives fra start til slutt. Multi-mode TBM kan bore både i hardt berg, og såkalt «mixed-face» forhold der tunnelprofilet krysser bergoverflaten. Herrenknecht tilbyr to ulike Multi-mode TBM-er. Den ene med en modulær grunnstruktur, hvor tunnelmetoden endres i tunnelen ved omfattende modifikasjoner på enkelte komponenter. Den andre har et betydelig mer komplekst teknisk design, med

komponenter integrert i maskinen som gjør at tunnelmodusen kan endres på relativt kort tid og til relativt lav pris (Herrenknecht, u.d.). Traseen nord for Øksnevadporten må ha et fall ned i mektige løsmasser, og her kan en Multi-mode TBM drive gjennom løsmassene uten å etablere en cut and cover løsning. Betongelementer monteres kontinuerlig under driving.

Løsmasse TBM-er generer et mottrykk som tilsvarer jord og vanntrykk for å så ta ut masse kontrollert. På Multi-mode TBM kan løsmasseverktøyene byttes ut med rullemeisler og åpen TBM modus dersom hele eller deler av tverrsnittet består av hardere material. Generelt kan man operere med løsmasseverktøy i masser med en trykkfasthet opp til ca. 20 MPa. Traseens høydeprofil er ikke bestemt, men den vil mest sannsynlig ikke overstige 20 MPa, da overdekningen trolig ikke vil være mer enn 70 meter.

Stasjonsutforming

For å kunne bygge stasjonene i fjellhaller må det være hardt fast berg, nok overdekning og riktige spenningsforhold. Det er mangel på informasjon som bergspenningsmålinger og horisontalspenningskomponenter, og disse er avgjørende for om det lar seg gjøre.

Store mengder løsmasser og stor oppsprekking ved Øksnevadporten gjør det vanskelig å bygge stasjonen som fjellhall i berget. Et alternativ kan være en betongutstøping som graves ned. Nærmere mot Klepp stasjon forventes bedre bergkvalitet, og større mulighet for utsprenging av fjellhall.

Fjellbrønn nr. 666467 i Vedlegg 1 rapporterer om mørkt støv, dårlig porøst berg og mye vann i brønnen ved Bryne sentrum. Det kan skape problemer for et undergrunnsanlegg ved en eventuell fjellstasjon i Bryne. Grunnvannsdatabasen gir ufullstendig informasjon for å vurdere detaljer om anleggstekniske og bergsikringsmessige forhold og lekkasje. Ut fra gitt informasjon er det gitt at berget er svært vannførende der brønnen er boret. Sonens utstrekning er uvisst.

9.2 Drivekostnad og inndrift

Den rimeligste løsningen med en pris på 953 437 670 NOK er ett løp dobbeltsporet tunnel, konvensjonelt drevet som vist i Tabell 23. To løp enkeltsporet tunnel, drevet konvensjonelt er en 6,7 % dyrere løsning. Tradisjonelt blir det mest tatt hensyn til kostnader ved investeringen når kostnadsbildet skal vurderes, og drivekostnaden blir avgjørende for valg av konsept. Det bør undersøkes om det likevel kan lønne seg å velge løsningen med to løp ved å se på langtidskostnader og oppetid. Derimot er byggetiden 22,4% raskere ved å bygge to enkle løp en ett stort. Dette krever to uavhengige tunnellag. Hovedgrunnen til at to enkeltspor ikke er mer kostbart enn 6,7% ekstra er den valgte vann- og frostsikringsløsningen «Sprøytebetong i kombinasjon med sprøytbar vanntettingsmembran». Løsningen er 47% billigere enn betongelementer som er valgt i ett stort løp. Grunnen til dette valget er at det i et stort tunnelløp vil være et større areal med flat heng. Knøler i stor flat heng vil gi noe mer ressursbruk til forberedende arbeider i form av utjevningssprøytebetong, innsprøyting av bolter og temporær drenering av lekkasjepunkter enn ved to enkeltspor hvor hengen er mindre og større andel av tunnelen er rette vertikale vegger (Holter, 2015).

Tunnelen har i gjennomsnitt av de tre løsningen en pris på ca. 160.500 kr/m. Sammenlignet med Ulvintunnelen som er en 3985 m lang dobbeltsporet tunnel langs Mjøsa er prisen på 177.800 kr/m (Jakobsen, Buvik, Ausland, Georgsson, & Seljordslia, 2014).

Den mest kostbare løsningen er to løp enkeltsporet tunnel, drevet med TBM. Dersom tunnelen drives med Multi-mode TBM, kan den drives ned i løsmassene før og ved Øksnevad uten å lage en cut and cover, som er en kostbar løsning. TBM-en kan drive videre til Klepp, og når hardt berg treffes byttes det til rullemeisler i borhodet. Det er usikkert om metoden vil være lønnsom da det krever et større investeringsbehov. I Hallandsåstunnelen i Sverige, ble en 3200 tonn tung Multi-mode TBM installert for to løps tunnelen. TBM-en hadde en diameter på 10,5 m til den to ganger 8,7 km lange tunnelen. I følge Trafikverket.se skal Multi-mode TBM-en ha hatt en pris på ca. 500 millioner svenske kroner (Trafikverket, 2010). Inndriften til studiets tunnel med TBM er beregnet til 70 m/uken for begge løp dersom de blir drevet av to TBM-er. For å unngå utvidet byggetid kan det kreve et investeringsbehov på omtrent 1 milliard kroner for to maskiner dersom en TBM skulle være i samme prisklasse som for Hallandsåstunnelen. TBM-er har også en restverdi etter endt prosjekt.

Til tross for stort investeringsbehov kan metoden likevel lønne seg dersom det stedvis er lav fjelloverdekning og utfordringer med løsmasser og oppsprukket berg langs traseen. Hallandsåsprosjekter er et eksempel på hvordan valg av feil drivemetode og TBM-type kan gi kostnadsoverskridelser. Entreprenøren i Hallandsåsprosjektet valgte en åpen TBM for harde bergmasser. Hallandsås besto av metamorf og vulkanske bergarter og ble antatt til å være stabile og gunstige for et undergrunnsanlegg. Det viste det seg at berget var sterkt forvitret og oppsprukket. Da den åpne TBM-en gav hydraulisk trykk for å skaffe mothold mot berget, gav berget etter og TBM-en sank et stykke ned i grunnen. Entreprenøren gikk over til konvensjonell driving, men fikk problemer med vannlekkasjer og trakk seg ut av prosjektet. En ny entreprenør tok over, og fortsatte med konvensjonell drift. Det var fremdeles store lekkasjer, og grunnvannsstanden snak og mange brønner i området gikk tørre. Tetningsmiddelet som ble brukt viste seg å være giftig. Det ble skylt ut og endte i bekker og vann og førte til at fisk døde og at kyr som drakk det ble syke. Entreprenøren bestilte en spesialdesignet Multi-mode TBM fra Heerencknect, og kom seg til slutt gjennom fjellet. Totalt tok prosjektet over 20 år før tunnelen var ferdigstilt, med en totalkostnad på 10,5 milliarder kroner (Trafikverket, 2010) (Teknisk Ukeblad, 2013).

9.3 Tunnelkonsept

Ved å drive ett stort tunneltverrsnitt med en arbeids- og servicetunnel parallelt kan det tenkes at entreprenør vil drive to stoffer og spare penger ved å ha et lag med tunneldrivere og veksle mellom de to tunnelløpene. De to tunnelenes inndrift blir ulik grunnet forskjellig størrelse på tverrsnitt. Vekseldrift mellom tverrsnittene kan medføre rot, og kan føre til at entreprenør må drive med to uavhengige lag.

Å bygge ett stort tunneltverrsnitt i stedet for to mindre kan medføre både fordeler og ulemper. NTNU-professor Amund Bruland er skeptisk til det dagsaktuelle Ringeriksprosjektet, hvor det er vedtatt at det skal bygges en stor dobbeltsportunnel med en langsgående arbeids- og servicetunnel. Han tror det er penger å spare ved å bygge to løp. Punkt han nevner er HMS, oppetid, og drift og vedlikehold. Stor tunnel er betydelig mer risikabel å bygge enn enkle løp på 83 kvadratmeter. Ved å ha to tverrsnitt kan vedlikeholdsarbeid utføres i det ene mens trafikken går som normalt i det andre. To løp gir mer oppetid og kan redusere vedlikeholdskostnader og økte tunnellevetiden ifølge professoren (Byggeindustrien, 2018).

9.4 Hensyn til omgivelsene

Områdets geologi, geomorfologi, hydrologi og klima gjør kommunen Klepp til en av landets betydeligste jordbrukskommuner, og 65 % av arealet i kommunen er dyrket jord. Den beste jorden på Klepp finnes i de sentrale strøk mellom Orrevatnet og Frøylandsvatnet, og det er her Bane NOR foreslår traséalternativ i dagen i silingsrapporten. Det er også flere våtmarksområder i området som er vernet (SNL, 2017).

TBM fører til mindre støy og rystelser som fører til mindre innvirkning på det ytre miljø. TBM krever et stort etablering- og anleggsområde, men vil mest sannsynlig være mer skånsomt for ytre miljø enn cut and cover metoden. Cut and cover krever et stort areal i anleggsperioden, og er et stort inngrep i naturen. Utgravingen for tunnel gjennom tykt løsmassedekke med fall på 1 promille krever et langt stykke med løsningen og vil gå utover et stort område. Bygging av tunnel kan medføre setnings-/rystelseskader på nærliggende hus i sentrum av Bryne og Klepp. Ved å drive tunnelen med TBM vil det være mer skånsomt mot støy og rystelser enn konvensjonell driving.

Ved et grundig injeksjonsarbeid kan grunnvannstanden stå uten store endringer, men det er en risiko for at grunnvannstanden endres og at dette går utover omgivelsene. Mye av området over traseen består av dyrket mark, som kan mer eller mindre tørke ut dersom grunnvannstanden endres.

Vann og frostsikringsløsningen «Element på berg» egner seg godt til områder som er sårbare for grunnvannsendringer. Løsningen går ut på at prefabrikkerte og vanntette betongelementer monteres i en sluttet ring ca. 8-9 meter bak borehodet. Løsningen fungerer også som bergsikring i tunnelen. Før elementene monteres, blir det injisert for å tette igjen inn mot berget (Jernbaneverket C, 2016). Etter at betongelementene er montert, fylles det resterende rommet på 20-25 cm mellom elementene og selve berget med en sementmasse som består av sement, bentonitt og vann fra en pumpebil (Anlegg&Transport, 2017). Dette kalles «Backfilling» (Mapequick CBS System Tokomponentsystem til sementbasert fyllmasseinjeksjon). Når massen herder skal elementene bli stabile og holde vannet ute for fremtiden. Vannet stenges ute rundt hele tunnelkretsen, slik at tunnelkledningen blir fullstendig udrenert. Det vil si at grunnvannet ikke trenger inn i tunnelen, men skal i prinsippet renne rundt. Det blir fullt

hydrostatisk trykk på tunnelkledningen, og grunnvannstanden blir ikke endret. Metoden egner seg for tunneler som blir boret med TBM, da den er avhengig av glatt kontur.

Jernbanestrekningen går gjennom områder med bebyggelse og nære turområder. Å bygge jernbanestrekningen i tunnel kan redusere antall ulykker samt unngå utfordringer med kryssende trafikk og fotgjengere. I følge adressa.no har det vist seg at antall ulykker ved Innherredsveien i Trondheim sank drastisk etter at Strindheimtunnelen ble åpnet (Adressa, 2018).

10. Videre arbeid

10.1 Drivemetode og designløsning ut i fra geologiske forhold

For eventuelt videre arbeid bør det fremskaffes mer geologisk informasjon. Det kan være nødvendig å utarbeide et geologisk oversiktskart med profil, og fremskaffe mer data om grunnens egenskaper. Det vil si fordeling og sammensetning av bergarter og løsmasser, samt oppsprekkingens karakter. Det er også nødvendig å angi områder med spesielle, vanskelige problemer, som spenningsforhold, påhugg, svakhetssoner, skyvesoner, fare for lekkasje og steder med liten overdekning. Det er viktig å kartlegge slike forhold, da det gir prosjektet ekstra utfordringer som kan øke kostnader og byggetiden. Som tidligere nevnt er det også avgjørende for drivemetode, stasjonsutforming og høydeprofil til trasé.

Ved Øksnevadporten bør fjelloverdekningen fastlegges nøyaktig og det bør kartlegges hvor traseen vil treffe fast fjell. Det bør også legges en plan for bygging av cut and cover stasjonshall i betong dersom bergmassene er like dårlig som forventet og det skal drives med boring og sprengning.

Spenningsforhold og bergmassekvalitet over de andre stasjonsområdene er viktig å kartlegge dersom det skal etableres fjellstasjoner. Dersom det foreligger riktige spenningsforhold og hardt fast berg et stykke ned i bergmassen må det vurderes om det vil være en fordel å flytte tunneltraseen lenger ned i jorden for å kunne utnytte berget og etablere fjellhaller.

For eventuelt videre arbeid kan andre alternativ for cut and cover være rørskjerm eller pantex gitterbuer og ischebeck spilingbolt. Grunnundersøkelser før Øksnevadporten må utføres for å se om og hvordan det er mulig å etablere en løsmassetunnel. Fall og lengde på løsmassetunnel før Øksnevadporten må undersøkes. Geologiske forhold kartlegges for å kunne finne praktiske løsninger og estimere en pris for løsmassetunnel.

Fjellbrønn i Bryne sentrum gir informasjon om vannførende berg der brønnen er boret. Det vil være viktig å kartlegge størrelsen på den vannførende sonens utstrekning. Opptak av borekjerner og detaljseismikk kan være nødvendig for evaluering av bergmassekvalitet for å konkludere for hvor vidt det er mulig innenfor rimelighetens grenser å bygge stasjon i Bryne sentrum.

10.2 Drivekostnad og inndrift

Kostnader knyttet til driving og sikring kan variere, ettersom bergforholdene kan variere. Drivemetodenes kostnad og byggetid er utregnet i «Tunsim» og «Anleggsdata Fullprof». Resultatene baserer seg på ulike parameter, og er spesielt følsomme for geologiske parametere som:

- DRI
- VHNR
- CLI
- Oppsprekkingssystem
- Borbarhet
- SPR
- Kvartsinnhold
- Porøsitet

Drivetekniske parametere i oppgaven baserer seg på tidligere observerte verdier i nærheten av traseen og noen generelt for bergartene som er funnet i området. Dette fører til at usikkerheten rundt resultatene er stor. Det gjelder også usikkerheten knyttet til sikringsomfanget, som også er avhengig av bergmassekvaliteten. Sikringskostnadene kan variere, ettsom bergforholdene kan variere. For eventuelt videre arbeid bør det lages en sensitivitetsanalyse for å se hvor følsomt estimatet er og hvor lett kostnadene påvirkes ved å endre på parameterne.

Sprøytebetongbuer og ekstra sikringstiltak er ikke regnet med i kostnadene. For et eventuelt videre arbeid bør ekstra sikringstiltak kartlegges og prises dersom det viser seg å være partier med vanskelige forhold langs traseen.

Kostnader som rigg og drift, uforutsette kostnader og administrative kostnader er ikke inkludert i oppgaven, og må utarbeides ved en eventuell videre arbeid. Studiets tunnelstrekning er begrenset til å starte ved Øksnevadporten og slutte ved Bryne stasjon. Det krever en løsning nord for Øksnevadporten og sør for Bryne sentrum, som vil utgjøre en stor del av prosjektets totale kostnad. Dersom det er snakk om en lengre tunnel i løsmasser nord for Øksnevadporten, bør det avklares om det kan lønne seg å kjøpe inn en Multi-mode TBM, da løsninger som for eksempel cut and cover er svært kostbare over lengre strekninger.

10.3 Tunnelkonsept

Det bør undersøkes hvor mye det er mulig å spare på langtidskostnader sammenlignet med investeringskostnader. Ved to løp kan vedlikeholdsarbeid utføres i ett løp mens togtrafikken kan gå som normalt i det andre. Det kreves full stans i begge retninger dersom vedlikeholdsarbeid skal gjennomføres i ett dobbeltsporet løp. Dersom vedlikeholdskostnadene blir lavere med to løp og oppetiden blir lengre kan det være nyttig å bruke løsningen selv om investeringskostnadene er mindre ved ett stort tunnelløp. I dette studiet er det en forskjell på 6,7% i pris fra ett dobbeltsporet tunnelløp og to enkle tunnelløp ved konvensjonell driving. En grunn til at forskjellen ikke er større er fordi det er valgt en rimeligere vann- og frostsikringsløsning i to løp.

10.4 Hensyn til omgivelsene

Forhold knyttet til risiko, sårbarhet og samfunnssikkerhet må vektlegges ved utarbeiding av plan etter Plan og bygningsloven. Bygging av en fjelltunnel vil skape et masseoverskudd. Håndtering og plassering av disse massene vil være et viktig tema ved en eventuell videre plan.

For videre arbeid må anleggets mulige innvirkning på omgivelsene angis. Det må undersøkes hvor endelig grunnvannsstand ligger. Gjennomføring av prosjektet vil kreve et stort etablerings- og anleggsområde, og omfang av inngrep i og etter anleggsperioden må avklares.

11. Konklusjon

For å være mer sikker på valg av tunnelkonsept og drivemetode bør det gjøres flere undersøkelser, angående:

- Fjelloverdekning og bergmassekvalitet
- Endelig grunnvannstand
- Bergartenes borsynk- og slitasjeegenskaper samt oppsprekkingsgraden, evaluert ved hjelp av prøver fra området
- Kartlegging av svakhetssoner
- Overdekning og spenningsforhold ved stasjonsområdene

Når de overnevnte grunnundersøkelsene er utført kan det gjøres mer detaljerte studier av følgende:

- Utrede en plan for nord for Øksnevadporten og sør for Bryne stasjon
- Sensitivitetsanalyse i forhold til kostnad
- Mer nøyaktig vurdering av nødvendig sikring
- Oppetid og vedlikeholdskostnader for to løp i forhold til ett
- Forhold knyttet til risiko, sårbarhet og samfunnssikkerhet
- Endelig kostnad inkludert alle segmenter
- Se på andre løsninger, som flytting av stasjonsområder og endre ruten til jernbanestrekningen av geologiske eller samfunnsmessige årsaker

Tabell 25 viser konsekvenser for tunneltrase, kostnad, stasjonsutforming og tunnellengde for ulike drivemetoder som ses på som aktuelle.

Tabell 25: Konsekvenser for drivemetoder.

Drivemetode	***Trasemulighet***	***Kostnad tunnel***	***Kompleksitet stasjon***	***Tunnellengde***
Multi-mode TBM	Grunn	Høy	Relativt lav	«Kort»
TBM	Dyp	Middels	Høy	Større lengde
D&B	Dyp	«Lav»	Høy	Større lengde

Dersom traseen drives av en Multi-mode TBM, kan den legges grunt da maskinen ikke er avhengig av stor overdekning for å drive. Løsningen gir et høyt investeringsbehov, og for å unngå utvidet byggetid må det muligens investeres i to maskiner. Stasjonene kan graves ned som betongkonstruksjoner, eller bygges som fjellhall der det er nok overdekning og riktige forhold. Ettersom tunnelen ligger grunt under overflaten vil det være mindre kompleksitet ved eventuell nedgraving av stasjoner, og adkomstveien for passasjerer er kortere. Grunn tunnel fører også til kortere tunnellengde, som i utgangspunktet gir lavere kostnad.

Ved hard-rock TBM og konvensjonell driving (D&B) må traseen ligge dypere for å få stor nok overdekning. Dette medfører høyere kompleksitet ved utforming av stasjoner. Sjansen for at stasjonene kan bygges i berget og ikke graves ned er større enn ved Multi-mode TBM, men adkomstveien for passasjerer vil være lengre. Dyp tunnel fører også til større tunnellengde og større fall og stigning, som i utgangspunktet gir høyere kostnad. Fra kostnadsestimatet vil D&B ha lavere kostnad enn TBM.

Avhengig av tunnelkonsept og drivemetode varierer estimatet for tunnelløsningene fra 953 000 000 til 1 303 000 000 kr, og byggetiden fra 55-71 m/uken. Ett dobbeltsporet løp konvensjonelt drevet er estimert til å være den rimeligste løsningen, men det kan likevel lønne seg å bygge to løp, da det gir 22,8% raskere inndrift, og kan gi lavere vedlikeholdskostnader og høyere oppetid.

Foreløpig ser flere tunnelkonsept og drivemetoder ut til å være mulige. Geologisk informasjon og estimerte kostnader og byggetid er for usikre på det nåværende tidspunkt til å konkludere entydig.

Referanser

Adressa. (2018, 02). *Antallet ulykker i Innherredsveien sank drastisk etter at tunnelen ble åpnet*. Hentet fra https://www.adressa.no/pluss/nyheter/2018/03/01/Antallet-ulykker-i-Innherredsveien-sank-drastisk-etter-at-tunnelen-ble-%C3%A5pnet-16183045.ece

Anlegg&Transport. (2017, 06 09). *Undertegnet Follobanen-kontrakt*. Hentet fra http://www.at.no/anlegg/2017-06-09/Undertegnet-Follobanen-kontrakt-26833.html

Bane NOR A. (2016, 10 20). *Dobbeltspor Sandnes - Nærbo*. Hentet fra http://www.banenor.no/Prosjekter/Utredninger/Jernbaneverkets-Utredninger/dobbeltspor-sandnes---narbo--silingsrapport/

Bane NOR B. (2014, 09 27). *Unike Jæren*. Hentet fra http://www.banenor.no/Om-oss/Jernbanemagasinet-arkiv/Bildefortellingen/Unike-Jaren/

Bane NOR C. (2016, 06 16). *Om Bane NOR*. Hentet fra http://www.banenor.no/Om-oss/Om_Bane-NOR/

Bane NOR D. (2017, 01 19). *Anbefalt konstruksjonsprinsipp for jernbanetunneler*. Hentet fra https://proing.opm.jbv.no/wiki/underbygning/veiledninger/jernbanetunneler_anbefalt_konstruksjonsprinsipp

Bane NOR E. (2016, 09 22). *Ringeriksbanen og E16 - fellesprosjektet*. Hentet fra http://www.banenor.no/Prosjekter/prosjekter/ringeriksbanenoge16/plan--og-dokumentarkiv/

Bruland. (1998). *Boring, Hard Rock Tunnel, Drillability Test Methods.* Trondheim: NTNU.

Bruland, A. (2008). *Drill and Blast Tunnelling Blast Design.* Trondheim: NTNU.

Bruland, A. (2016). *Anleggsteknikk GK Kompendium.* Trondheim: NTNU.

Byggeindustrien. (2018, 03 07). *Internrapport slakter planleggingen av Ringeriksbane-tunnel*. Hentet fra http://www.bygg.no/article/1346563

Drevland, P. J. (2018, 05 07). Bergssikring. Trondheim: NTNU.

Geologyin. (2015, 04 08). *How to Use QAPF Diagram to Classify Igneous Rocks?* Hentet fra http://www.geologyin.com/2015/08/using-qapf-diagram-to-classify-igneous.html

Herrenknecht. (2018). *Double shield TBM*. Hentet fra https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/double-shield-tbm.html

Herrenknecht. (2018). *Gripper TBM*. Hentet fra https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/gripper-tbm.html

Herrenknecht. (u.d.). *Multi-mode TBM*. Hentet fra https://www.herrenknecht.com/en/innovation/research-development/machines-components/multi-mode-tbm.html

Holter, K. G. (2015). *Properties of waterproof sprayed concrete lining tunnels.* Trondheim: NTNU.

Jakobsen, P. D., Buvik, H., Ausland, J., Georgsson, R., & Seljordslia, T. (2014). *Erfaringer med støpt løsning, Ulvin-tunnelen.* SVV; JBV; Noconsult.

Jernbanekompetanse. (17, 04 2015). *Tunnel/Driving og sikring*. Hentet fra http://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Tunnel/Driving_og_sikring

Jernbaneverket. (2015). *Slik bygges jernbanetunneler.*

Jernbaneverket A. (2015). *Teknisk Designbasis for InterCity.* Jernbaneverket.

Jernbaneverket B. (2016). *Sørlandsbanen (Egersund) - Stavanger, Dobbeltspor Sandnes - Nærbo, Silingsrapport.* http://www.banenor.no/contentassets/af2174c82ece4affb7a92c5a7eba520a/silingsrapport-for-dobbeltspor-sandnes---narbo.pdf: Jernbaneverket.

Jernbaneverket C. (2016, 01). *Follobanen*. Hentet fra http://www.banenor.no/globalassets/documents/prosjekter/follobanen/brosjyre/jbv_follobanen_nor_2906.pdf

Klausen, K. (2017). *Tunnelkledninger brukt i norske tunneler.* Stavanger: NTNU.

Macias, J., & Bruland, A. (2014). *D&B versus TBM: Review of the parameters for a right choice of the excavation method.* Trondheim: NTNU.

Multiconsult. (2015). *Planlegging av dobbeltspor på Jærbanen Datarapport grunnundersøkelser*. Jernbaneverket.

NFF. (2015). *Kort innføring i bruk av TBM.* NFF.

NGI. (2015, 11). *Bruk av Q-systemet.* Oslo: NGI.

NGU. (2005). *Kart: Berggrunn*. Hentet fra http://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/

NGU. (2005). *Kart: Løsmasser og marin grense*. Hentet fra http://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/

NGU. (2017). *Kart: Grunnvannsborehull (GRANADA)*. Hentet fra http://geo.ngu.no/kart/granada_mobil/

NGU. (2017, 09 12). *OM NGU*. Hentet fra http://www.ngu.no/side/om-ngu

NGU. (2018, 01 02). *Kartinnsyn*. Hentet fra https://www.ngu.no/emne/kartinnsyn

NGU. (u.d.). *Refraksjonsseismikk - Metodebeskrivelse*. Hentet fra http://www.ngu.no/sites/default/files/Refraksjon_beskrivelse_ny.pdf

NGU, UiB. (1999). *Geofysiske målinger over deponiområde nord for Frøylandsvatnet i Klepp kommune.* Stavanger: NGU.

Nilsen, B. (2016). *Ingeniørgeologi - Berg grunnkurskompendium.* Trondheim: NTNU.

Nordisk Vegteknisk Forbund. (2008). *Kledninger i tunnel.* Oslo: NVF.

Norsk Bonde- og Småbrukarlag. (2016). *Bygging av dobbeltspor vil rasere Jæren.* Bygging av dobbeltspor vil rasere Jæren.

Norsk jernbaneskole. (2015). *Ingeniørgeologi.* Jernbaneverket.

NTNU. (u.d.). *Fullprof: a program for full profile drilling*. Hentet fra http://anleggsdata.arriba.no/fullprof.php

NVE. (2014). *Aktsomhetskart for Jord- og Flomskred*. Hentet fra https://temakart.nve.no/link/?link=jordflomskredaktsomhet

NVE. (2017). *Aktsomhetskart for Snøskred*. Hentet fra https://temakart.nve.no/link/?link=SnoskredAktsomhet

NVE. (2017). *Aktsomhetskart for Steinsprang*. Hentet fra https://temakart.nve.no/link/?link=SteinsprangAktsomhet

Palmstrøm, A., & Norconsult. (2003). *Riktig omfang av undersøkelser.* Norconsult AS.

railsystem.net. (2015). *Cut and cover*. Hentet fra http://www.railsystem.net/cut-and-cover/

Ramberg, I. B. (2013). *Landet blir til: Norges geologi.* Trondheim: Norsk Geologisk Forening.

SNL. (2017, 08 11). *Klepp*. Hentet fra https://snl.no/Klepp

Statens Vegvesen A. (2016, 12 22). *Sikringsmetodikk*. Hentet fra https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/tunneler/bygging-og-sikring/Sikringsmetodikk

Statens Vegvesen B. (2016). *Fagrapport ingeniørgeologi.* Leikanger: SVV.

Statens Vegvesen C. (2016). *Kommunedelplan E39 Vigeland-Lyngdal vest.* Leikanger: SVV.

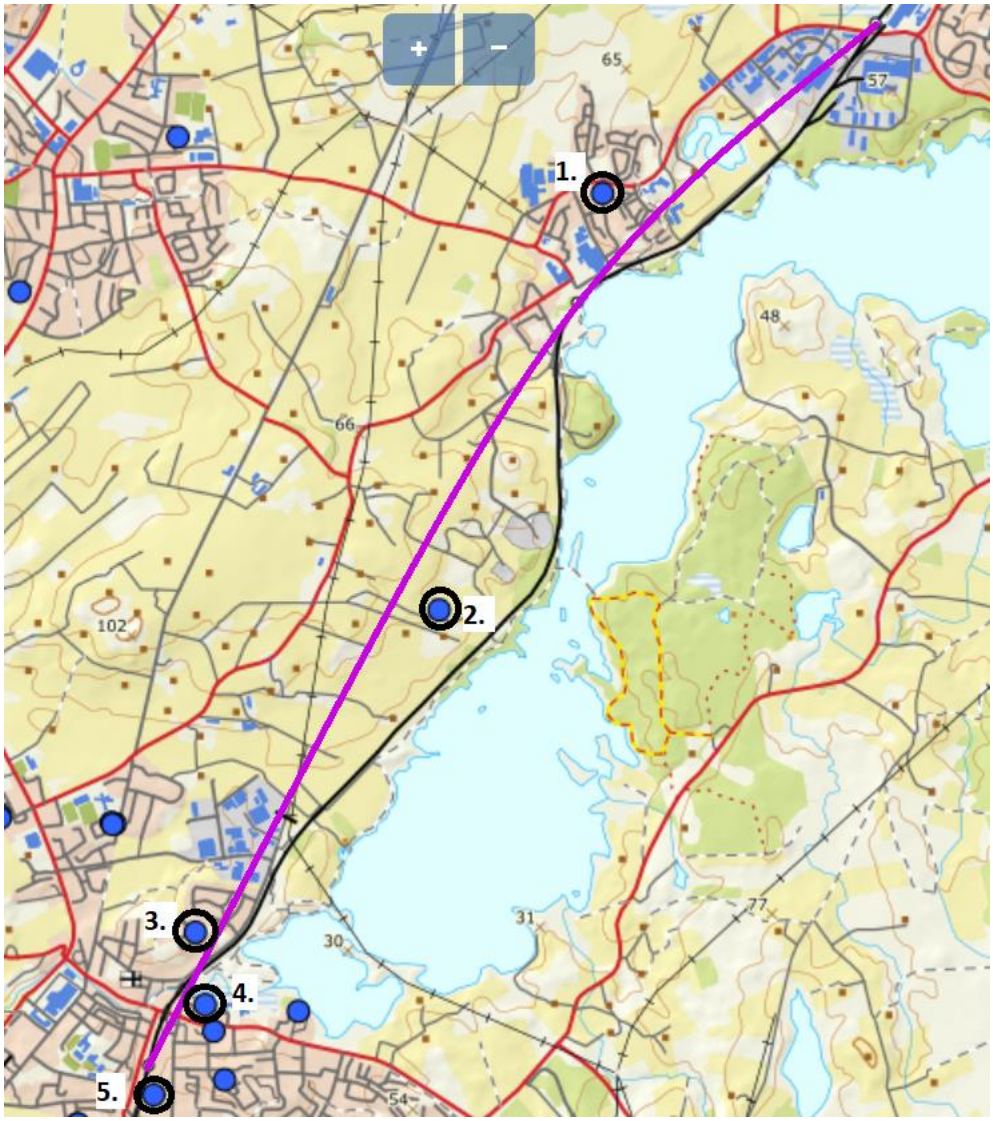
Teknisk Ukeblad. (2013, 06 21). *HALLANDSÅSTUNNELEN*. Hentet fra https://www.tu.no/artikler/her-har-de-brukt-over-20-ar-pa-9-kilometer-tunnel/233515

Trafikverket. (2010, 03 12). *Snabbfakta*. Hentet fra https://web.archive.org/web/20110407172732/http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Skane/Hallandsas/Byggnation/Byggteknik/Snabbfakta/

Tveten, H. (2016). *Tunneldriving gjennom svakhetssoner.* Trondheim: NTNU.

Wilhelmsen, M. M. (2010). *SLITASJETESTING PÅ BERGARTER.* Sintef.

Vedlegg 1 – Lokasjon og informasjon om fjellbrønner fra NGU



1. Fjellbrønn nr: 92389 – avstand fra tunneltraseen er 312 m – dybde til fast fjell 24 m
2. Fjellbrønn nr: 76089 – avstand fra tunneltraseen er 159 m – dybde til fast fjell 6 m
3. Fjellbrønn nr: 37086 – avstand fra tunneltraseen er 128 m– dybde til fast fjell 15 m
4. Fjellbrønn nr: 68589 – avstand fra tunneltraseen er 100 m – dybde til fast fjell 9 m
5. Fjellbrønn nr: 66467 – avstand fra tunneltraseen er 152 m – dybde til fast fjell 16 m

NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE - NGU -

GRUNNVANNSDATABASEN

Fjellbrønn nr. 92389

LOKALISERING

Fylke	:Rogaland
Kommune	:Klepp (1120)
UTM sone	:32 V
ØV-koordinater	:308015.86
NS-koordinater	:6519981.80
Kartblad (1:50 000)	:Stavanger (1212-4)
Stedfestningsmetode	:Digitalisert på skjerm fra andre digitale rasterdata
Stedfestningsnøyaktighet	:10000 cm

BRØNNPARAMETERE

Totalt dyp av brønn	:220.00 m
Dyp til fjell	:24.00 m
Vannføring (før trykking / sprengning)	:
Stabil vannstand (etter boring målt fra overflaten)	:1.00 m
Boredato	:11.03.2016
Brukstype	:Energi
Bruk	:Enkelthusholdning
Borediameter	:115 mm
Forings- / brønnrørmateriale	:Stål
Forings- / brønnrørlengde	:24.00 m
Boring	:Loddrett

BRØNNLAG (FJELLBRØNN)

Dyp fra overflaten (meter)

FRA	TIL	EVT. VANNINNSLAG	SLAMFARGE	BERGART	ANDRE OPPLYSNINGER
0.00	24.00				
					Løsmasse: Morene
24.00	220.00				

MÅLINGER

Ingen

ANNEN INFORMASJON

Borefirma	:Stangeland T Maskin AS

KOMMENTAR

Ingen

KONSULENTER / RAPPORTER / REFERANSER

Ingen

SPRENGNING / TRYKKING

Ingen

© 2018 | NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE | TLF: +47 90 40 00 | WWW.NGU.NO

NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE - NGU -

GRUNNVANNSDATABASEN

Fjellbrønn nr. 76089

LOKALISERING

Fylke	:Rogaland
Kommune	:Klepp (1120)
UTM sone	:32 V
ØV-koordinater	:307355.00
NS-koordinater	:6517723.00
Kartblad (1:50 000)	:Stavanger (1212-4)
Stedfestningsmetode	:GNSS: Kodemåling, enkle målinger
Stedfestningsnøyaktighet	:1000 cm

BRØNNPARAMETERE

Totalt dyp av brønn	:110.00 m
Dyp til fjell	:6.00 m
Vannføring (før trykking / sprengning)	:
Stabil vannstand (etter boring målt fra overflaten)	:6.00 m
Boredato	:23.11.2012
Brukstype	:Vannforsyning
Bruk	:Enkelthusholdning
Borediameter	:165 mm
Forings- / brønnrørmateriale	:Stål
Forings- / brønnrørlengde	:6.00 m
Boring	:Loddrett

BRØNNLAG (FJELLBRØNN)

Borelogg ikke levert

MÅLINGER

Ingen

ANNEN INFORMASJON

Borefirma	:Stangeland T Maskin AS

KOMMENTAR

Ingen

KONSULENTER / RAPPORTER / REFERANSER

Ingen

SPRENGNING / TRYKKING

Ingen

NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE - NGU -

GRUNNVANNSDATABASEN

Fjellbrønn nr. 37086

LOKALISERING

Fylke	:Rogaland
Kommune	:Time (1121)
UTM sone	:32 V
ØV-koordinater	:306228.00
NS-koordinater	:6515918.99
Kartblad (1:50 000)	:Nærbø (1212-3)
Stedfestningsmetode	:Digitalisert på skjerm fra andre digitale rasterdata
Stedfestningsnøyaktighet	:2000 cm

BRØNNPARAMETERE

Totalt dyp av brønn	:153.00 m
Dyp til fjell	:15.00 m
Vannføring (før trykking / sprengning)	:
Stabil vannstand (etter boring målt fra overflaten)	:
Boredato	:27.03.2003
Brukstype	:Energi
Bruk	:Enkelthusholdning
Borediameter	:165 mm
Forings- / brønnrørmateriale	:Stål
Forings- / brønnrørlengde	:15.00 m
Boring	:Loddrett

BRØNNLAG (FJELLBRØNN)

Dyp fra overflaten (meter)

FRA	TIL	EVT. VANNINNSLAG	SLAMFARGE	BERGART	ANDRE OPPLYSNINGER
0.00	15.00	<50 l/time			
15.00	153.00	<50 l/time			

MÅLINGER

Ingen

ANNEN INFORMASJON

Borefirma	:Stangeland T Maskin AS

KOMMENTAR

Ingen

KONSULENTER / RAPPORTER / REFERANSER

Ingen

SPRENGNING / TRYKKING

Ingen

NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE - NGU -

GRUNNVANNSDATABASEN

Fjellbrønn nr. 68589

LOKALISERING

Fylke	:Rogaland
Kommune	:Time (1121)
UTM sone	:32 V
ØV-koordinater	:306314.00
NS-koordinater	:6515544.00
Kartblad (1:50 000)	:Nærbø (1212-3)
Stedfestningsmetode	:GNSS: Kodemåling, enkle målinger
Stedfestningsnøyaktighet	:1000 cm

BRØNNPARAMETERE

Totalt dyp av brønn	:201.00 m
Dyp til fjell	:9.00 m
Vannføring (før trykking / sprengning)	:
Stabil vannstand (etter boring målt fra overflaten)	:2.00 m
Boredato	:14.01.2009
Brukstype	:Energi
Bruk	:Større anlegg
Borediameter	:150 mm
Forings- / brønnrørmateriale	:Stål
Forings- / brønnrørlengde	:9.00 m
Boring	:Loddrett

BRØNNLAG (FJELLBRØNN)

Borelogg ikke levert

MÅLINGER

Ingen

ANNEN INFORMASJON

Borefirma	:Stangeland T Maskin AS

KOMMENTAR

Testbrønn, kollektor ikke montert

KONSULENTER / RAPPORTER / REFERANSER

Ingen

SPRENGNING / TRYKKING

Ingen

NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE - NGU -

GRUNNVANNSDATABASEN

Fjellbrønn nr. 66467

LOKALISERING

Fylke	:Rogaland
Kommune	:Time (1121)
UTM sone	:32 V
ØV-koordinater	:306086.00
NS-koordinater	:6515048.00
Kartblad (1:50 000)	:Nærbø (1212-3)
Stedfestningsmetode	:GNSS: Kodemåling, enkle målinger
Stedfestningsnøyaktighet	:1000 cm

BRØNNPARAMETERE

Totalt dyp av brønn	:200.00 m
Dyp til fjell	:16.50 m
Vannføring (før trykking / sprengning)	:
Stabil vannstand (etter boring målt fra overflaten)	:0.00 m
Boredato	:19.12.2011
Brukstype	:Energi
Bruk	:Større anlegg
Borediameter	:140 mm
Forings- / brønnrørmateriale	:Stål
Forings- / brønnrørlengde	:17.50 m
Boring	:Loddrett

BRØNNLAG (FJELLBRØNN)

Dyp fra overflaten (meter)

FRA	TIL	EVT. VANNINNSLAG	SLAMFARGE	BERGART	ANDRE OPPLYSNINGER
0.00	3.00				Sand.
3.00	16.00				Morene. Innslag av litt vann på 6m.
16.00	18.00				Fjell. Sleppe på 18 meters dybde ca.20cm.endel vann. Borsynk: 25m/t.
105.00	165.00				Fjell. Dårlig porøst fjell. Boret kiler seg. Borsynk: 20m/t.
165.00	200.00				Fjell. Fast og godt fjell. Borsynk: 20m/t.
	102.00				Fjell. Sleppe på ca.20cm. Borsynk: 25m/t.
	72.00				Fjell. Sleppe på ca.20cm. Borsynk: 25m/t
	66.00				Fjell. Sleppe på va.50cm.kommer opp hvit småstein og mye vann. 25m/t.
	32.00				Fjell. Sleppe på ca.20cm.endel vann. Borsynk: 25m/t.

MÅLINGER

Ingen

ANNEN INFORMASJON

Borefirma	:Stangeland T Maskin AS

KOMMENTAR

Montert turbokollektor L=201 meter
Mye vann i hele fjellsonen. 16-30m. mørkt støv. 30-200m. grått støv.

KONSULENTER / RAPPORTER / REFERANSER

KONSULENT	RAPPORTNR	TITTEL	ÅR
Asplan Viak AS			

SPRENGNING / TRYKKING

Ingen

© 2018 | NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE | TLF: +47 90 40 00 | WWW.NGU.NO

Vedlegg 2 –TUNSIM

Eksempel på data input i Tunsim:

Cross section: 70 kvm

Lengde tunnel: 6810 m

Drillhole length: 5 m

Drillhole diameter: 64 mm

Diameter large holes: 102 mm

Sprengbarhet, SPR: 0,42 → mer god enn dårlig

Borbarhet: Dårlig

Borbarhetsindeks: 37 → Lav

VHNR: 807

Type drilling hammers:

Nummer drilling hammers: 4 (Fig 1, Zare s.82)

Ecplisives type: ANFO (Jernbanespor, Zare s. 83)

Load: Volvo L 330E (Fig 1 Zare)

Transport: Dump truck (fig 1 zare)

Nummer drillholes: 67 (Fig 3.19 s. 223 kompendium I)

Correction for drilled length: 1 (Fig 3.19 s. 223 kompendium I)

Number of large drillholes: 2

Lineær tilnærming for kostnad og inndrift

Tunsim har en begrensning på 100 m2 på størrelsen til et tunneltverrsnitt. Derfor er det gjort en lineær tilnærming for et tunneltverrsnitt på 123 m^2 for total kostnad per meter og inndrift (m/uke) i Diagram 1 og 2.

Vedlegg 2 –TUNSIM

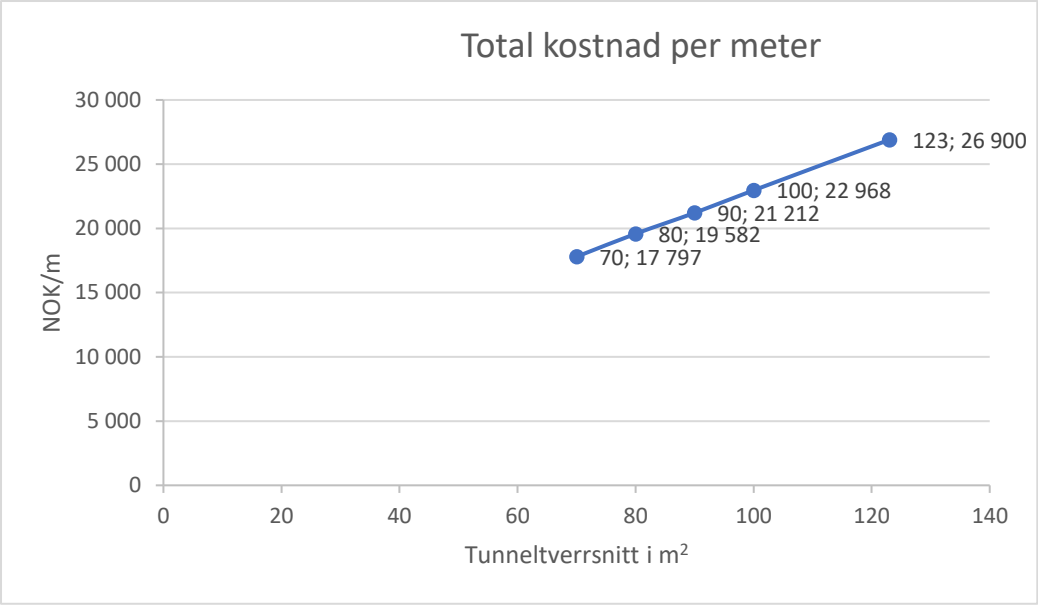


Diagram 1: Total kostnad per meter. For et tunneltverrsnitt på 123 m² er total kostnad per meter 26 900 NOK/m.

Ved å måle inflasjonen ettersom programmet Tunsim er laget i 2007 blir total kostnad:

$$26\,900 * 1{,}025^{11} = 35\,295\ NOK/m$$

Tverrsnittet for arbeids- og servicetunnelen er 60 m². I Tunsim er total kostnad regnet ut til å være 16 284 NOK/m. Ved måling av dagens inflasjon blir estimert totalkostnad:

$$16\,284 * 1{,}025^{11} = 21\,366\ NOK/m$$

Total kostnad for jernbanetunnel og arbeid- og servicetunnel:

$$35\,296 + 21\,366 = 56\,661\ NOK/m$$

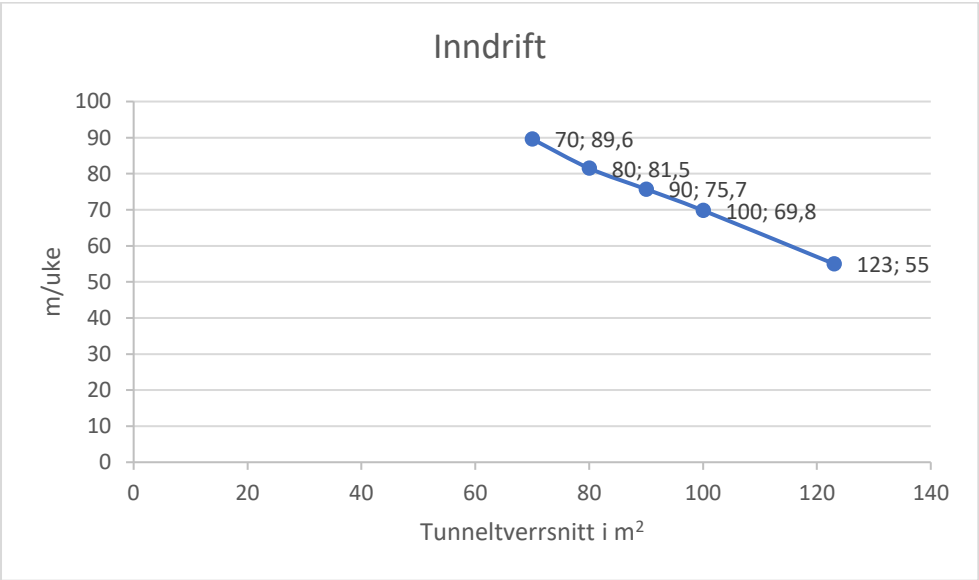


Diagram 2: For et tunneltverrsnitt på 123 m² inndriften på 55 m/uke.

Vedlegg 3 – Utregning av nødvendig sikring

123 kvm tunnelprofil og 60 kvm arbeids- og servicetunnel, 6810 m:

Pris forinjeksjon:

$$\frac{123\ m^2}{x} = \frac{66{,}62\ m^2}{12373\ NOK}$$

$$x = 22\ 844 \frac{NOK}{m}$$

$$Kostnad\ forinjeksjon\ 123\ kvm = 6810\ m * 22\ 844 \frac{NOK}{m} = 141\ 175\ 920\ NOK$$

$$\frac{60\ m^2}{x} = \frac{66{,}62\ m^2}{12373\ NOK}$$

$$x = 11\ 143 \frac{NOK}{m}$$

$$Kostnad\ forinjeksjon\ 60\ kvm = 6810\ m * 11\ 143 \frac{NOK}{m} = 68\ 863\ 740\ NOK$$

$$Total\ kostnad\ forinjeksjon = \ 210\ 039\ 660\ NOK$$

Bolter 123 kvm: Tunnelprofil 123 kvm → Heng er 17 m

Bergklasse	Bolter (stk/m)	Sprøytebetong (m^3/m)
1	3	1,4
2	6,8	1,6
3	9	1,8
4	12	2,7

Antatt fordeling	Lengde	Antall bolter per meter	Pris per bolt NOK	Total kostnad NOK
80 – 90 % i sikringsklasse 1	5448 – 6129 m	3	753,06	12 307 032 - 13 845 441
5 – 10 % i sikringsklasse 2	341 – 681 m	6,8	753,06	1 746 056 – 3 486 992

Vedlegg 3 – Utregning av nødvendig sikring

5 – 10 % i sikringsklasse 4	341 – 681 m	12	753,06	3 081 276 6 153 516
Total kostnad	Fordeling 80 – 10 – 10 90 – 5 – 5			 21 947 540 18 672 743
Gjennomsnitt				20 310 141

Sprøytebetong 123 kvm:

Antatt fordeling	Lengde	Sprøytebetong m^3/m	Pris NOK/m^3	Kostnad NOK
80 – 90 % i sikringsklasse 1	5448 – 6129 m	1,4	1500	11 440 800 – 12 870 900
5 – 10 % i sikringsklasse 2	341 – 681 m	1,6	1500	818 400 – 1 634 400
5 – 10 % i sikringsklasse 4	341 – 681 m	2,7	1500	1 381 050 – 2 758 050
Total kostnad	Fordeling 80 – 10 – 10 90 – 5 – 5			 15 833 250 - 15 070 350
Gjennomsnitt				15 451 800

Bolter 60 kvm: Heng → 12 m, heng med vegg → 16 m

Bergklasse	Bolter (stk/m)	Sprøytebetong (m^3/m)
1	1	1
2	5,2	1,1
~~3~~	~~6,5~~	~~1,3~~
4	8,7	2

Vedlegg 3 – Utregning av nødvendig sikring

Antatt fordeling	Lengde	Antall bolter per meter	Pris per bolt NOK	Kostnad NOK
80 – 90 % i sikringsklasse 1	5448 – 6129 m	1	753,06	4 102 344 – 4 615 137
5 – 10 % i sikringsklasse 2	341 – 681 m	5,2	753,06	1 335 220 – 2 666 524
5 – 10 % i sikringsklasse 4	341 – 681 m	8,7	753,06	2 233 925 – 4 461 299
Total kostnad	Fordeling % 80 – 10 – 10 90 – 5 – 5			11 230 167 8 184 282
Gjennomsnitt				9 707 225

Sprøytebetong 60 kvm:

Antatt fordeling	Lengde	Sprøytebetong m^3/m	Pris NOK/m^3	Kostnad NOK
80 – 90 % i sikringsklasse 1	5448 – 6129 m	1	1500	8 172 000 – 9 193 599
5 – 10 % i sikringsklasse 2	341 – 681 m	1,1	1500	562 650 – 1 123 650
5 – 10 % i sikringsklasse 4	341 – 681 m	2	1500	1 023 000 – 2 043 000
Total kostnad	Fordeling 80 – 10 – 10 90 – 5 – 5			11 338 000 – 10 779 249
Gjennomsnitt				11 058 624

Vedlegg 3 – Utregning av nødvendig sikring

To 83 kvm tunnelprofil, 6810 m:

Pris forinjeksjon:

$$\frac{83\ m^2}{x} = \frac{66{,}62\ m^2}{12373\ NOK}$$

$$x = 15\ 415\ \frac{NOK}{m}$$

$$Kostnad\ forinjeksjon\ to\ tunnelløp = 2 * 6810\ m * 15\ 415\ \frac{NOK}{m} = 209\ 954\ 692\ NOK$$

Bolter:

Bergklasse	Bolter (stk/m)	Sprøytebetong (m^3/m)
1	1	1,1
2	5,4	1,2
3	6,8	1,5
4	9,6	2,2

Antatt fordeling	Lengde	Antall bolter per meter	Pris per bolt NOK	Total kostnad NOK
80 – 90 % i sikringsklasse 1	5448 – 6129 m	2	753,06	8 204 688 – 9 230 274
5 – 10 % i sikringsklasse 2	341 – 681 m	5,4	753,06	1 286 574 – 2 769 082
5 – 10 % i sikringsklasse 4	341 – 681 m	9,6	753,06	2 465 020 - 4 922 813
Total kostnad for to tunnelløp	Fordeling 80 – 10 – 10			x 2 31 793 166 –

	90 – 5 – 5			25 963 736
Gjennomsnitt				28 878 451

Sprøytebetong:

Antatt fordeling	Lengde	Sprøytebetong m^3/m	Pris NOK/m^3	Kostnad NOK
80 – 90 % i sikringsklasse 1	5448 – 6129 m	1,1	1500	8 989 200 – 10 112 850
5 – 10 % i sikringsklasse 2	341 – 681 m	1,2	1500	613 800 – 1 225 800
5 – 10 % i sikringsklasse 4	341 – 681 m	2,2	1500	1 125 300 – 2 247 300
Total kostnad	Fordeling 80 – 10 – 10 90 – 5 – 5			12 258 000 – 11 852 450
Gjennomsnitt for to tunnelløp				24 110 450

To 81 kvm tunnelprofil, fullprofilboring, 6810 m:

«Generelt bør det nevnes at sikringsomfang er kraftig redusert i en boret berg-tunnel i forhold til en sprengt tunnel. Erfaringstall fra norske utbygginger viser en reduksjon av sikringsmidler på 40-90 % (vannkrafttunneler) i forhold til konvensjonell driving» (NFF, 2015, s. 17).

Vann og frostsikringsløsning for dette tunnelkonseptet er valg til «Element på berg». Løsningen er en tett løsning og vann i berg trenger ikke inn i tunnelen. Bergsikring er inkludert i løsningen. Forinjeksjon er sammenlignet med to tunnelløp på 83 kvm, og redusert med 60%.

Vedlegg 4 – Vektlegging til vurdering av drivemetode

Vurdering av drivemetode i mulighetsstudiet er basert på grunnlag av følgende parameter:

	Lite vektlagt	Medium vektlagt	Vektlagt
Prosjekt design			X
Sluttformål	X		
Helse, sikkerhet og arbeidsmiljø	X		
Forutsetninger	X		
Fleksibilitet			X
Risk		X	
Stabilitet til grunnforhold			X
Operasjon og prosjekteringsmannskap	X		
Prosjekteringskostnader			X
Overdekning og tunnelprofil			X
Påvirkning på ytre miljø		X	
Adits and implantation layout	X		

Parameterne er fra rapport «D&B versus TBM: Review of the parameters for a right choice of the excavation method» fra 2014 (Macais & Bruland, 2014).