

Gustav Aarre Mohus

Gjennomførbarhet med roadheader som drivemetode på ny togtunnel i Oslo

Masteroppgave i Tekniske geofag

Veileder: Eivind Grøv

Juni 2021

Gustav Aarre Mohus

Gjennomførbarhet med roadheader som drivemetode på ny togtunnel i Oslo

Masteroppgave i Tekniske geofag
Veileder: Eivind Grøv
Juni 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for geovitenskap og petroleum



Kunnskap for en bedre verden



MASTEROPPGAVE 30 studiepoeng

Kandidatens navn: Gustav Aarre Mohus

Oppgavens tittel: Gjennomførbarhet med roadheader som drivemetode på ny tog tunnel i Oslo

English title: Feasibility study for Roadheader excavation of new railway tunnel through Oslo

Utfyllende tekst:
1. I fremtiden er det planlagt å bygge en ny tog tunnel gjennom Oslo sentrum. Prosjekt-
oppgaven i 2020 undersøkte hvilke fordeler og ulemper som er knyttet til TBM,
D&B og Roadheader som alternative drivemetode for dette prosjektet i Oslo. Det
danner grunnlaget for masteroppgaven. Foreliggende masteroppgave skal gjøre en
vurdering av Roadheader som mulig drivemetode på ny tog tunnel i Oslo, og evaluere
hvilke fordeler og begrensninger drivemetoden gir i Oslo. Oppgaven skal omfatte:

Vurdere og diskutere gjennomførbarhet med roadheader som drivemetode for ny
tog tunnel i Oslo, der geologisk data bl.a. fra dagens Oslotunnel benyttes som
grunnlagsmateriale.

Evaluere anleggsgjennomføring i Oslo og hvilke muligheter som legger til rette for
at det skjer på en skånsom måte.

Utarbeide et estimat av brutto og netto inndrift ved bruk av roadheader i dagens
Oslotunnel.

Anvende en prognosemodell som grunnlag for vurdering av inndrifter.

Oppgaven skal vurdere og diskutere om roadheader kan benyttes som eneste
drivemetode for ny tog tunnel, eller om det er mer fordelaktig å benytte metoden i
kombinasjon med D&B, og eller TBM

2. Ansvarlig faglærer og hovedveileder for oppgaven er Prof. II Eivind Grøv, institutt
for geovitenskap og petroleum. Oppgaven utføres i samarbeid med Bane NOR, hvor
Jørn Harald Grøndal har vært kontaktperson.

Studieretning: Tekniske geofag

Hovedprofil: Ingeniørgeologi og bergmekanikk

Tidsrom: 15.01.2021-15.06.2021

Eivind Grøv

Faglærer

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN
NTNU, 15 januar 2021

Sammendrag

Fram mot 2040 er det forventet en betydelig befolkningsvekst på Østlandet. For å håndtere flere reisende må togkapasiteten gjennom Oslo sentrum økes. Begrensede arealer i dagen gjør at mulighetene i undergrunnen må utnyttes. Ny tog tunnel fra Oslo S til Lysaker planlegges som en del av dette arbeidet og er bakgrunnen for denne oppgaven.

Å bygge tunnel i Oslo sentrum innebærer flere utfordringer knyttet til det ytre miljøet. Forstyrrelser i anleggsfasen må minimeres og anleggsområdene bør oppta minst mulig plass i dagen. Dette ses i sammenheng med valg av drivemetode.

I denne oppgaven er det undersøkt gjennomførbarhet med roadheader som drivemetode på ny tog tunnel i Oslo. Geologiske og anleggstekniske utfordringer som forventes i Oslo sentrum er diskutert. Estimert av inndrifter er beregnet i en prognosemodell. Det har gitt indikasjoner på ytelsen til roadheader i de ulike bergartsgruppene. Relevante internasjonale prosjekter er gått gjennom for å undersøke erfaringer med roadheader som drivemetode og anleggsgjennomføring i urbane strøk.

Grunnforholdene i Oslo er komplisert. Hyppige vekslinger i berggrunnen, varierende styrkeegenskaper i bergartslagene og grunnvannsspeil like under overflaten er noen av utfordringene. Inndrift med roadheader er sensitiv for store endringer i bergmassens styrkeegenskaper, og er forbeholdt driving i bergmasse med svak - moderat styrkeegenskaper. Det ytre miljøet opplever klare fordeler med roadheader som drivemetode.

Angrepspunkt via sjakter og massetransport med transportbånd kan bidra til miljømessige fordeler i Oslo. Infrastruktur i bunn av sjaktene minimerer behovet for anleggsplass i dagen. Transportbånd i kombinasjon med lekertransport legger til rette for effektiv massetransport og reduserer antall lastebiler i bybildet.

Det vurderes at driving med roadheader er gjennomførbart i skifer, alunskifer og kalkstein, men det er nødvendig å benytte konvensjonell boring og sprengning som kombinerende drivemetode. I harde, mektige vulkanske ganger har roadheader begrenset ytelse.

Abstract

The population in Oslo and the surrounding areas is increasing and is expected to have significant growth until 2040. To handle more travelers, the railway capacity through Oslo city is needed to expand. A new railway tunnel is planned from Oslo S to Lysaker and forms the background for this thesis.

Tunneling in Oslo involves impact on existing buildings, structures, and the public. Disruptions in the construction phase must be minimized and the construction sites should take up minimal space in the city. The choice of tunneling method must be considered in conjunction with these challenges.

This thesis is a feasibility study for roadheader excavation of the new railway tunnel through Oslo. Geological and construction challenges in Oslo city are discussed and an estimation of the advance rate is calculated by using a prediction model. Roadheader performance in the rocks is clearly indicated. Relevant international projects are discussed to explore tunneling experiences with roadheader excavation and tunneling in urban areas.

The ground conditions in Oslo are complicated. Frequent rock changes, varying rock strength properties and low groundwater levels are some of the challenges. Roadheader advance rate is sensitive to varying rock strength and is best suited for tunneling in low - medium strength rocks.

Shafts as construction sites and mass transport with conveyor belt gives environmental advantages in Oslo. The advantages can be achieved by having infrastructure at the bottom of the shafts, which will minimize the construction sites at the surface. Conveyor belts in combination with barge transport is an effective solution to reduce the number of trucks in the city.

Tunneling with roadheader is feasible in shale, alum shale and limestone layers, but tunneling is needed in combination with Drill&Blast. Roadheader performance is limited in strong volcanic dikes.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i emne TGB4945 - Ingeniørgeologi ved institutt for geovitenskap og petroleum på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Arbeidet med oppgaven har foregått våsemesteret 2021.

Jeg vil takke min hovedveileder Eivind Grøv som har vært behjelpelig med informasjon og spørsmål til oppgaven. Jeg vil også takke Jørn Harald Grøndal i Bane NOR som har vært tilgjengelig for spørsmål og bidratt med nyttig grunnlagsmaterialet til oppgaven.

Gustav Aarre Mohus

Trondheim, juni 2021

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Mål for oppgaven	2
1.3	Fremgangsmåte	3
1.4	Begrensninger	3
2	Ny tog tunnel Oslo	4
2.1	Utvikling og behov	4
2.2	Geologi	6
2.2.1	Berggrunn	6
2.2.2	Løsmasser	7
2.3	Utfordringer med å bygge ny tunnel i Oslo	8
2.3.1	Grunnforhold	8
2.3.2	Ytre miljø	9
2.3.3	Eksisterende infrastruktur	9
2.4	Tunnelkonsept	10
2.4.1	Ettløpstunnel	10
2.4.2	Toløpstunnel	11
2.5	Bakgrunnsmateriale	12
2.6	Innlekkasjekrav og bergsikring	13
3	Driving med roadheader	14
3.1	Prinsipp med roadheader	14
3.2	Klassifisering av roadheader	17
3.2.1	Aksial roadheader	18
3.2.2	Transverse roadheader	18
3.3	Valg av type roadheader	19
3.4	Logistikk i tunnel	20
3.5	Tunnelkonsept med roadheader	21
3.6	Fordeler med roadheader	22
3.7	Begrensninger med roadheader	23
4	Prognosemodell for roadheader	24
4.1	Nøkkelparametere	24
4.2	Kuttekapasitet	24
4.2.1	Teoretisk NCR	24
4.2.2	Effektiv NCR	25
4.2.3	Beregning av CR	28
4.2.4	SPC	29
4.3	Betydningen av korreksjonsfaktorene	30
4.4	Prognosemodellens validitet	33
4.4.1	NCR	33
4.4.2	CR	34
5	Gjennomgang av grunnforhold	35
5.1	Grunnforhold i Oslostunnelen	35

5.1.1	Basarhallen - Stortinget (250 - 850 m)	36
5.1.2	Nationaltheatret - Olav Kyrres plass (1080 - 3500 m)	37
5.2	Styrkeparametere	40
5.2.1	Bestemmelse av BTS*	40
6	Liknende prosjekter	42
6.1	HATS2A	42
6.1.1	Anleggsgjennomføring	43
6.1.2	Erfaringer fra HATS2A	44
6.2	West Connex M4-M5 Link, Sydney	45
6.2.1	Anleggsgjennomføring	45
6.2.2	Erfaringer med roadheader	46
6.3	Montreal Metro	48
6.3.1	Erfaringer med roadheader	48
6.4	Premadio II, Bormio	50
6.4.1	Erfaringer med roadheader	50
7	Anleggsgjennomføring	52
7.1	Tidsfordeling arbeidsoppgaver	52
7.2	Anleggsområder	52
7.2.1	Tunneldrift via sjakt	53
7.3	Massetransport	54
7.4	Ventilasjon	57
8	Estimat inndrifter	58
8.1	Bestemmelse av parametere i prognosemodell	58
8.1.1	UCS	58
8.1.2	Rock Toughness Rating (k_1)	59
8.1.3	RMCR (k_2)	59
8.1.4	Matekraft (P)	60
8.2	Beregning av NCR	60
8.3	Estimat inndrifter	61
8.3.1	Netto inndrift	61
8.3.2	Brutto inndrift	61
8.4	Diskusjon av resultatene	63
8.4.1	Kostnadsvurdering	64
9	Diskusjon	65
9.1	Roadheader som drivemetode på ny tog tunnel i Oslo	65
9.1.1	Inndrifter	65
9.1.2	Fleksibilitet og risiko	67
9.1.3	Klima og miljø	68
9.2	Anleggsgjennomføring	68
9.3	Roadheader i kombinasjon med TBM og D&B	69
9.4	Er roadheader egnet som drivemetode på ny tog tunnel i Oslo?	70
10	Konklusjon	71
	Referanser	72

A	Berggrunnskart	76
B	Prognosemodell	77
B1	Inngangsparametere og beregning av NCR	77
B2	Estimat inndrifter	80
B2.1	Netto inndrift	80
B2.2	Brutto inndrift	81

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

De neste tiårene er det ventet en betydelig befolkningsvekst på Østlandet. For å håndtere befolkningsveksten er det behov for et nytt og utvidet togtilbud, som øker kapasiteten gjennom Oslo. I dagen er tilgjengelige arealer begrensende og snart overbelastet, slik at mulighetene i undergrunnen må utnyttes.

Det er mange komplekse utfordringer med å bygge tunneler i tettbebygde byer. Støy, forurensning og andre forstyrrelser må minimeres for å ta vare på omgivelsene under anleggsperioden (Broere, 2016). Evaluering av muligheter og begrensinger med drivemetodene er viktig for å løse problemstillingene på en best mulig måte, og samtidig oppnå tids- og kostnadseffektiv tunneldrift. Dette ses i sammenheng med grunnforholdene, som i Oslo sentrum er vekslende og komplisert. Bergmassekvaliteten varierer innenfor korte avstander.

I dag benyttes tunnelboremaskiner (TBM) og konvensjonell boring og sprengning (D&B) som drivemethode på nesten alle tunnelprosjekter. For tunneler lokalisert tett på annen sensitiv infrastruktur er det ofte knyttet en risiko til disse drivemetodene, spesielt D&B som induserer rystelser og vibrasjoner. Internasjonalt er delsnittmaskiner (roadheader) benyttet som alternativ drivemethode på flere urbane tunnelprosjekter. Dette er en ikke-eksplosiv drivemethode, og under de rette grunnforholdene kan driving skje effektivt og skånsomt for omgivelsene.

I takt med det grønne skiftet, blir miljøvennlig løsninger i tunnelbransjen stadig mer aktuelle. Kostnader og byggetid er fortsatt viktige kriterier i valg av drivemethode, men miljø kan tenkes å vektas enda tyngre i fremtiden, spesielt i urbane tunnelprosjekter. Forstyrrelser i form av støy, støv og forurensning er vanskelig å måle i penger, men det er en stor besparelse for bymiljø og befolkning om dette minimeres.

I fremtiden er det tenkt å bygge flere tunneler i Oslo, i forbindelse med et utvidet og bedre transporttilbud som planlegges. Høsten 2020 ble det skrevet en prosjektrapport, som tok for seg hvilke kriterier som er avgjørende i valg av drivemetode på urbane prosjekter, og hvordan anleggsgjennomføring med drivemetodene kan skje på en skånsom måte i Oslo. Denne oppgaven er en videreføring av prosjektrapporten, og undersøker roadheader som mulig drivemetode på ny togtunnel i Oslo. Tunnelen er planlagt fra Oslo S til Lysaker, men i denne oppgaven fokuseres det i hovedsak på strekningen fra Oslo S til Skøyen, der dagens togtunnel går.

1.2 Mål for oppgaven

I denne oppgaven undersøkes gjennomførbarhet med roadheader som drivemetode på ny togtunnel som planlegges i Oslo. Hensikten er å sette fokus på en alternativ drivemetode til TBM og D&B, som kan bidra til skånsom og effektiv tunneldrift i Oslo. Målet med arbeidet er å vurdere:

- Geologiske og anleggstekniske utfordringer med tunneldriving i Oslo.
- Mulighetene og begrensningene med roadheader som drivemetode.
- Prognosemodell som kan benyttes for roadheader.
- Estimat av forventet inndrifter med roadheader, basert på prognosemodell.
- Geologiske forhold i Oslo som er gunstig og mindre gunstig for driving med roadheader.
- Hvilke muligheter som kan bidra til skånsom anleggsgjennomføring med roadheader.
- Bruk av roadheader som drivemetode på ny togtunnel i Oslo, alene eller i kombinasjon med andre drivemetoder.

1.3 Fremgangsmåte

Oppgaven er besvart ved å:

- Beskrive aspektene med roadheader.
- Gi en oversikt over de geologiske forholdene i Oslo.
- Gi en mer detaljert beskrivelse av de geologiske forholdene langs Oslotunnelen.
- Presentere prognosemodellen for roadheader som benyttes.
- Presentere vurderinger og erfaringer fra relevante internasjonale prosjekter, knyttet til anleggsgjennomføring i urbane strøk og bruk av roadheader.
- Diskutere funnene og konkludere med hva arbeidet har gitt.

1.4 Begrensninger

Kostnader er et viktig kriterium i vurdering av gjennomførbarhet. Men grunnet lite data om kostander knyttet til driving med roadheader fokuseres det i hovedsak på roadheader sin ytelese i bergmassen og potensielle inndrifter.

Data fra tidligere roadheader-prosjekter er begrenset og fra tidlig 2000-tallet. Ideelt sett burde data fra flere moderne prosjekter som benytter roadheader vært gjennomgått.

Bergmekanisk data varierer innenfor hver bergartsgruppe. Bergartsprøvenes nøyaktige posisjon i Oslofeltet vites ikke, slik at det er noe usikkerhet i hvor representativ bergmekanisk data som benyttes er for tunneltraséens berggrunn.

2 Ny tog tunnel Oslo

I den nasjonale transportplanen for 2018 - 2029 presenterte regjeringen forslag om ny tog tunnel fra Oslo S til Lysaker. Hensikten er å øke kapasiteten for regionale og lokale tog gjennom Oslo, og derav utvide togtilbudet på hele Østlandet (Regjeringen, 2017).

Å bygge ny tog tunnel i Oslo er en kompleks utfordring. Byen skal fungere mest mulig normalt i anleggsperioden, samtidig er det ønskelig å bygge tunnelen på en tids- og kostnadseffektiv måte. Det krever kunnskap om de geologiske og anleggstekniske utfordringene som er i Oslo.

Videre i kapitlet gis en beskrivelse av den nye tog tunnelen som planlegges og de geologiske forhold som er i Oslo. Relevante utfordringer med tunnel drift i Oslo kommenteres.

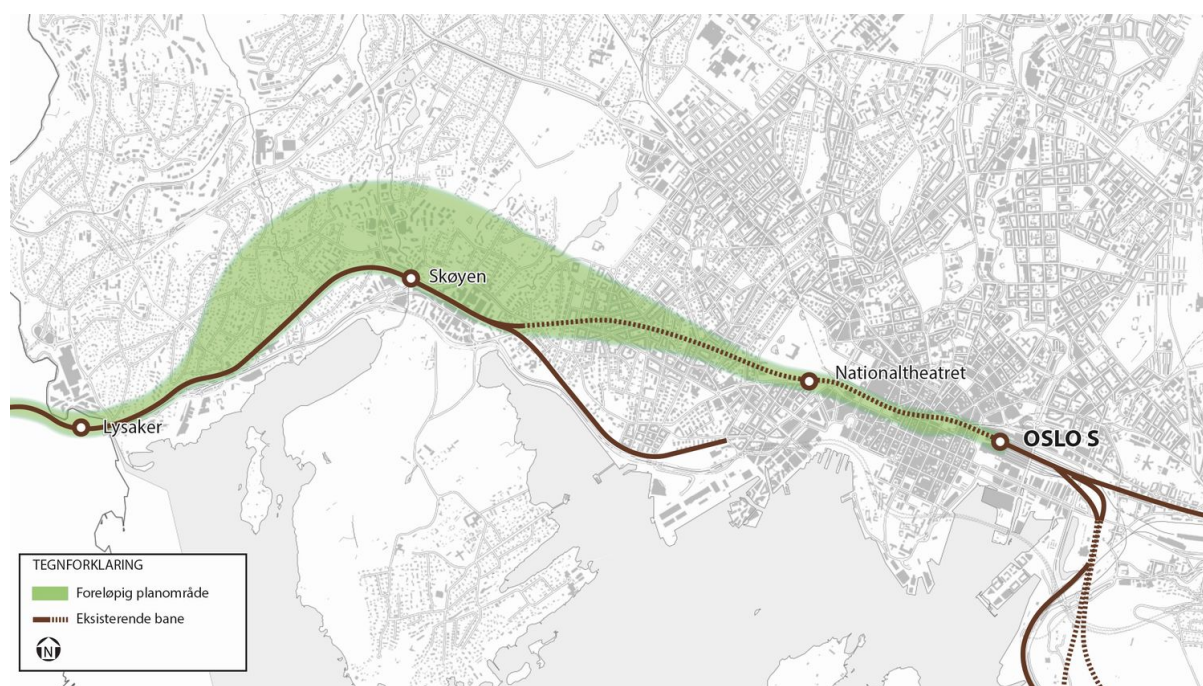
2.1 Utvikling og behov

Kapasiteten på dagens transportsystemer i Oslo og omegn blir stadig mer begrenset. Den økende befolkningsvekst som er forventet frem mot 2040, skaper behov for et nytt og utvidet tog tilbud. I tillegg er det et nødvendig tiltak for å ha et transporttilbud som er mer tidseffektivt og attraktivt enn å kjøre privat bil (Bane NOR, 2021).

Foreløpig er ny tog tunnel planlagt fra Oslo S til Lysaker, med Nationaltheatret og Skøyen som mulige stasjonsstopp (Figur 2.1). Tog tunnelen skal ha to spor, slik at kapasiteten på togsystemet gjennom Oslo doubles. Lengden på tog tunnelen avhenger av stasjonsstoppene, vist i Tabell 2.1. Etter planen skal ny tog tunnel og nye dobbeltspor være i drift fra 2034 (Bane NOR, 2021).

Tabell 2.1: Informasjon om de ulike traséalternativene for ny togtunnel i Oslo (Narum et al., 2015).

Trasé	Direkte Oslo S- Lysaker	Oslo S- Nationalth.- Skøyen- Lysaker	Oslo S- Nationalth.- Lysaker
Total lengde	7,92 km	6,79 km	7,13 km
Lengde fjelltunnel	7,45 km	3,73 km	6,27 km
Lengde betongtunnel	0,15 km	1,06 km	0,54 km
Dagsone	0,32 km	2,0 km	0,32 km

**Figur 2.1:** Ny togtunnel fra Oslo S til Lysaker planlegges innenfor grønt området (Bane NOR, 2021).

Dersom tunneltraséen legges som en direkte forbindelse mellom Oslo S og Lysaker, vil tunnelen hovedsaklig gå i fjell. Med stopp på Skøyen og Nationaltheatret må stasjonene utvides og lengre deler av tunnelen er i løsmasser. På Nationaltheatret kreves dessuten en byggegrøp som er 400 m lang, dersom det blir et stoppested (Narum et al., 2015).

2.2 Geologi

2.2.1 Berggrunn

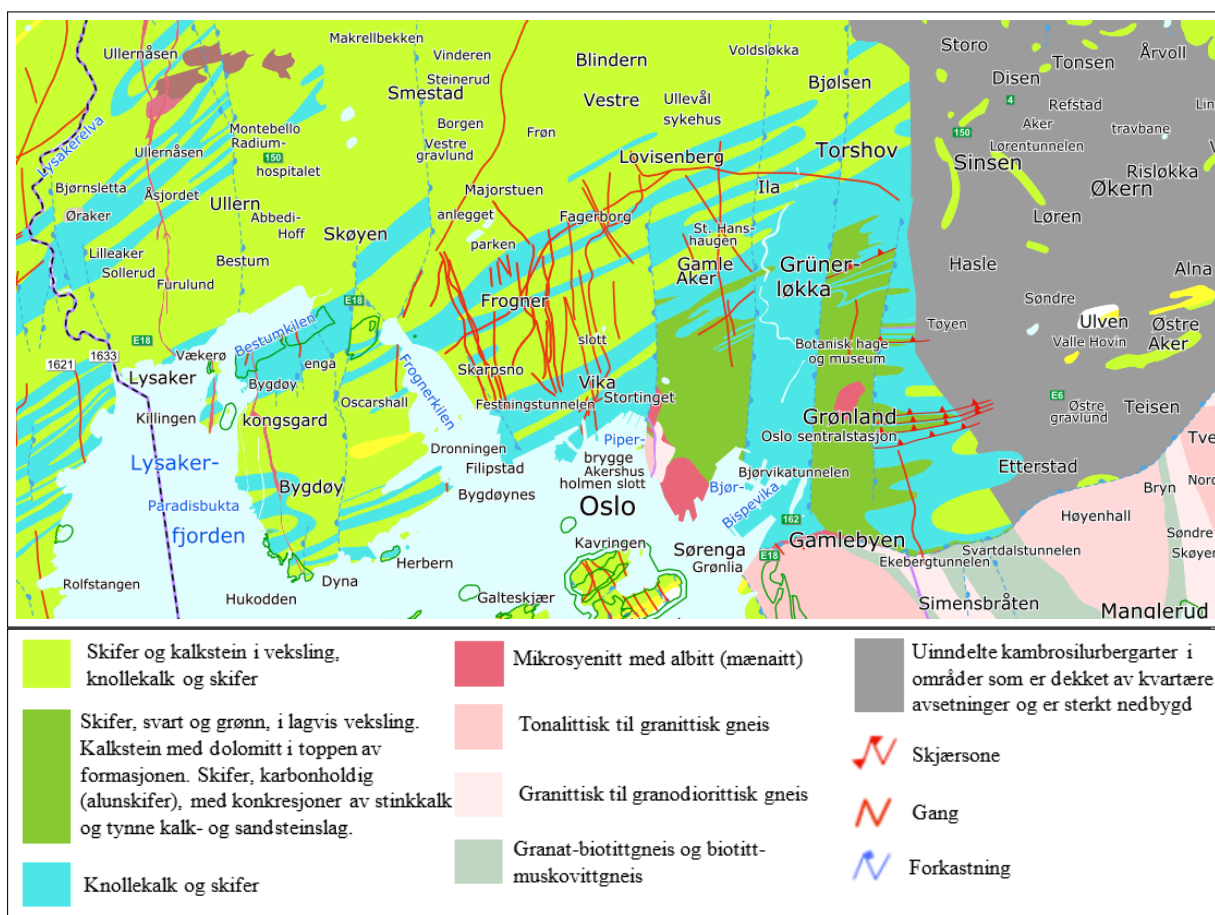
Oslo sentrum er en del av Oslofeltets geologi og preget av mange ulike geologiske forhold. På et begrenset område er det forkastninger, skjærsoner og bergarter med variert geologisk historie. En generell oversikt over berggrunnsforholdene i Oslo er presentert i Figur 2.2. I grove trekk består berggrunnen i Oslo av fem bergartsgrupper:

- Gneis og granitt fra prekambrium som utgjør grunnfjellet.
- Marine kalksteiner og skifer fra kambro-silur. I lagrekken med skifer forekommer alunskifer, men syredannende skiferbergarter kan forekomme i andre lagrekker også.
- Sandstein avsatt over de marine kambro-silursedimentene.
- Sedimentære bergarter fra kambro-silur, hovedsakelig kalkstein, knollekalk og leirskifer.
- Vulkanske intrusiv- /gangbergarter fra perm. De mindre intrusivgangene er typisk diabas, rombeporfyr og mænaitt, mens tykkere intrusivganger (større enn 10 m) er syenitt. Disse er gjennomskjærende i den sedimentære lagrekken fra kambro-silur.

(Bjørlykke, 2012).

Som følge av forkastninger, foldninger og sterk erosjon er bergoverflaten i Oslo sentrum ujevn. Svake skiferbergarter er flere steder erodert til et dypere nivå enn de sterkere kalksteinene. Det har bidratt til dannelsen av dyprenner. Dybden til berggrunnen kan variere fra berg i dagen, til mer enn 40 meter i de mektigste dyprennene. Variasjonene skjer ofte innenfor korte avstander (Grendal et al., 2015).

2.2 Geologi



Figur 2.2: N50 berggrunnskart over Oslo. De mest markerte bergartsgruppene er med i tegnforklaringen. Kartdata hentet fra (NGU, 2021).

I lagrekken med skifer fra kambro-silur er det leirskifre med syredannende egenskaper, hvor alunskifer er mest dominant (Bjørlykke, 2012). Det er en svak bergart med høyt innhold av radon. De syredannende egenskapene til alunskifer har uheldige virkninger og kan bidra til omfattende skader på konstruksjoner.

2.2.2 Løsmasser

Løsmassene over berggrunnen består av marin leire, kvikkleire og stedvis morene. De marine avsetningene har stor mektighet, mens morenen normalt er 2 - 3 m tykk. Dyprennene er hovedsakelig fylt med leire, men det kan forekomme morene- og elveavsetninger i bunn (Grendal et al., 2015). I enkelte områder er den marine leiren svak og veldig sensitiv for redusert poretrykk. Ved ukontrollerte forstyrrelser eller overbelastning kan leiren kollapse.

2.3 Utfordringer med å bygge ny tunnel i Oslo

2.3.1 Grunnforhold

En ny tunnel i Oslo sentrum vil omfatte vekslende bergartslag og skiftende bergkvalitet, soner med liten bergoverdekning og marine løsmasser. I utgangspunktet er det gunstig å ha tunneltraséen dypt i berggrunnen for å unngå krysning av svakhetssoner med liten bergoverdekning og driving gjennom mektige dyprenner (Grendal et al., 2015). Men for effektiv passasjertrafikk bør ikke traséen være for dyp. Det kan derfor forventes at deler av tunnelen må ha liten bergoverdekning og at flere dyprenner med løsmasser krysses. I slike soner er spesielle stabiliserende tiltak nødvendig.

Grunnvannspeilet er 2 - 3 m under bakken i store deler av Oslo. Tunnelene må ha et vannsikringskonsept som hindrer grunnvannssenkning og reduksjon i poretrykket (Bjørlykke, 2012). Konsekvensene av setningsskader er potensielt alvorlig.

Berggrunnen i Oslo er preget av hyppige vekslinger mellom bergartslagene, og i enkelte tilfeller med innslag av løsmasser. De mekaniske styrkeegenskapen endrer seg fort innenfor korte distanser, og det er ikke utenkelig at bergarter med svært ulike styrkeegenskaper opptrer på stoff samtidig, såkalt «mixed-face»-forhold (Bratlien, 2014). Slike forhold er nyttig å avdekke, spesielt ved bruk av mekaniske drivemetoder. Da kan driveteknikk tilpasses forholdene, og forhindre store avvik i fremdrift og kostnader.

Forekomstene av alunskifer i Oslo må vies ekstra oppmerksomhet. Det er ofte knyttet store kostnader, bygningsskader, miljørisiko og spesielle krav til deponi ved uttak av alunskifer. Med tilgang til vann og oksygen skjer det kjemiske endringer som også endrer bergartenes mekaniske egenskaper. På det meste kan alunskifer svulle til et volum som er 2 - 3 ganger større enn opprinnelig volum (Endre og Sørmo, 2015). Bergarten opptrer også aggressivt mot betong og stål. Det er viktig å identifisere forekomstene av alunskifer og andre syredannende bergarter i forkant av endelig trasévalg.

2.3.2 Ytre miljø

I Oslo må det vises hensyn til en rekke faktorer for at byen skal fungere mest mulig normalt i anleggsperiodene. Åpne byggegrop, støy, massetransport, fremkommelighet for syklende og gående, trafikkavvikling og redusert kollektivtilbud er noen av utfordringene. I planleggingsfasen handler det om å finne løsninger som minimerer de negative påvirkningene.

Bane NOR har som mål å ha skånsom og effektiv anleggsperiode, som påvirker innbyggernes bo- og livskvalitet i minst mulig grad (Bane NOR, 2017). Det innebærer blant annet hensiktsmessig størrelse og plassering av riggområder, og kortest mulig transportvei for massene, helst utenom vegnettet. Valg av drivemetoder må ses i sammenheng med disse utfordringene, og alle andre faktorer som kan påvirke det ytre miljøet negativt.

2.3.3 Eksisterende infrastruktur

Det er allerede et omfattende nettverk av infrastruktur under bakken i Oslo. Eksisterende tunneler, rør og kabler, energibrønner mm. må vises hensyn i planlegging av tunneltrasé. Ny tog tunnel vil sannsynligvis drives tett på eksisterende konstruksjoner. Informasjon om posisjon og utforming er viktig for å unngå konflikter under driving. I enkelte tilfeller kan refundamentering av bygninger være nødvendig, spesielt for gamle og historiske bygninger som er sensitiv for forstyrrelser (Grendal et al., 2015).

Det er en viss risiko ved driving tett på andre bergrom. Drivemetode må tilpasses skadepotensiale og stabilitetsforhold, men samtidig er det ønskelig å ha god fremdrift. Drill & Split er tidligere benyttet ved passering tett på eksisterende tunneler og kaverner ved Follobanen i Oslo. Selv om det er en skånsom drivemetode, er det ikke konkurransedyktig å benytte drivemetoden over lengre distanser, dersom byggetid og kostnader skal være innenfor forsvarlige rammer.

2.4 Tunnelkonsept

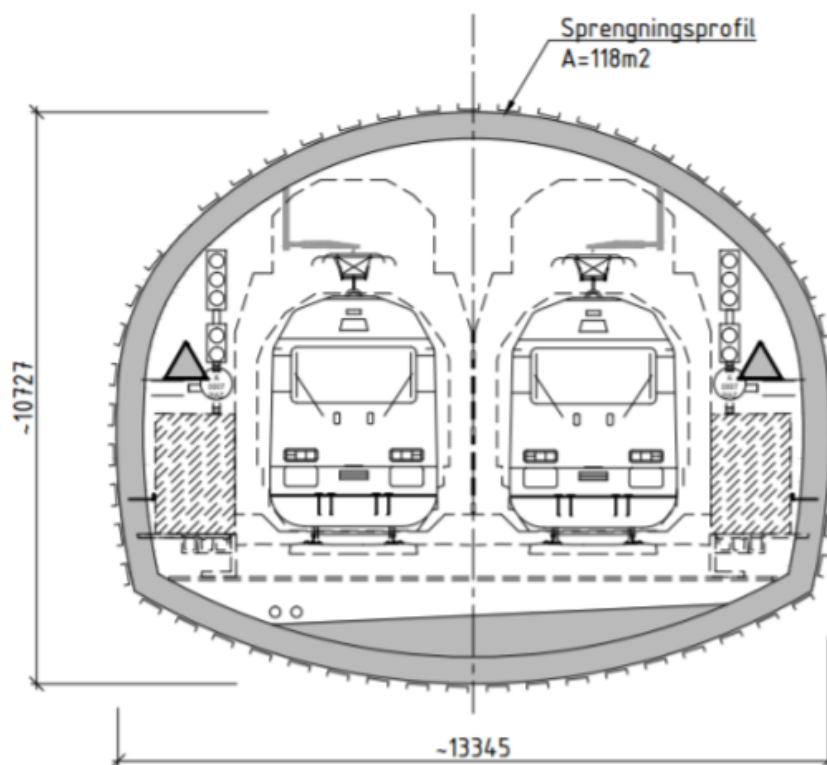
Ny togtunnel i Oslo skal ha dobbeltspor, enten i to separate tunneler eller samlet i én tunnel. Endelig bestemmelse av tunnelkonseptet avhenger av flere faktorer, blant annet sikkerhet, vedlikehold og sårbarhet ved avvik (Bane NOR, 2020). I tett bebygd undergrunn er det ønskelig å beslaglegge minst mulig plass og ha fleksibilitet i forbindelse med påkobling til stasjoner. Dette må ses i sammenheng med kostnader og byggetid for de ulike konseptene.

2.4.1 Ettløpstunnel

I en ettløpstunnel ligger begge sporene i ett og samme tunnellopp, med gode muligheter for etablering av overkjøringsløyper mellom sporene. Tunnelverrsnittet er generelt stort og må tillate parallell trafikk i tunnelen. Ved vedlikehold eller evakuering av tog i tunnelen, må det vises hensyn til trafikk på nabosporet. Av sikkerhetsmessige hensyn etableres flere rømningsveier, gjerne tverrslag som beholdes når tunnelen er ferdigstilt (Bane NOR, 2020).

Dersom ny togtunnel i Oslo skal ha stasjonstopp på Nationaltheatret og Skøyen, kreves ettløpstunnel i forbindelse med stasjonene og for overkjøringsløyper før og etter stasjonene. En ettløpstunnel opptar dessuten mindre plass i undergrunnen og reduserer uttaket av bergmasser, sammenlignet med toløpstunneler. Ettløpstunneler er dominerende for korte til middels lange tunneler (< 10 km) (Bane NOR, 2020).

Figur 2.3 viser tunnelverrsnittet som normalt benyttes i ettløpstunneler ved D&B. Tunnelverrsnittet vil være tilnærmet likt ved roadheader som drivemetode.

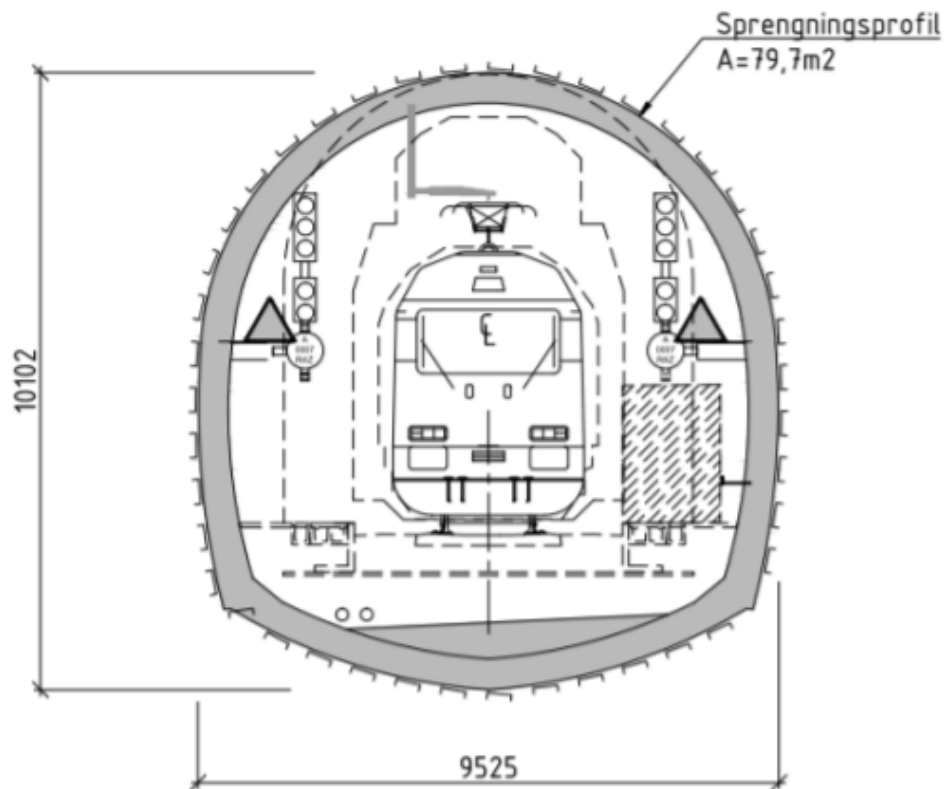


Figur 2.3: Tunnelgeometri ved ettløpstunnel for tog (Narum et al., 2015).

2.4.2 Toløpstunnel

I en toløpstunnel er det to parallelle tunnellop, ett for hvert spor. Tverrforbindelser etableres mellom tunnellopene for hver 500 m. Tunnelkonseptet egner seg spesielt godt for lengre tunneler (> 15 km), uten gode mulighet for rømningsveger til dagen. Da kan det være trafikk i det ene løpet, mens det andre løpet stenges. Ved lengre tunneler er det ofte behov for en eller flere overkjøringssløyfer mellom sporene (Bane NOR, 2020).

Dette tunnelkonseptet anses som mest reelt ved en direkte linje fra Oslo S til Lysaker, uten stasjonsstopp. Antall tverrslag kan sannsynligvis reduseres, da tunnellopene vil fungere som rømningsvei for hverandre. Ved lengre tunneler, er TBM tradisjonelt benyttet som drivemetode for dette tunnelkonseptet (Bane NOR, 2020). Figur 2.4 viser tunneltverrsnittet som normalt benyttes i toløpstunneler ved D&B. Tunneltverrsnittet vil være tilnærmet likt ved roadheader som drivemetode.



Figur 2.4: Tunnelgeometri ved toløpstunnel for tog (Narum et al., 2015).

2.5 Bakgrunnsmateriale

Bakgrunnsmateriale for de geologiske vurderingene i denne oppgaven er listet opp under:

- (Bane NOR, 1980). Geologisk rapport om Oslotunnelen.
- (Bjørlykke, 2012). Oslofeltets geologi.
- (Grøv, 2021). Bergmekaniske styrkeparametere fra Oslofeltet.
- (Narum et al., 2015). utfordringer og erfaringer med driving av tunneler i Oslo-området.
- (Neby, 2021). Bergmekaniske styrkeparametere fra Oslofeltet.
- (NGU, 2021). NGU sine kart over berggrunnsgeologi.

2.6 Innlekkasjekrav og bergsikring

I Oslo stilles strenge krav til innlekkasjer i tunnelene. Overdekningen er ofte liten og berggrunnen er kupert og dekket med løsmasser som bidrar til setningsskader ved grunnvannssenkning. For å forhindre grunnvannssenkning vil systematisk forinjeksjon kreves på store deler av en ny togtunnel (NFF, 2008). En betydelig del av tunnelens byggetid kan gå med til injeksjonsarbeid.

Fra Statens vegvesen (2003) anbefales et innlekkasjekrav på 3 - 7 l/min pr. 100 m tunnel i Oslo sentrum. Erfaringsmessig gir det minimale setninger og liten fare for skader. Fra tidligere prosjekter i Oslo har store innlekkasjer ofte forekommet i forbindelse med knusningssoner, svakhetssoner og intrusive ganger. Dyprennene kan i tillegg være vannførende (Grøv og Beitnes, 2006). Systematisk forinjeksjon anbefales supplert med vanninfiltrasjon (NFF, 2008).

Ny togtunnel i Oslo vil også omfatte systematisk bergsikring. Berggrunnen har lengre strekninger med sterk oppsprekking, og med dagens kvalitetskrav er det naturlig å anta at bolter og sprøytebetong må installeres i hovedparten av tunnelen (NFF, 2008). Stålbuer og full utstøpning kan være aktuelt i de svakeste sonene.

Ved driving i alunskifer er det viktig å ta spesielle hensyn i sikringsarbeidet. Udrenerte og vannrette løsninger er å foretrekke med tanke på alunskiferens egenskaper. Da forhindres igangsettelse av aggressive forvitningsprosesser og tunnelens levetid forlenges. Svelletrykket i alunskifer utvikles heller ikke. Med en drenert løsning oppstår kjemiske nedbrytningsprosesser lettere. Da er bolting og sprøytebetong falsk bergsikring, fordi betongmørtelen brytes ned (Endre og Sørmo, 2015).

3 Driving med roadheader

Siden 1950-tallet har roadheader blitt benyttet som drivemetode i kullgruver. I senere tid er roadheader også blitt mer vanlig å benytte som supplerende drivemetode på samferdselsprosjekter, normalt i urbane strøk. Dette er en elektrohydraulisk drivemetode som er svært skånsom for det ytre miljøet. Fremdrift avhenger i stor grad av bergmassens styrkeegenskaper og oppsprekkingsgrad. I utgangspunktet er driving forbeholdt bergmasse med svake - moderate styrkeegenskaper, men ved gunstige sprekkeforhold kan sterkere bergmasse også brytes effektivt (Murrow, 2017).

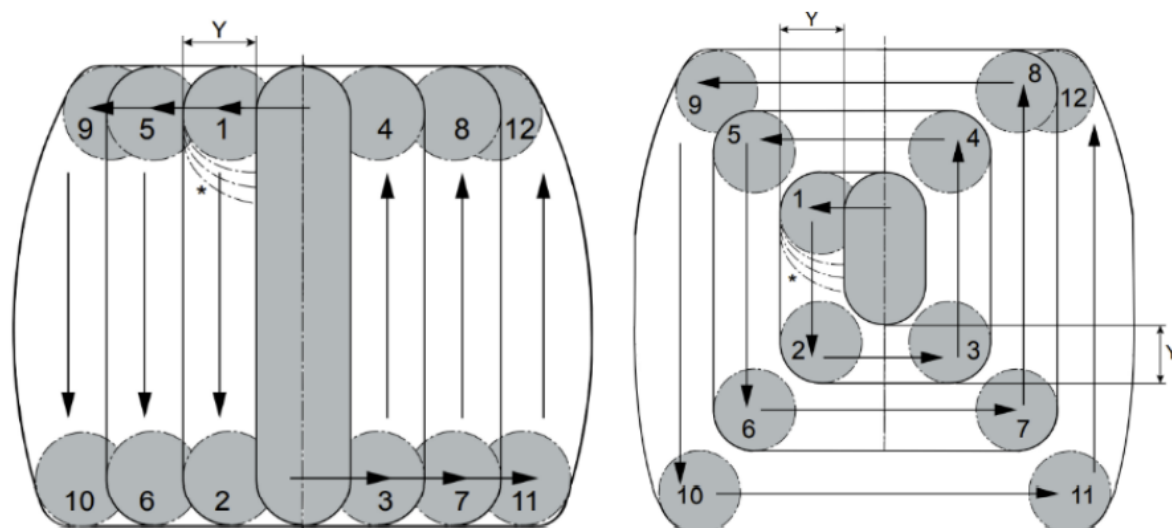
I Norge er ikke roadheader en utbredt drivemetode, mye grunnet de generelt harde bergforholdene i landet. De siste årene er bedre kutterutstyr utviklet, og sammen med internasjonale erfaringer kan det bidra til å gjøre roadheader aktuell som drivemetode i Oslo. Videre i dette kapitlet beskrives aspektene med roadheader, samt fordelene og begrensningene med drivemetoden.

3.1 Prinsipp med roadheader

En roadheader består hovedsakelig av et roterende kutterhode med kutterenheter, en oppsamlingsenhet og et transportbånd. Arbeidsoperasjonene skjer i tre prosesser; bryting av bergmasse, transport av massene og sikringsarbeid. I utgangspunktet fraktes massene på transportbåndet samtidig som kutterhode bryter bergmassen. Drivestopp er dermed forbeholdt installasjon av sikringstiltak og vedlikehold av roadheader, som med fordel skjer samtidig (Murrow, 2017).

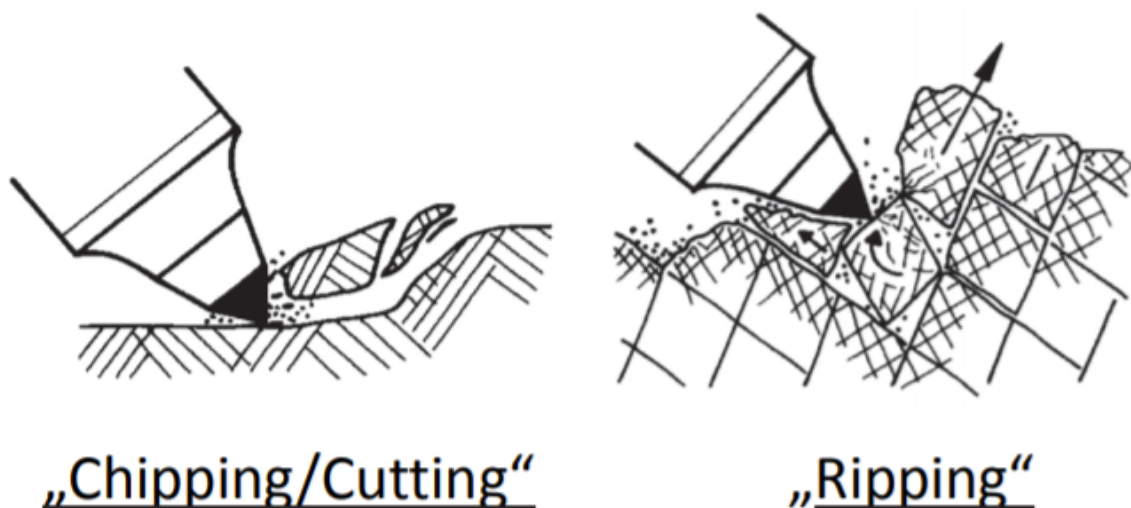
Brytningsprosess

Bergmassen brytes ved å presse det roterende kutterhodet mot stuff ("sumping") med en gitt matekraft, før den beveges i horisontal og vertikal retning (Figur 3.1). Dybden av "sumping" er opptil 0,5 m, og denne prosessen gjentas for hver gang "sumping"-dybden av tverrsnittet er kuttet (Keles, 2005). Det gir mulighet til å etablere tunneltverrsnitt i alle former og justere tunneltverrsnittet underveis. Matekraft til kutterhode genereres fra friksjon mellom maskinen og sålen (Bruland, 2016).



Figur 3.1: Eksempler på kutterhodets bevegelsesmønster (Sandvik, 2018).

I massiv bergmasse initieres stikk og riss når kutterenhetene roteres mot bergmassen. Denne bryteprosessen kalles ”chipping” og krever stor matekraft for å bryte løs kaks. I tettere oppsprukket bergmasse kreves mindre matekraft og størrelsen på kaksen avhenger mer av sprekkeavstand og sprekkeorientering. Da kalles brytningsprosessen ”ripping”. Slitasje på kutterenhetene er størst når bergmassen brytes med ”chipping” (Pleninger og Restner, 2015). Brytningsprosessene er illustrert i Figur 3.2.



Figur 3.2: Prinsippskisse av brytningsprosessen med kutterenhetene. Til venstre er bergmassen massiv, mens til høyre er bergmassen tettere oppsprukket (Pleninger og Restner, 2015).

Transport av massene

Oppsamlingsenheten på roadheader fanger sammen de utgravde massene som faller ned på stoff og skyver det på maskinens transportbånd. Transportbåndet tilføres masser kontinuerlig og frakter massene gjennom maskinen til baksiden. Derfra benyttes et nytt transportbånd, lastebiler eller vogner for videre transport.

Oppsamlingsenheten og transportbåndet er ikke dimensjonert for å frakte store blokker og gjørmete masser. I slike tilfeller må massene fraktes manuelt med hjullaster. Oppsamlingsenheten har samtidig begrenset rekkevidde, slik at fullstendig rensk av masser kan kreve bruk av hjullaster (Thuro og Plinninger, 1998). Blokkstørrelsen er normalt av mindre størrelser slik at transportbånd fungerer uten store slitasjeproblemer.

Sikringsarbeid

Med roadheader som drivemetode vil det alltid være tilgang til stoff. Roadheader kan flyttes enkelt fram og tilbake, slik at kartlegging og sikringstiltak på stoff kan utføres etter behov. Sikringstiltak (forinjeksjon, bolter, armeringsnett, stålbuer og sprøytebetong) utføres med egne maskiner, etter samme prinsipper som ved D&B. Maskinell rensk inngår i kutteprosessen, men det kan være behov for manuell rensk.

Luftforurensning

Bryteprosessen til roadheader danner betydelig konsentrasjon med støv på stoff. For å ha et godt arbeidsmiljø i tunnelen vil det være nødvendig å ha vannsprutsystemer og/eller ventilasjonssystemer for å holde støvkonsentrasjonen innenfor tillatte grenseverdier (Queensland Gov., 2010). De nyeste roadheadermaskinene har vannsprutsystemer installerte i front og demper støvkonsentrasjonen betydelig på stoff. Det betyr ikke at ventilasjonssystemer ikke er nødvendig, men ventilasjonssystemets kapasitet kan normalt reduseres (Prostański, 2013). Ved bruk av transportbånd kan det også forekomme støv under utlasting. Et vannsystem som fukter massene vil normalt minimere problemet.

Uten vannsprutsystem på roadheadermaskinene er det nødvendig å ha et ventilasjonssystem som reduserer støvkonsentrasjonen i tunnelen. Dette bør installeres tett inn til stoff, tilsvarende Figur 3.6.

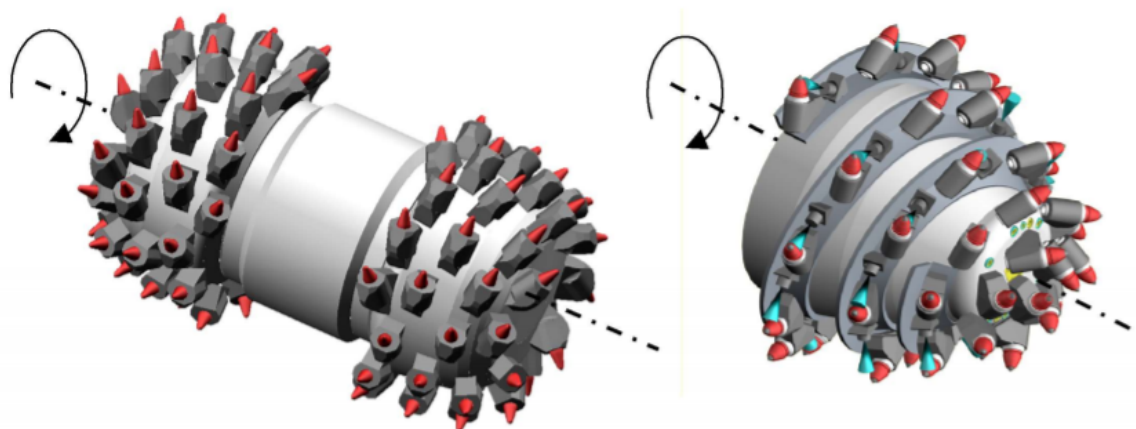
3.2 Klassifisering av roadheader

Basert på maskinens vekt og matekraft klassifiseres roadheadere i fire kategorier (Tabell 3.1). Dette er grove sammenhenger som kan forventes mellom maskinens egenskaper, maksimum tverrsnittstørrelse og bergmassens maksimale trykkfasthet (UCS). Endelig design av maskinene må ses i sammenheng med prosjektkriterier og undersøkelser av bergmassens karakteristikk.

Tabell 3.1: Klassifisering av roadheader (Tatiya, 2005).

Roadheader- klasse	Vektklasse [t]	Matekraft [kW]	Standard rekkevidde		Utvidet rekkevidde	
			Maks. tverrsnitt [m ²]	Maks. UCS [MPa]	Maks. tverrsnitt [m ²]	Maks. UCS [MPa]
Lett	8 - 40	50 - 170	~ 25	60 - 80	~ 40	20 - 40
Medium	40 - 70	160 - 230	~ 30	80 - 100	~ 60	40 - 60
Tung	70 - 110	250 - 300	~ 40	100 - 120	~ 70	50 - 70
Ekstra tung	>100	350 - 400	~ 45	120 - 140	~ 80	80 - 110

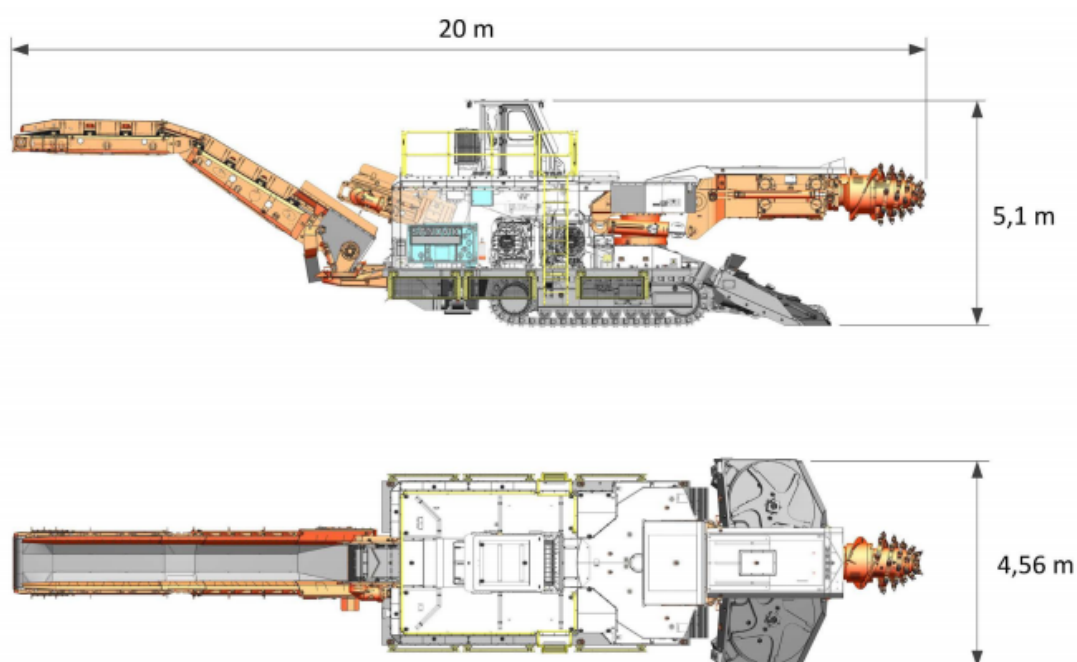
For driving av samferdselstunneler benyttes normalt roadheadermaskiner som klassifiseres som Tung eller Ekstra tung. De lettere og mindre maskinene benyttes for svært svake bergmasser og ofte i gruver med trang tilkomst. Videre skilles det mellom aksial og transverse roadheader (Figur 3.4 og 3.5). Den viktigste forskjellen ses på kutterhodets design (Figur 3.3), som er av betydning for maskinens drivegenskaper.



Figur 3.3: Transverse kutterhode (venstre) og aksialt kutterhode (høyre) på roadheader (Peila, 2019).

3.2.1 Aksial roadheader

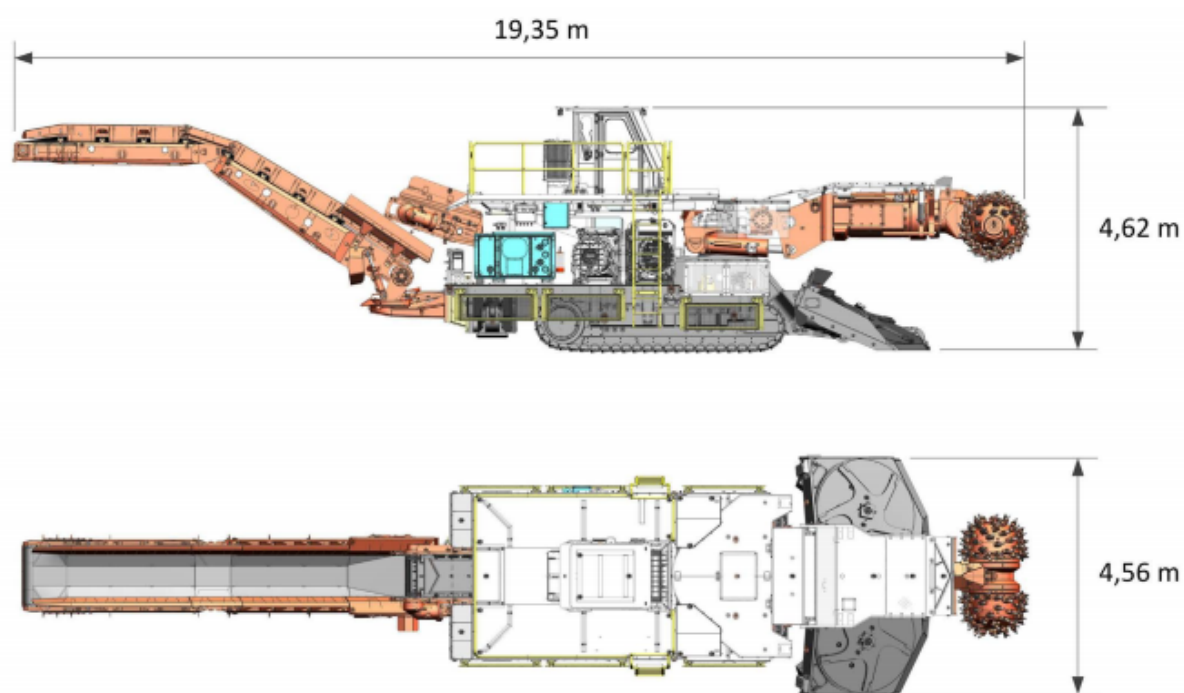
Kutterhode til en aksial roadheader roteres rundt sin egen lengdeaksen. Av den grunn virker den primære kraften fra kutterhodet sideveis. Det gjør at tyngden fra roadheaderen ikke blir utnyttet maksimalt som motkraft ved kutting, og kuttekapasitet er mer sensitiv for endring i bergmassens styrkeegenskaper, sammenlignet med en transverse roadheader (Keles, 2005). Aksiale roadheadere er derfor forbeholdt driving i svakere bergmasse enn transverse roadheadere.



Figur 3.4: MT-520 aksial roadheadermaskin i klassen Ekstra tung (Sandvik, 2021a).

3.2.2 Transverse roadheader

Med en transverse roadheader roteres kutterhodet på tvers av lengdeaksen. Det gjør at maskinene er rustet for å drive i hardere bergmasse, fordi det generes større motkraft fra maskinen under kutteprosessen. En transverse roadheader har dessuten større kutterhode, bestående av to kuttere. Det danner grunnlag for større kuttekapasitet, sammenlignet med aksiale roadheadere.



Figur 3.5: MT-720 transverse roadheadermaskin i klassen Ekstra tung (Sandvik, 2021a).

3.3 Valg av type roadheader

Til ny tog tunnel i Oslo, som innebærer driving i berggrunn med varierende kvaliteter og styrkeegenskaper, er en transverse roadheader mest forutsigbar. Denne bør i tillegg være i klassen Ekstra tung, for å oppnå tilstrekkelig friksjon mot sålen i de hardeste sonene og maksimere kuttekapasiteten.

I videre vurderinger og bestemmelse av maskinelle parametere benyttes MT-720 roadheader som grunnlag. Det er en transverse roadheader som er beregnet for driving av samferdselstunneler i berggrunn med varierende styrkeegenskaper (Sandvik, 2021b). Tabell 3.2 viser de maskinelle parametrene.

Tabell 3.2: Data om MT-720 roadheadermaskin fra Sandvik (2021b).

Total vekt [t]	130
Lengde [m]	19
Høyde [m]	4,6
Bredde oppsamlingsenhet [m]	4,5
Kuttekapasitet bredde [m]	9,1
Kuttekapasitet høyde [m]	6,6
Kapasitet transportbånd [m^3/h]	400
Matekraft [kW]	300

3.4 Logistikk i tunnel

Roadheader legger til rette for høy fleksibilitet i forflytning og tilkomst på stuff. Nødvendige maskiner og utstyr kan komme til på kort tid, dersom uforutsette hendelser oppstår. I tilfeller hvor roadheader benyttes i kombinasjon med D&B, ligger det dermed til rette for effektiv omstilling mellom drivemetodene. På større tverrsnitt kan flere roadheadere drive samtidig, tilsvarende Figur 3.6. I tillegg kan nisjer, tverrforbindelser og andre installasjoner bak stuff etableres parallelt med arbeid som utføres på stuff (West Connex, 2021).

Lasting fra transportbåndet til roadheader skjer med fordel direkte på lastebiler, dumpere eller transportbånd. Da vil massene fraktes ut av tunnelen parallelt med kutteprosessen, og gir tidsbesparelser i massetransport sammenlignet med D&B.

Ventilasjonsystemet i tunnelen opptar liten plass i tunnelen og kan monteres ved enkle fester i tunnelveggen, tilsvarende Figur 3.6. Dette arbeidet tar kort tid, men må utføres med tilgang på stuff, da hensikten er å installere det tett inn til stuff.



Figur 3.6: Stuff lett tilgjengelig for maskiner. Ventilasjon installerte tett inn til stuff.

3.5 Tunnelkonsept med roadheader

Valg av tunnelkonseptet bør i utgangspunktet ikke være av stor betydning for gjennomførbarhet med roadheader. Videre kommenteres noen momenter ved tunnelkonseptene.

Ettløpstunnel

I en ettløpstunnel er tverrsnittet bredt og høyt, slik at to roadheadere kan driftes samtidig på stuff. Det krever god planlegging, slik at massehåndtering skjer effektivt fra to transportbånd. Samtidig har roadheader begrenset rekkevidde i høyden, slik at det er sannsynlig å drive ettløpstunneler med ”benching-metoden” (Rowland, 2021). Ideelt sett blir roadheadere spesialdesignet med utvidet rekkevidde, slik at tverrsnittet brytes uten ”benching”.

Toløpstunnel

For en toløpstunnel er det naturlig å bruke én roadheader på hver stuff og ha roadheadere som etablerer tverrforbindelser mellom tunnellopene. I prinsippet kan tunnellopene drives parallelt, uavhengig av arbeidet i det andre tunnellopet, og tverrforbindelsen mellom tunnelen etableres parallelt med arbeid på stuff.

Et toløps tunnelkonsept opptar nødvendigvis ikke stor plass i undergrunnen. Med roadheader induseres ikke rystelser eller vibrasjoner som påvirker pilarstabilitet mellom tunnelene. Avstand mellom tunnelene kan dermed dimensjoneres med minste pilarbredde (Grøv, 2021). For sprengte tunneler er avstanden normalt større, fordi rystelser fra sprengning påvirker pilarstabiliteten. Sprengningsarbeid i det ene løpet vil samtidig påvirker arbeidet som skjer i det andre løpet (Statens vegvesen, 2014). I forbindelse med stasjoner og overgangssløyfer kan tverrsnittet enkelt justeres til ettløpstunnel.

3.6 Fordeler med roadheader

Evnen til å kutte bergmasse med et relativt lite kutterhode legger grunnlaget for fordelene med roadheader. I det følgende kommenteres de viktigste fordelene ved bruk av roadheader som drivemetode:

- Høy fleksibilitet og presisjon i kutteprosessen. Tverrsnittet justeres etter behov og gir en jevn kontur med minimalt avvik.
- Minimal nydannelse av sprekker i bergmassen og sikringsmengden kan normalt reduseres, sammenlignet med D&B. Tillater driving tett på annen infrastruktur.
- Stuff er alltid lett tilgjengelig for ingeniørgeologiske vurderinger.
- Ingen rystelser og minimalt med vibrasjon under driving. Nærliggende konstruksjoner og det ytre miljøet opplever lite forstyrrelser. I urbane områder gir det mulighet for svært skånsom tunneldrift. Muliggjør også driving om natten.
- Potensielt konkurransedyktig mot andre drivemetoder i berggrunn med svak - medium styrkeegenskaper. Drivestopp er hovedsaklig knyttet til vedlikehold av kutterutstyret og installasjon av sikringstiltak.
- Riggområdene opptar liten plass.

(Murrow, 2017; Tatiya, 2005; Tunnel Business Magazine, 2020).

3.7 Begrensninger med roadheader

Bruk av roadheader vil i mange tilfeller innebære en høyere risiko for uforutsigbar fremdrift og kostnadsavvik, sammenlignet med D&B. I det følgende kommenteres de viktigste begrensningene ved bruk av roadheader som drivemetode:

- Støfflengden bør ikke overstige 2 - 3 km.
- Detaljerte undersøkelser av berggrunnens karakteristikker er avgjørende for å vurdere gjennomførbarehet med roadheader.
- Begrenset rekkevidde, best egnet for tverrsnitt under 80 m².
- Konkurransedyktig driving er forbeholdt bergmasse med svak - moderat hardhet, hovedsaklig UCS mindre enn 60 - 80 MPa.
- Fremdrift er svært sensitiv for økning i bergmassens styrkeegenskaper. Vekslede lag av svake og sterke bergarter kan gi uforutsigbar inndrift.
- Det er knyttet store kostnader til høy slitasje og hyppig vedlikehold på kutterutstyret.
- Det forekommer mye finstoff i de utgravde massene. Massene må sannsynligvis bearbeides før videre gjenbruk.
- I Norge er det lite erfaring og kunnskap om roadheader som drivemetode. Gjennomførbarehet med roadheader vurderes normalt ikke på norske prosjekter.

(Plenninger og Restner, 2015; Tatiya, 2005).

4 Prognosemodell for roadheader

Dette kapitlet tar for seg Plenninger og Restner (2015) sin prognosemodell for beregning av kuttekapasitet med roadheader. Prognosemodellen baserer seg på empiriske data fra transverse roadheadere og bygger videre på prinsippene fra Gehring (1995) sin prognosemodell for kuttekapasitet til TBM. Prognosemodellen danner grunnlaget for videre vurderinger om forventet inndrifter med roadheader på ny togtunnel i Oslo.

4.1 Nøkkelparametere

For beregning og vurdering av kuttekapasitet/inndrift med roadheader benyttes følgende parametere som standarder:

- Net Cutting Rate [$\text{m}^3/\text{kuttetimer}$] (NCR), angir volumet av utgravde bergmasser pr. time kutterhode er i kontakt med bergmassen. Dette beskriver maskinens ytelse i bergmassen, altså netto inndrift.
- Cutting Rate [$\text{m}^3/\text{arbeidstimer}$] (CR), angir volumet av utgravde masser pr. arbeidstime. Tid som benyttes til sekundære arbeidsoppgaver (vedlikehold på utstyr og maskiner, ventilasjon, sikringsarbeid mm.) inkluderes i parameteren. Dette beskriver samlet fremgang, altså brutto inndrift.
- Specific Pick Consumption [$\text{kutteenheter}/\text{m}^3$] (SPC), angir forbruket av kutteenheter pr. volum som er gravd ut. Dette beskriver varighet fra nye kutteenheter er montert til de må skiftes ut.

4.2 Kuttekapasitet

4.2.1 Teoretisk NCR

I massiv til moderat oppsprukket bergmasse avhenger NCR teoretiske sett bare av bergmassens enaksiale trykkfasthet (UCS) og matekraft fra roadheader (P). Denne tilnærmingen representerer verst tenkelige forhold, der bergmassen brytes med ”chipping”. Teoretisk NCR angis med følgende formel:

$$NCR_{teoretisk} = \frac{7}{UCS} \cdot P \quad (4.1)$$

4.2.2 Effektiv NCR

Erfaringsmessig er det vurdert at flere egenskaper i bergmassen må inkluderes i beregningen av NCR. Det benyttes derfor korreksjonsfaktorer (k), slik at NCR kan beregnes med hensyn til flere betydningsfulle egenskaper i bergmassen. Effektiv NCR uttrykkes med følgende formel:

$$NCR_{eff} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_i \cdot \frac{7}{UCS} \cdot P \quad (4.2)$$

Plenninger og Restner (2015) anbefaler hovedsaklig å inkludere tre korreksjonsfaktorer i Likning 4.2. Videre følger en beskrivelse av disse korreksjonsfaktorene:

Rock Toughness Rating (k_1)

Rock Toughness Rating gir uttrykk for bergmassens evne til å motstå bruddannelse og bruddforplantning. Bergmasse som er meget sterk og motstandsdyktig reduserer kuttetekapasiteten, mens meget sprø bergmasse, som lett danner nye sprekker ved påkjenning, øker kuttetekapasiteten.

Styrkekoefisienten TC (Toughness Coefficient) benyttes som grunnlag for klassifisering av bergmassen og bestemmelse av korreksjonsfaktor. TC uttrykkes som forholdet mellom bergmassens enaksiale trykkfasthet og strekkstyrke (Likning 4.3). Brazilian Tensile Strength (BTS) uttrykker bergmassens strekkstyrke. Sammenhengene er presentert i Tabell 4.1.

$$TC = \frac{UCS}{BTS} \quad (4.3)$$

Tabell 4.1: Klassifisering og korreksjonsfaktor fra styrkekoefisienten TC.

Styrkekoefisient (TC)	Klassifisering	Korreksjonsfaktor k_1
≤ 6	meget sterk	0.75
6 - 8	sterk	0.85
8 - 15	normal	1.0
15 - 20	sprø	1.1
> 20	meget sprø	1.2

Rock Mass Cuttability Rating (k_2)

Sprekkeforholdene i bergmassen er av betydelig påvirkning for kuttekapasiteten til roadheader. Det er identifisert fire parametere som uttrykker betydningen av sprekkforholdene i bergmassen:

- Bergmassens trykkfasthet, (R_{UCS})
- Blokkstørrelse, (R_{BS})
- Sprekkes egenskaper (ruhet, sprekkåpning, vannforhold), (R_{JC})
- Sprekkesettens orientering, (R_{Ori})

På grunnlag av disse funnene har Restner og Gehring (2002) utviklet et klassifiseringssystem, Rock Mass Cuttability Rating (RMCR). Det tar hensyn til alle relevante sprekkforhold i bergmassen og baserer seg på prinsippene fra RMR-systemet, utviklet av Bieniawski (1973). RMCR uttrykkes med følgende formel:

$$RMCR = R_{UCS} + R_{BS} + R_{JC} + R_{Ori} \quad (4.4)$$

Videre følger det tabeller som viser en oversikt av ratingsystemene til parametrene i RMCR:

Tabell 4.2: RMCR for UCS (R_{UCS}).

UCS [MPa]	Rating
1 - 5	15
5 - 25	12
25 - 50	7
50 - 100	4
100 - 200	2
> 200	1

Tabell 4.3: RMCR for blokkstørrelse (R_{BS}).

Blokkstørrelse [m^3]	Rating
> 0,6	20
0,3 - 0,6	16
0,1 - 0,3	10
0,06 - 0,1	8
0,03 - 0,06	5
0,01 - 0,3	3
< 0,01	1

Tabell 4.4: RMCR for sprekkeforhold (R_{JC}).

Ruhet	Sprekkeåpning	Bergmasse/Sprekkevann	Rating
ru, bølgete	lukket	hard/tørr	30
	< 1 mm	hard/tørr	20
glatt, bølgete	< 1 mm	svak/tørr	10
ru, plan	1 - 5 mm	svak/fuktig	5
glatt, plan	> 5 mm	svak, vått	0

Tabell 4.5: RMCR for orientering til sprekkesett (R_{Ori}).

Orientering	Rating
meget gunstig	- 12
gunstig	- 10
middels	- 5
ugunstig	- 3
meget ugunstig	0

Verdien av RMCR fra Likning 4.4 blir brukt til å beregne korreksjonsfaktoren for sprekkeforholdene i bergmassen, k_2 . Kutterhodets rotasjonshastighet er av betydning for k_2 , men med jevn og relativt lav rotasjonshastighet benyttes følgende formel:

$$k_2 = 45.6 \cdot RMCR^{-0.9821} \quad (4.5)$$

Spenningsforhold (k_3)

Primære og sekundære spenninger kan i mange tilfeller ha betydning for kuttetekapasiteten med roadheader. Det er likevel begrenset med empirisk data som gir grunnlag for et ratingsystem. Så lenge det ikke er knyttet ekstrem spenningsproblematikk til prosjektet anbefaler Plenninger og Restner (2015) å benytte $k_3 = 1$.

Andre korreksjonsfaktorer (k_i)

Det er mulig å legge til andre korreksjonsfaktorer som tar hensyn til flere styrkeparametere i bergmassen eller spesifikke prosjektkriterier. I denne oppgavene benyttes ikke flere korreksjonsfaktorer.

4.2.3 Beregning av CR

Ved beregning av brutto inndrift tas det hensyn til alle sekundære arbeidsoppgaver i forbindelse med tunneldriving. Dette avhenger blant annet av omfanget ved driftsstopp, behov for sikringstiltak og arbeidspersonellets innsatsfaktor.

Erfaringsmessig mener Plenninger og Restner (2015) at det er fornuftig å uttrykke CR med følgende formel:

$$CR = 0.5 \cdot NCR_{eff} \quad (4.6)$$

4.2.4 SPC

Slitasje på kutterutstyret avhenger i stor grad av bergmassens motstandsdyktighet og hardhet. I tillegg er den mineralske sammensetningen av viktig betydning, spesielt kvartsinnholdet. Det er vanskelig å estimere SPC på forhånd, men generelt er det knyttet stor slitasje ved driving i hard og kvartsrik bergmasse, som gir høy SPC-verdi. Det medfører hyppige kutterbytter og kan påvirke fremdrift i betydelig grad (Gullon og Pacios, 2010).

Lav SPC-verdi er knyttet til effektiv og økonomisk drift i svak bergmasse. Da vil SPC-verdien typisk være 0,05 - 0,1 kutterenheter/m³. Dersom SPC-verdien er mellom 0,2 - 0,5 anses driving som kritisk, og dersom SPC overstiger 0,5 vurderes ikke driving med roadheader som økonomisk (Su og Akkas, 2019).

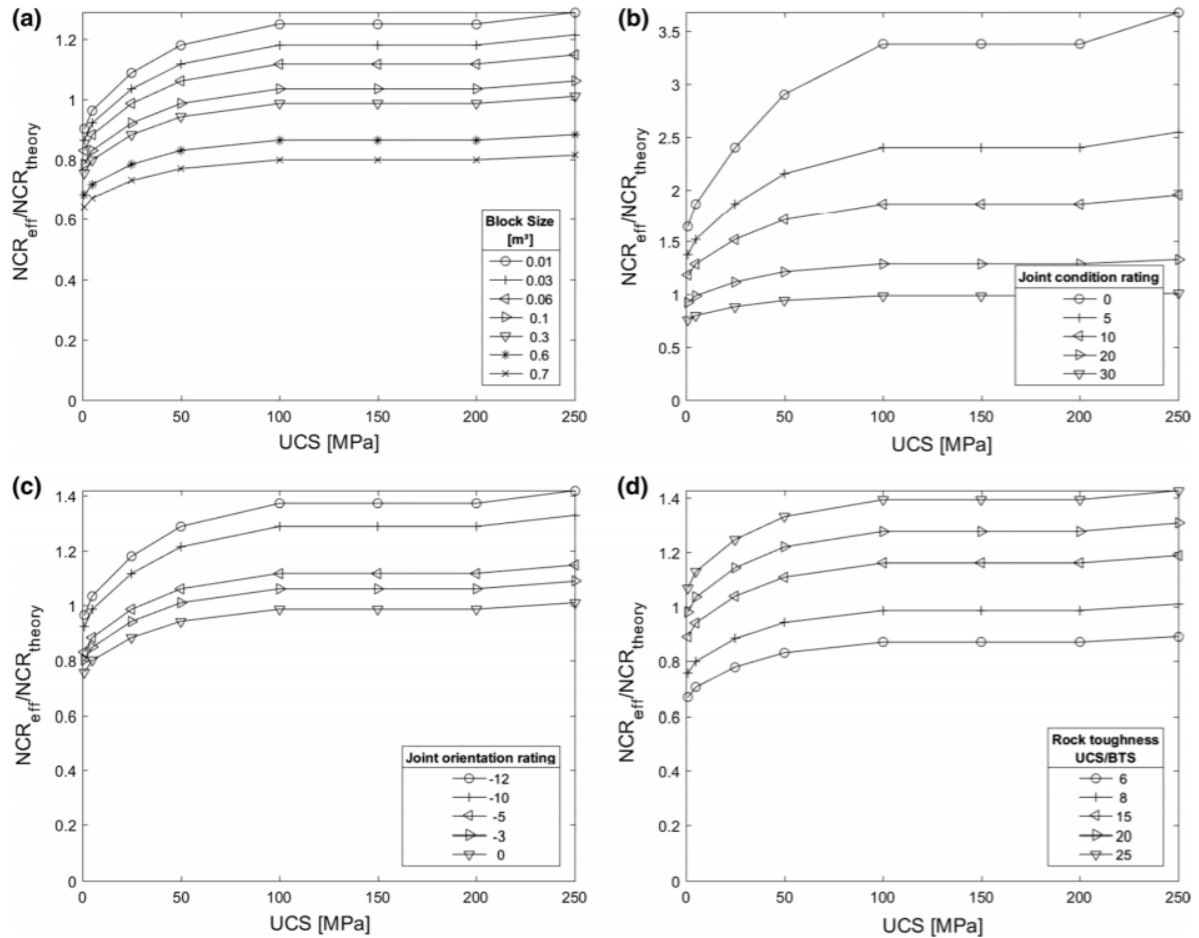
Ikke-geologiske faktorer som rotasjonshastighet og personellens kompetanse påvirker også slitasje på kutterenhetene. Høy rotasjonshastighet medfører høyere kutterslitasje. Samtidig er det avgjørende at personellet kjenner til hvordan kutterhodets bevegelsesmønster påvirker kutterslitasjen (Kotwica og Malkowski, 2019). Perfekt slitasje på kutterenhetene er vist i Figur 4.1, men slitasjen blir ofte mer ujevnt fordelt på kutterenhetene.



Figur 4.1: Perfekt slitasje på kutterenhet (Kotwica og Malkowski, 2019).

4.3 Betydningen av korreksjonsfaktorene

Korreksjonsfaktorene påvirker estimatet av effektiv kuttekapasitet i ulik grad. Betydningen av korreksjonsfaktorene kan vurderes ved å se på Relativ NCR, definert som forholdet mellom NCR_{eff} og $NCR_{teoretisk}$. I Figur 4.2 er det gjort en analyse av hvordan korreksjonsfaktorene påvirker Relativ NCR med hensyn til UCS. Analysen er hentet fra Hartlieb og Bock (2017).



Figur 4.2: Grafer som viser hvor stor betydning korreksjonsfaktorene kan ha på effektiv fremdrift (Hartlieb og Bock, 2017). Alle andre faktorer er satt til den mest ugunstige verdien i henhold til RMCR.

4.3 Betydningen av korreksjonsfaktorene

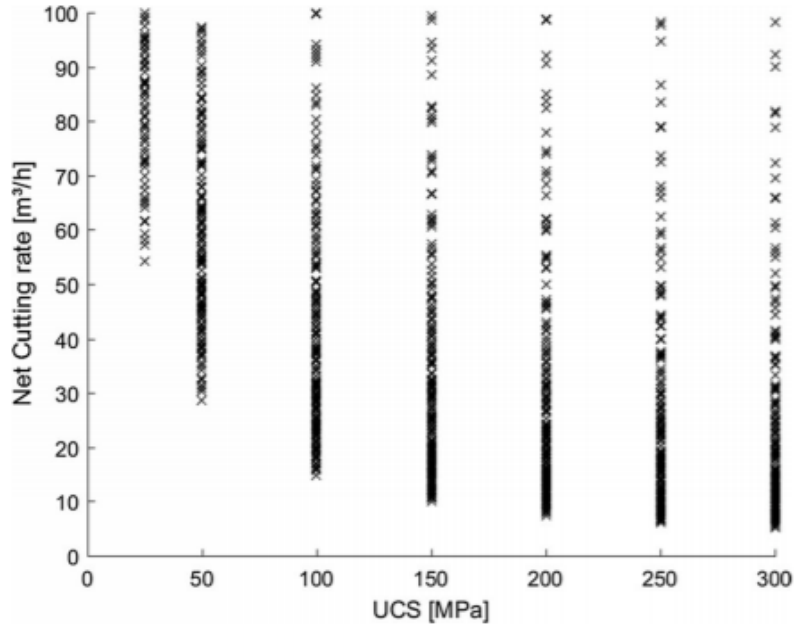
Figur 4.2a viser effekten av blokkstørrelsene som dannes av sprekkesystemene. I RMCR inkluderes blokkstørrelser fra $< 0,01 \text{ m}^3$ til $> 0,6 \text{ m}^3$. Det ses at større blokker ($> 0,1 \text{ m}^3$) har negativ effekt, og potensielt reduserer Relativ NCR opptil 20 %, uansett styrke i bergmassen. Ved sterk oppsprekking og mindre blokkstørrelse ($< 0,1 \text{ m}^3$) kan Relativ NCR øke opptil 20 %.

Sprekkeforholdene er en kompleks parameter å ta hensyn til, som er avhengig av flere forhold. I RMCR er denne parameteren tungt vektlagt i forhold til de andre parametrene. Figur 4.2b viser at gunstige sprekkeforhold kan bidra til 250 % økning i Relativ NCR ved sterk bergmasse.

Orienteringen til sprekkesettene påvirker ikke Relativ NCR i særlig negativ måte. Ved gunstig orientering kan Relativ NCR potensielt øke med 40 %, vist i Figur 4.2c.

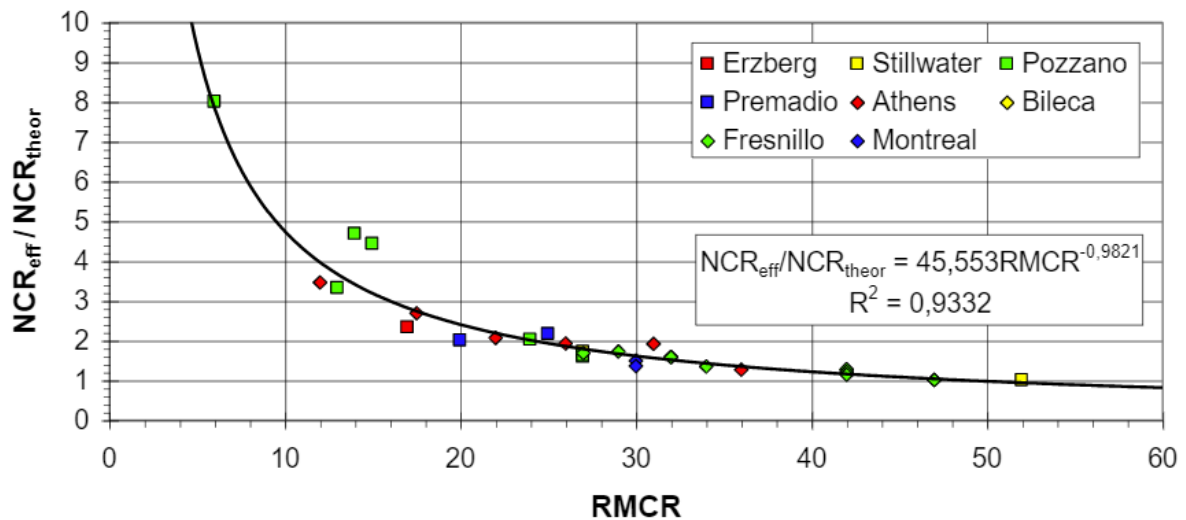
I Figur 4.2d vises det at bergmassens TC både kan ha positiv og negativ effekt på Relativ NCR. Sprø og lett knuselig bergmasse ($TC > 15$) er mest gunstig og kan potensielt øke Relativ NCR med 20 %. Motsatt kan Relativ NCR reduseres med inntil 25 % ved meget sterk og motstandsdyktig bergmasse.

Fra grafene i Figur 4.2 vises det at positiv effekt på Relativ NCR er størst i sterk bergmasse ($UCS > 100 \text{ MPa}$). Det betyr ikke at driften er effektiv og økonomisk, men at NCR_{eff} korrigeres i størst grad mot $NCR_{teoretisk}$ ved høye UCS-verdier. I realiteten er det lite sannsynlig å velge roadheader som drivemetode i gjennomgående sterk bergmasse, slik at tilfeller med maks effekt av korreksjonsfaktorene sjeldent vil forekomme. Dette illustreres av spredningsplottet i Figur 4.3, der variasjonene i NCR er stor innenfor like UCS-verdier, avhengig av bergmassens klassifisering i RMCR. De høye NCR-verdiene i sterk bergmasse vurderes ikke som veldig realistisk, selv om det teoretisk er mulig å oppnå effektiv driving i sterk bergmasse. Sonene med høyest tetthet i plottet bør være veiledende for forventet NCR, og viser at inndrift er svært begrenset ved de høyere UCS-verdiene.



Figur 4.3: Spredningsplott som viser hvordan NCR potensielt kan variere ved ulike UCS-verdier, avhengig av bergmassens klassifisering i RMCR (Hartlieb og Bock, 2017).

Samlet effekt av parametrene i RMCR illustreres i Figur 4.4. Det fremgår tydelig at RMCR-verdien har større betydning for Relativ NRC, desto lavere RMCR-verdien er.



Figur 4.4: Erfaringsdata som viser sammenhengen mellom Relativ NCR og RMCR (Pleninger og Restner, 2015).

4.4 Prognosemodellens validitet

Plenninger og Restner (2015) sin prognosemodell baserer seg på erfaringsdata fra internasjonale prosjekter. Validiteten i prognosemodellen avhenger blant annet av sikkerheten i inndataene og sammenligningsgrunnlaget med prosjektene som er lagt til grunn for å bygge modellen. Ved svært spesielle prosjektkriterier er sikkerheten i modellen mer usikker. I denne prognosemodellen er hovedparten av erfaringsdata hentet fra tunnelprosjekter på starten av 2000-tallet. Det kan tenkes at maskinene og kutterutstyret har hatt en teknologisk utvikling siden den gang og at ytelsen generelt er bedre med dagens maskiner og utstyr.

I det følgende kommenteres validiteten i utgangsparametrene.

4.4.1 NCR

NCR er knyttet direkte til roadheaders brytningsevne i bergmassen. $NCR_{teoretisk}$ gir noe vagt estimat, da den kun tar for seg én geologisk parameter. Ved varierende geologiske forhold er det ikke en representativ tilnærming. NCR_{eff} baserer seg på flere geologiske inngangsparametere og har bedre grunnlag for å gjøre representative vurderinger av kuttekapasitet. Geologiske variasjoner blir i større grad tatt hensyn til i RMCR-systemet.

Parametrene som ikke kan tallfestes direkte via testmetoder innebærer noe usikkerhet. Det gjelder til en viss grad for R_{JC} og R_{BS} , men spesielt for R_{Ori} i RMCR-systemet. Hva som skal defineres som "meget gunstig"orientering av sprekkesettene er vanskelig å forutsi og lite sannsynlig å klassifisere bergmasse som (Hartlieb og Bock, 2017). Det er heller ikke enkelt å bestemme blokkstørrelsen uten omfattende grunnundersøkelser. Sprekkeforholdene kan ved feltobservasjoner og grunnboringer klassifiseres på en god måte og har tydeligere ratingkriterier.

Kvartsinnholdet i bergmassen er erfaringsmessig viktig for kuttekapasiteten til roadheader. I prognosemodellen er dette ikke tatt hensyn til og vil være en betydelig usikkerhetsfaktor for estimatet. Kvartsinnholdet er også av viktig betydning for slitasjen på kutterenhetene og påvirker omfanget av sekundære arbeidsoppgaver i forhold til vedlikehold på kutterhodet.

For å vise de potensielle variasjonene i NCR er det nyttig å beregne et verst tenkelig tilfelle, et gjennomsnittlig tilfelle og et best tenkelig tilfelle. Da illustreres sikkerhet/usikkerhet i NCR på en oversiktlig måte og gir inntrykk av risiko med roadheader som drivemetode.

4.4.2 CR

Tidsomfanget av sekundære arbeidsoppgaver varierer fra prosjekt til prosjekt, og er avhengig av prosjektkriteriene. I Oslo må store deler av tunnelene forinjeseres og etableres med omfattende bergsikring, som er tidkrevende arbeidsoperasjoner. Det er derfor lite representativt å benytte Likning 4.6 som grunnlag for estimat av brutto inndrift i Oslo. Den baserer seg kun på NCR og tar heller ikke hensyn til kutterslitasje, som potensielt kan gi en del vedlikeholdsarbeid i krevende bergmasse.

Ideelt sett blir tidsforbruket ved de sekundære arbeidsoperasjonene beregnet i en prosess som er mer uavhengig av kuttekapasiteten til roadheader. Likning 4.6 innebærer en så stor usikkerhet og benyttes ikke som grunnlag for estimat av brutto inndrift i denne oppgaven. Tidsomfanget av sikringsarbeid er beregnet uavhengig av kuttekapasitet. Dette ses i Vedlegg B2.2.

5 Gjennomgang av grunnforhold

Dagens togtunnel i Oslo (Oslotunnelen) og den kommende togtunnelen vil i stor grad omfattede like grunnforhold. Geologiske undersøkelser og rapporter fra utbyggingen av Oslotunnelen benyttes som grunnlag for de geologiske vurderingene som gjøres i dette kapittelet. Bergmekanisk data fra relevante bergartsgrupper i Oslofeltet blir også presentert. Informasjonen brukes til å klassifisere bergmassen med hensyn til parameterne som benyttes i prognosemodellen for roadheader. Det fokuseres på grunnforholdene fra Oslo S til Skøyen, der Oslotunnelen er lokalisert og deler av ny togtunnel sannsynligvis vil gå.

5.1 Grunnforhold i Oslotunnelen

Fra Bane NOR (1980) er det gitt detaljerte beskrivelser av geologiske forhold fra forundersøkelsene og driving av Oslotunnelen. Tunnelen går vekselvis gjennom fjell og leire, men det er berggrunnsforholdene som er hovedfokuset i denne oppgaven. Tunnelen har følgende fordeling:

Tabell 5.1: Fordeling av leire og fjell i Oslotunnelen.

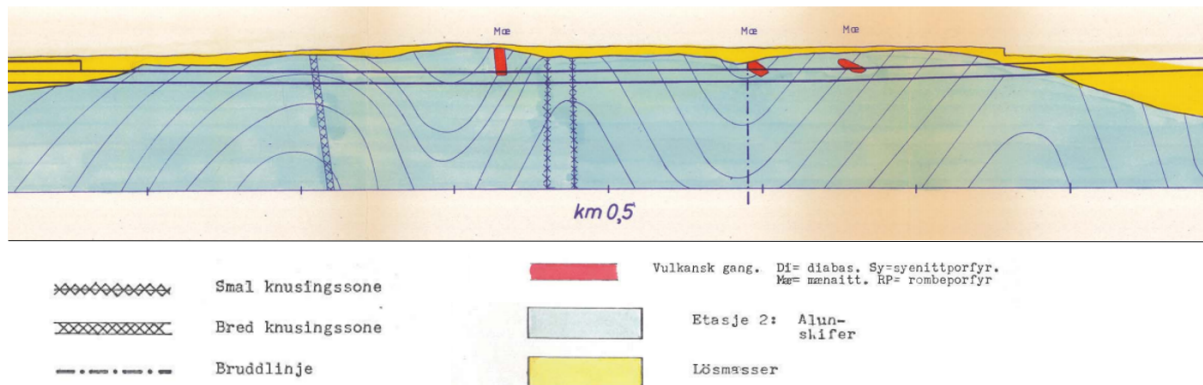
	Profilnr.	Grunnforhold
Jernbanetorget - Basarhallene	0 - 250 m	Leire
Basarhallene - Stortinget	250 - 850 m	Fjell
Stortinget - Nationaltheatret	850 - 1080 m	Leire
Nationaltheatret - Olavs Kyrre Plass	1080 - 3500 m	Fjell
Olavs Kyrre Plass - Vestre Portal	3500 - 3800 m	Leire

Berggrunnskart over Osloregionen er lagt ved i Vedlegg A.

5.1.1 Basarhallen - Stortinget (250 - 850 m)

Bergarter og bergartsfordeling

I østre deler av Oslotunnelen består berggrunnen hovedsaklig av alunskifer, etasje 2. Lagene er foldet og bøyd i flere retninger. Tre større vulkanske ganger av mænaitt er fremtredende i heng av tunnelen (Figur 5.1). Tabell 5.2 beskriver av bergartenes karakteristikk.



Figur 5.1: Geologisk lengdeprofil, Basarhallen - Stortinget (Bane NOR, 1980).

Tabell 5.2: Bergartsfordeling og beskrivelse av bergmassens egenskaper fra Basarhallen - Stortinget.

Bergart	Samlet lengde	Karakter
Alunskifer	580 m	<ul style="list-style-type: none"> - Tettskifrig, bløt og ensartet. - Spaltbarhet følger skifrihetsflatene. - Høyt karboninnhold. - Varierende sprekkeretninger. - Lite sprekkevann. - Liten borslitasje.
Mænaitt	20 m	<ul style="list-style-type: none"> - Massiv - Moderat oppsprekking og noe sprekkevann. - Linser og bånd parallelt med skifriheten og flere større linser som er tettliggende.
	600 m	

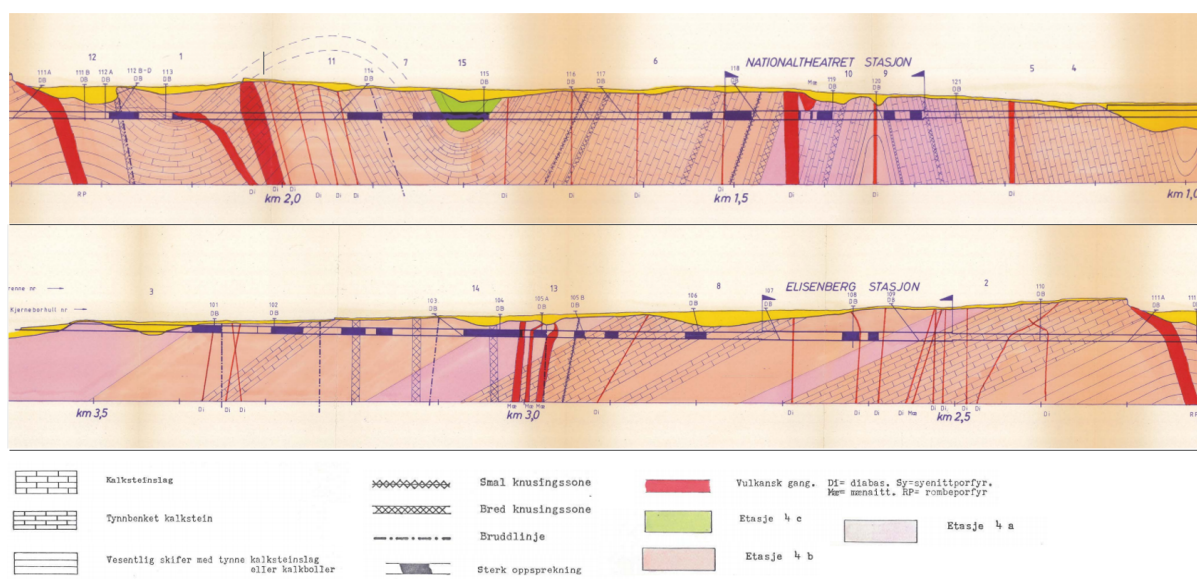
Forkastninger og knusingssoner

På det geologiske lengdeprofil (Figur 5.1) er det registrert fire forkastninger og knusingssoner. Disse er vanskelig å observere i tunnelen, grunnet alunskiferens bløthet. Bredden varierer fra 1,5 - 3 m og fjellet er løst i disse sonene.

5.1.2 Nationaltheatret - Olav Kyrres plass (1080 - 3500 m)

Bergarter og bergartsfordeling

I vestre del av Oslotunnelen er berggrunnsforholdene varierende. Kalksteiner og skifre forekommer vekselvis langs traséen, med flere vulkanske ganger som er gjennomskjærende, hovedsaklig diabas og mænaitt. Rombeperfyrr er registrert ved ett tilfelle. Lagene av skifre og kalksteiner er presset, foldet og satt på skrå. Tunnel krysser to antiklinaler og to synklinaler, slik at samme etasjer forekommer flere steder. Figur 5.2 viser geologisk lengdeprofil for strekningen og Tabell 5.3 gir en samlet oversikt av bergartenes karakter og omtrentlig fordeling.



Figur 5.2: Geologisk lengdeprofil, Nationaltheatret - Olav Kyrres plass (Bane NOR, 1980).

Tabell 5.3: Fordeling og beskrivelse av bergartene fra Nationaltheatret - Olav Kyrres gate.

Bergart	Samlet lengde	Karakter
Kalksteiner	1195 m	<ul style="list-style-type: none"> - Stiv og hard bergmasse - Opptrer tykkbenket og homogen i østre deler, mer skifrig og varierende tykkelse i vestre deler. - Tydelig spaltbarhet. - Liten borslitasje
Skifre	995 m	<ul style="list-style-type: none"> - Generelt skifrig fjell. - Vanskelig å skille fra tynnbenket kalkstein. - Liten borslitasje
Diabas	165 m	<ul style="list-style-type: none"> - Sterk og massiv. - 25 kryssende ganger. - Mektighet varierer fra noen cm til flere meter. - Gangene har varierende orientering. - Høy borslitasje i enkelte ganger.
Syenitt/ mænaitt	45 m	<ul style="list-style-type: none"> - 6 kryssende ganger. - Som regel tynne ganger, men opptrer av og til med stor mektighet. - Høy borslitasje i enkelte ganger.
Rombeporfyr	20 m	<ul style="list-style-type: none"> - Forekommer som én gang i tunnelen. - Stor mektighet.
	2420 m	

Oppsprekking og innlekkasjer

Sprekkeforholdene i berggrunnen mellom Nationaltheatret og Olav Kyrres er varierende og endrer seg brått seg innenfor korte distanser. Generelt er berggrunnen moderat oppsprukket, men fra Figur 5.2 ses det at tunnelen har flere partier med sterk oppsprekking. Samlet er 25 - 30 % av strekningen klassifisert som sterkt oppsprukket. Innlekkasjer har også en tendens til å forekomme i forbindelse med sterk oppsprekking. Tabell 5.4 gir en beskrivelse av bergartenes

sprekkeforhold.

Tabell 5.4: Beskrivelse av sprekkforhold for bergartene.

Bergart	Oppsprekking	Innlekkasjer
Kalkstein	<ul style="list-style-type: none"> - Moderat - sterk oppsprekking. - Noen kryssende sprekkesett som gir ”firkantet” oppsprekking. - Foliasjonen dominerende sprekkesett. 	<ul style="list-style-type: none"> - Oppsprekkingen gir gode betingelser for vann i sprekkene. - Noe vanntilførsel gjennom gangbergartene. - Flere større innlekkasjer registrert.
Skifer	<ul style="list-style-type: none"> - Moderat oppsprekking. - Foliasjonen dominerende sprekkesett. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tett og impermeabel. - Noe vanntilførsel gjennom gangbergartene. - Drypp og fuktighet, ingen større innlekkasjer registrert.
Diabas	<ul style="list-style-type: none"> - Liten - sterk oppsprekking. - Varierende orientering. 	<ul style="list-style-type: none"> - En del vann i sprekkene. - Større innlekkasjer registrert.
Syenitt/ mænaitt	<ul style="list-style-type: none"> - Sterk oppsprekking. 	<ul style="list-style-type: none"> - En del vann i sprekkene. - Større innlekkasjer registrert.
Rombeporfyr	<ul style="list-style-type: none"> - Sterk oppsprekking. 	<ul style="list-style-type: none"> - Noe vann i sprekkene.

Forkastninger og knusingssoner

Flere forkastninger og knusingssoner er registrert langs traséen. Forkastningene har liten mektighet og byr ikke på store stabilitetsproblemer. Knusingssonene har varierende mektighet fra noen cm til flere meter. Fjellet er løst i disse sonene og kan i noen tilfeller gi stabilitetsproblemer.

5.2 Styrkeparametere

Bergartsgruppene langs Oslotunnelen er av varierende og ulik styrke. I denne oppgaven er UCS og BTS relevante styrkeparametere som benyttes i videre vurderinger. Tabell 5.5 presenterer en oversikt over styrkeegenskapene til bergartsgruppen. Dette er testresultater fra Oslofeltet, men eksakt posisjon vites ikke. I tillegg varierer antall testresultater innenfor bergartene. Det kan derfor tenkes at verdiene innebærer noe usikkerhet.

For kalkstein, diabas og rombeporfyr er ingen BTS-verdier tilgjengelig. De andre bergartene har også svært begrenset antall testresultater tilgjengelig, bare én for hver bergart. Derfor blir det også oppgitt korrelerte BTS-verdier i Tabell 5.5, som baserer seg på Altindag og Guney (2010) sin korrelasjonsmodell, presentert i 5.2.1.

Tabell 5.5: Oversikt over relevante styrkeparametere for bergartene i Oslo (Grøv, 2021; Neby, 2021)

Bergart	UCS [MPa]	BTS [MPa]	BTS* [MPa]
Skifer	23 - 119	5,5	1,6 - 8,2
Alunskifer	26 - 135	4,9	2,0 - 9,3
Kalkstein	20 - 206	-	1,6 - 13,8
Diabas	49 - 241	-	3,6 - 15,9
Syenitt/mænaitt	92 - 349	7,5	6,5 - 22,5
Rombeporfyr	64 - 167	-	4,6 - 12,5

* Angir verdier som baserer seg på Altindag og Guney (2010) sin korrelasjonsmodell.

5.2.1 Bestemmelse av BTS*

Med et svært begrenset datagrunnlag for BTS-verdier, er det nyttig å bruke korrelasjonsmodell for å få et bilde av verdier som kan være sannsynlig. Hensikten er å bestemme BTS*-verdi basert på UCS-verdi. Ifølge Hansen (2018) er den mest presise korrelasjonen gitt fra Altindag og Guney (2010), som presenterer følgende formel:

$$BTS^* = \left(\frac{UCS}{12.38}\right)^{1.00/1.0725} \quad (5.1)$$

Denne korrelasjonen innebærer noe usikkerhet og kan ikke vurderes som like presis som laboratorietest. BTS-verdiene har samtidig ikke stor påvirkning på resultatet fra prognosemodellen, slik at dette er en minimal feilkilde. I Tabell 5.5 er variasjonsområdet for BTS*-verdiene oppgitt, basert på alle tilgjengelige UCS-verdier fra Oslofeltet.

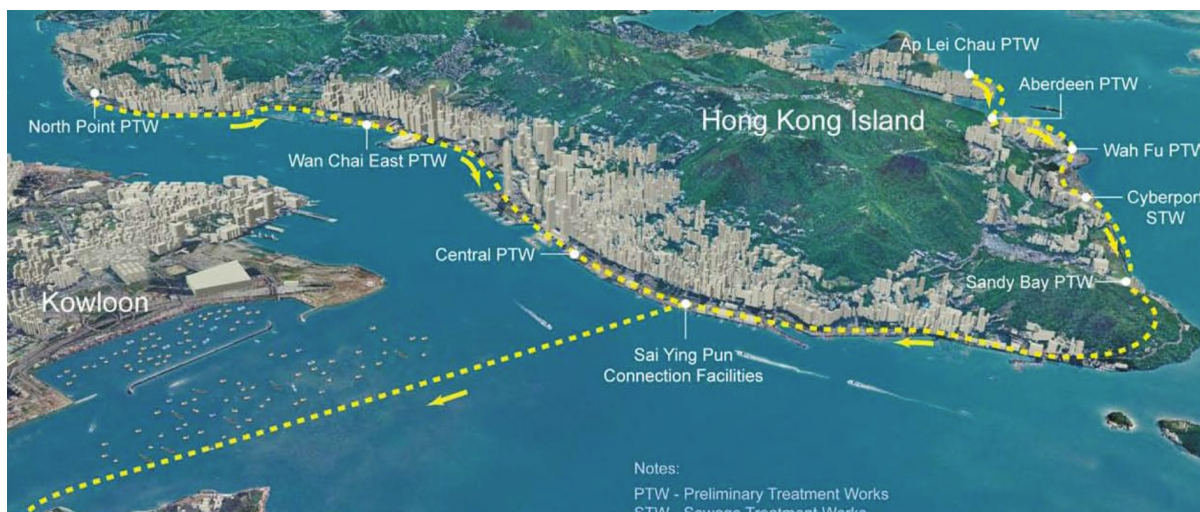
6 Liknende prosjekter

I Hong Kong og Sydney drives lange tunneler med svært begrenset størrelse på anleggsplassene. Likevel holdes byene i gang uten store ulemper for samfunnet. Samtidig bygges stadig flere tunneler tett på annen infrastruktur, der eksplosive metoder ikke kan brukes. Roadheader er potensielt en attraktiv drivemetode ved slike problemstillinger.

Videre i dette kapittelet blir erfaringer fra anleggsgjennomføring i Hong Kong og Sydney gjennomgått. Hensikten er å undersøke hvordan tunnelene drives på en effektiv og skånsom måte med svært begrenset anleggsplass. Samtidig er det sett på data fra prosjekter med roadheader som drivemetode, for å illustrere mulighetene og begrensingene som er med drivemetoden.

6.1 HATS2A

I 2015 ble 21 km avløpstunnel i Hong Kong ferdigstilt (Figur 6.1). Tunnelen ble bygget 150 m under svært tett bebygd overflate, og delvis under sjøen. D&B ble benyttet som drivemetode blant annet av hensyn til lavere geologisk risiko og fleksibel anleggsgjennomføring, sammenlignet med TBM (HATS, 2005).

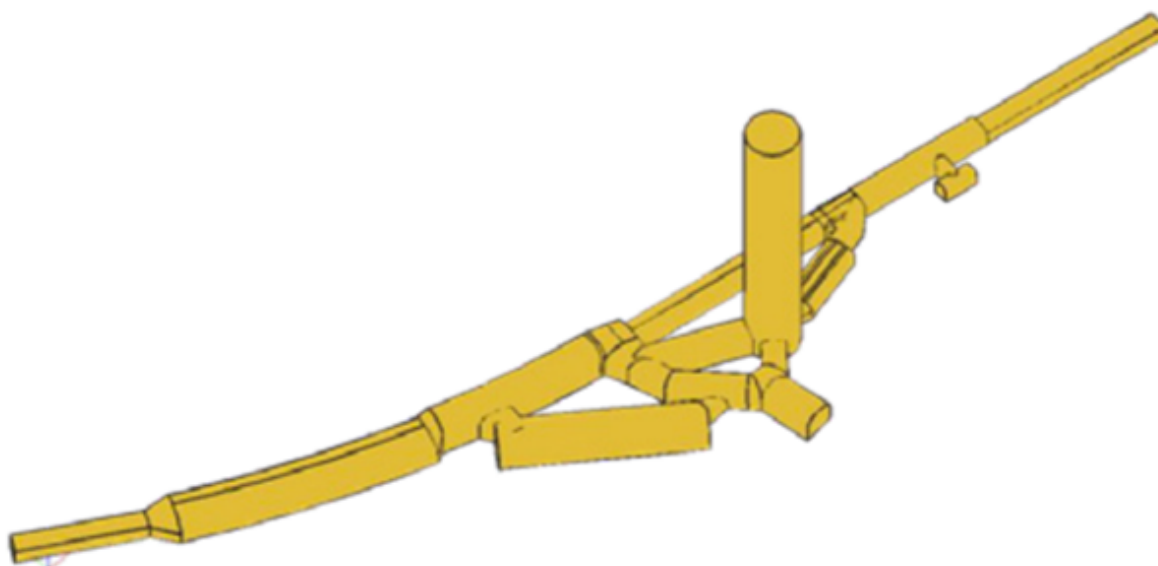


Figur 6.1: Tunneltraséen på HATS2A (Brox, 2015).

6.1.1 Anleggsgjennomføring

Norske LNS var entreprenør for 7,5 km av avløpstunnelen, fra Aberdeen til Sai Ying Pun. Anleggsgjennomføringen for denne delen blir gjennomgått. Informasjonen er hentet fra Brox (2015) og Brox (2020).

For å drive 7,5 km tunnel ble 5 sjakter med diameter 5 - 12 m etablert. Det ble skilt mellom produksjonssjakter (der tunneldriften foregikk fra) og ventilasjonssjakter. Dybden på sjaktene varierte fra 80 til 125 m. Med kran på overflaten kunne all logistikk til og fra tunnelen foregå via produksjonssjaktene. I dagen varierte tilgjengelig riggplass for produksjonssjaktene fra 388 til 4349 m². Grunnet store plassbegrensninger, ble infrastruktur etablert i bunnen av alle produksjonssjaktene, illustrert i Figur 6.2. Infrastrukturen ble brukt til verksted, mellomlagring av stein og oppbevaring av maskiner og utstyr. Etter driving måtte infrastrukturen fylles igjen med betong, slik at det var ønskelig å bygge arealeffektiv infrastruktur.



Figur 6.2: Illustrasjon av infrastruktur i bunn av sjaktene på HATS2A (Brox, 2015).

Grunnet strenge krav fra myndighetene i Hong Kong var massetransport ut av anleggsområdet kun tillatt kl. 0700 - 1900. På grunn av produksjonssjaktene ble små containere kontinuerlig fylt med steinmasser og heist opp av sjakten innenfor tidsrommet. Massene ble fraktet videre på lektere som lå til havn i umiddelbar nærhet. Med begrensningene for massetransport var det avgjørende å ha mulighet til å lagre steinmasser i tunnelen og noe innenfor anleggsområdet på overflaten. Da ble ikke øvrig arbeid hindret av de begrensende muligheten for massetransport, og fremdrift opprettholdt. Over produksjonssjaktene ble støydempende overbygg etablert. Dette bidro til å ha minimalt med støy fra sjaktene.

6.1.2 Erfaringer fra HATS2A

For å drive tunnel fra dype sjakter er det nødvendig å etablere god infrastruktur på grunn av sjaktene. Infrastrukturen må være arealeffektivt, men sørge for enkel logistikk. Med drift i to retninger fra én sjakt er mye transport sentrert mot sjakten. En sjakt har ikke samme kapasitet til å frakte sprengte steinmasser, sammenlignet med massetransport med lastebiler/transportbånd på ett plan. Mulighet til å oppbevare steinmasser i grunn av sjaktene er viktig for at andre arbeidsoppgaver ikke forsinkes. Samtidig blir ikke plassbegrensningene i dagen et stort problem når mye av arbeidet kan flyttes under bakken, og anleggsplassen er i umiddelbar nærhet til lekertransport.

6.2 West Connex M4-M5 Link, Sydney

West Connex M4-M5 Link i Sydney innebærer 7,5 km vegtunnel og skal være ferdigstilt innen 2022. Tunnelen er etablert med roadheader som dominerende drivemetode og til sammen er 21 roadheadere benyttet for to løp med fire felt. Grunnet tett bebyggelse på overflaten var det ønske om å minimere bruk av eksplosive metoder og begrense anleggsområdene i dagen (Rowland, 2021). Samtidig består store deler av bergrunnen av svake sandsteiner som gjør roadheader til en egnet drivemetode.

Anleggsgjennomføring og erfaringer med roadheader blir gjennomgått.



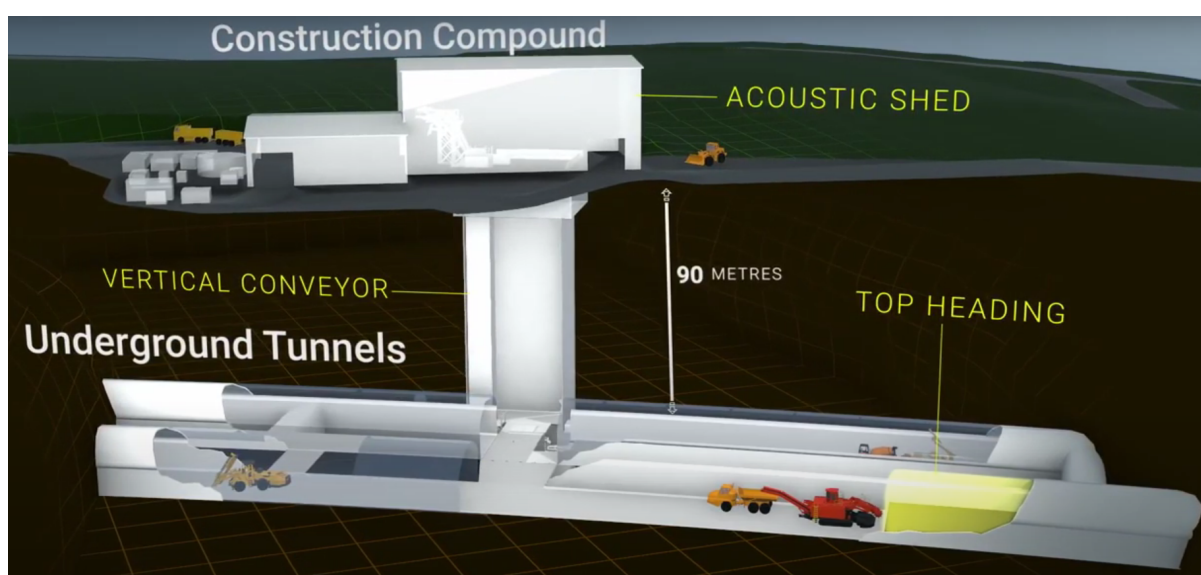
Figur 6.3: Mørk blå tunneltrasée viser West Connex M4-M5 Link (Rowland, 2021).

6.2.1 Anleggsgjennomføring

I tillegg til tunnelpåhuggene i dagen, er det etablert sjakt som angrepspunkt midtveis i tunnelen. På den måten kan hvert tunnellop drives fra fire stuffer. I tre - fire deler blir roadheaderen heist ned og montert i bunn av sjakten. For å håndtere trafikk av maskiner, utstyr og masser er det etablert ekstra rom for infrastruktur i bunn av sjakten. Det innebærer rom til knusemaskiner som knuser steinen i mindre fraksjoner, før det fraktes videre på et vertikalt transportbånd i sjakten (West Connex, 2021). Det er avgjørende for at det vertikale transportbåndet skal være

driftssikkert og ha kontinuerlig massetransport med liten slitasje. Ventilasjonssystemer må også etableres i sjakten for å transportere støv og forurenset luft ut av tunnelen.

I dagen er det etablert et støydempende overbygg over sjakten. Det gjør at mange arbeidsoppgaver kan utføres uten at det ytre miljøet påvirkes i betydelig grad, samtidig er det avgjørende for at tunneldriften kan utføres 24/7. I overbygget oppbevares maskiner og utstyr som må være tilgjengelig, i tillegg samles massene fra transportbåndet før videre transport med lastebiler (West Connex, 2021). Figur 6.4 illustrerer konstruksjonene for anleggsgjennomføring via sjakt på West Connex M4-M5 Link.



Figur 6.4: Illustrasjon av anleggsgjennomføring fra sjakt (West Connex, 2021)

Fordelt på flere angrepspunkter er 21 roadheadere benyttet på det meste. Tverrsnittet er så bredt at to roadheadere kan drive side om side på stoff. I tillegg etableres tverrforbindelser, nisjer og utvidelse av kaverner med roadheader (West Connex, 2021). På det meste er to - tre roadheadere i drift i forbindelse med hvert angrepspunkt i tunneløpene.

6.2.2 Erfaringer med roadheader

I en firefeltstunnel er tverrsnitt bredt og høyt. Bredden er uproblematisk å håndtere, fordi roadheader kan flyttes sideveis. I høyden har roadheader begrenset rekkevidde og krever at høyere tverrsnitt må brytes med "benching-metoden" (Figur 6.5). "Benken" må aldri drives helt fram til stoff, men ha en størrelse og form som gjør at roadheader alltid kan forsette inndriften i

øvre del av tverrsnittet, etter at lengden på ”benken” er kortet ned. Det er også avgjørende for at bergsikring kan installeres tett på stoff ved behov (West Connex, 2021).

På West Connex M4-M5 Link foregår tunnelarbeidet 24/7. Overdekning er over 20 m gjennom hele tunnelen, slik at støy og vibrasjoner fra tunneldriften ikke er forstyrrende for det ytre miljøet. Inndrift har vært på ca. 20 - 25 m/uken fra hver stoff (West Connex, 2021).



Figur 6.5: Illustrasjon av prinsippet med ”benching-metoden” på West Connex M4-M5 Link (West Connex, 2021). ”Benken” må ha en jevn stigning for at roadheaderen skal komme til i øvre del av tverrsnittet.

Deler av strekningen på M4-M5 Link har ikke vært mulig å drive med roadheader, grunnet sterkere berggrunn er antatt. D&B har derfor erstattet driving med roadheader, for å opprettholde planlagt fremdrift (Rowland, 2021). Slike situasjoner illustrerer begrensingene og uforutsigbarheten med roadheader som drivemetode. En omstilling til D&B kan likevel skje effektivt, så lenge nødvendige maskiner og utstyr er tilgjengelig og arbeidspersonellet har kompetanse innen begge drivemetodene.

6.3 Montreal Metro

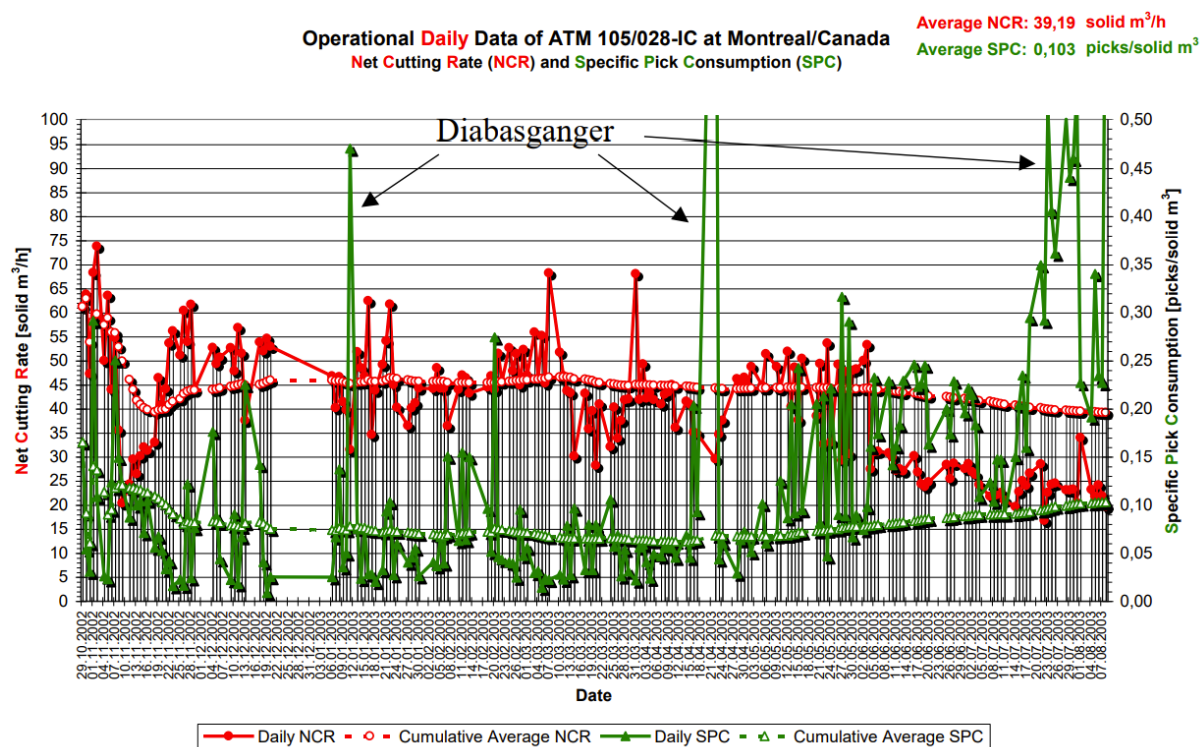
I 2002 ble ny metrotunnel i Montreal bygget med roadheader og D&B som drivemetoder. Driving tett på sensitiv infrastruktur og lav bergoverdekning gjorde at ikke-eksplosiv drivemetode måtte benyttes på deler av tunnelen.

Tunnelen går hovedsakelig gjennom vekslende lag av kalkstein og skifer, men med noen gjennomskjærende ganger av diabas. UCS i kalkstein- og skiferlagene varierte opptil 90 MPa, mens de sterkeste diabasgangene hadde UCS opptil 270 MPa. Data og informasjon fra prosjektet er fra Restner og Reumueller (2004).

6.3.1 Erfaringer med roadheader

Driving med roadheader resulterte i skånsom og effektiv inndrift i store deler av tunnelen. Gjennomsnittlig inndrift med roadheader oppgis til 8 m/dag, hovedsakelig i kalkstein og skiferbergarter. I diabasgangene oppstod det langt mer slitasje på kutterutstyr og forsinkelse i driving. Konvensjonell boring og sprenging måtte derfor benyttes for de mektigste diabasgangene.

I Figur 6.6 ses det hvordan SPC endrer seg med NCR, og hvor sensitiv SPC er for harde diabasganger. Det registreres store variasjoner i NCR og SPC. Det illustrerer sensitiviteten ovenfor bergmassens egenskaper.



Figur 6.6: Framstilling av NCR og SPC pr. dag for roadheader på Montreal Metro (Restner og Reumueller, 2004).

Under driving var det ikke registret problemer med å overholde støy- og vibrasjonsgrensene i forbindelse med bruk av roadheader. Stabilitetsproblemer og dannelse av nye sprekker opplevdes ikke som en utfordring og bidro til å redusere sikringsomfanget, sammenlignet med de sprenge delene av tunnelen. Gjennomsnittlig avvik til teoretisk tverrsnitt var 8 cm ved bruk av roadheader, mens D&B resulterte i 40 cm avvik. Figur 6.7 viser forskjellen i konturkvalitet ved bruk av roadheader kontra D&B.



Figur 6.7: Forskjell i konturkvalitet mellom roadheader (venstre) og D&B (høyre) på Montreal Metro (Restner og Reumueller, 2004).

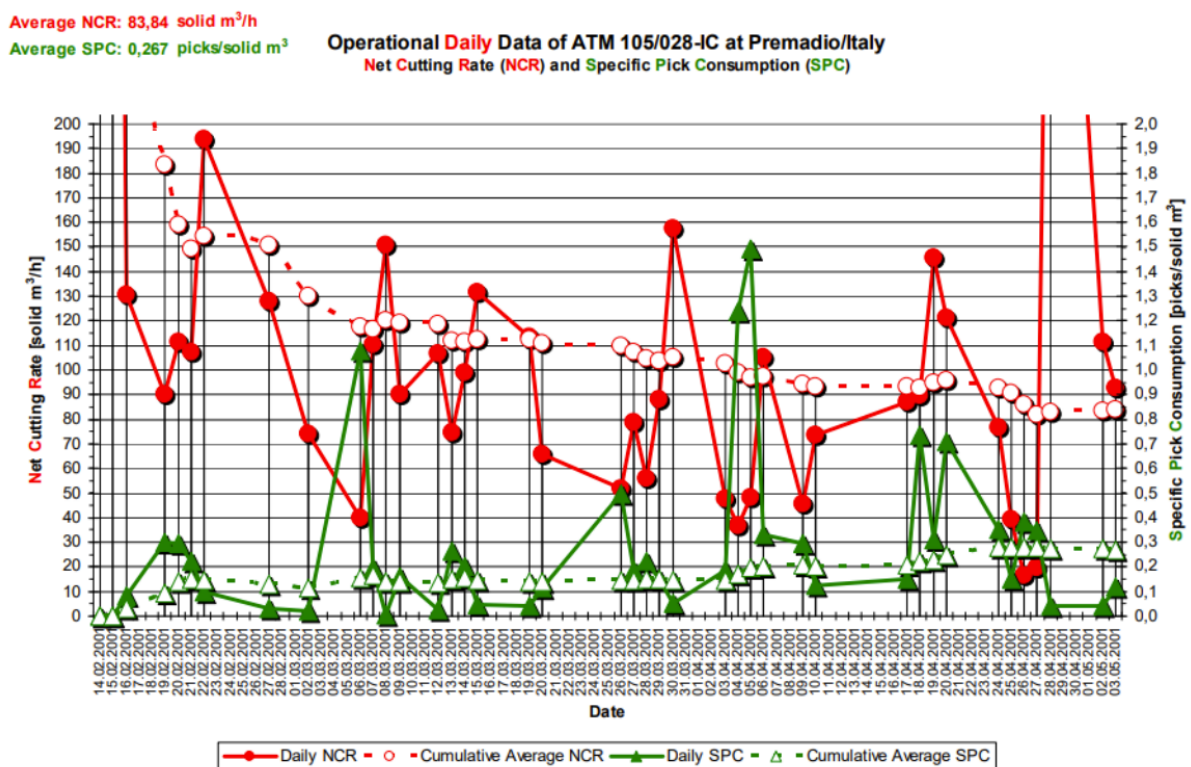
6.4 Premadio II, Bormio

I forbindelse med utvidelse av Premadio vannkraftverk i 2001 ble roadheader benyttet til å etablere 130 m ankomsttunnel, en monteringshall til TBM og utvidelse av eksisterende kaverne. Grunnet instabiliteter i taket på eksisterende kaverne, ble det lagt krav om å bruke ikke-eksplosive drivemetoder for hele prosjektet. D&B ble vurdert som risikabelt under slike forhold.

Geologien i området domineres av gneis- og skiferbergarter av ulik kvalitet. UCS varierer fra 27 - 129 MPa. Data og informasjon er mottatt fra Sandvik (2001).

6.4.1 Erfaringer med roadheader

For den 130 m lange adkomsttunnelen er det registrert store variasjoner i NCR og SPC (Figur 6.8). NCR er relativt høy ved gunstige berggrunnsforhold, men samtidig er det store variasjoner innenfor korte distanser. De hardeste berggrunnspartiene medfører svært høy slitasje på kutterutstyret, selv om NCR har akseptable verdier.



Figur 6.8: Framstilling av NCR og SPC for driving av adkomsttunnel til TBM (Sandvik, 2001).

Med dataene fra Figur 6.8 beregnes fremdrift til ca. 3 m/dag. For et prosjekt som bygges tett på annen infrastruktur kan det være akseptabel inndrift. På større prosjekter med strengere tidsfrister stilles nok strengere krav til inndrifter for å gjøre det mer økonomisk.

NCR er varierende, fra svært høye til lave verdier. Det illustrer uforutsigbarheten med roadheader og behovet for detaljerte grunnundersøkelser i planleggingsfasen. I Figur 6.8 ses det at NCR-verdien er nedtil 20 m³/kuttetime. Det er viktig at strekningene med så lave NCR-verdier minimeres. SPC-verdiene viser at det sannsynligvis er knyttet en del tid til vedlikehold og bytte av kutterenheter.

Til slutt er det nyttig å se at driving med roadheader vurderes som mindre risikofylt for skader på nærliggende bergrom og bebyggelse kontra D&B. Det viser at fremdrift og kostnader ikke bør være ensbestemmende kriterier i valg av drivemetode, spesielt for tunnelprosjekter tett på annen infrastruktur.

7 Anleggsgjennomføring

Dette kapittelet tar for seg anleggsgjennomføring med roadheader og andre løsninger som kan være aktuell på ny tog tunnel i Oslo.

7.1 Tidsfordeling arbeidsoppgaver

Tunneldrift med roadheader består hovedsaklig av kutteprosessen, installasjon av sikringstiltak og massetransport. Av dette arbeidet klassifiseres kutteprosessen, boring i fbm. sikringstiltak og massetransport med hjullastere og dumpere som støyende arbeid. I urbane områder som Oslo må dette utføres mellom 07:00 - 22:00 (Statens vegvesen, 2002).

Med systematisk injeksjon som en viktig arbeidsprosess, er det nyttig å planlegge driften slik at ikke-støyende arbeid foregår om natten. Dvs. at kutteprosessen, boring av injeksjonshull og boltehull er mest ideelt å utføre om dagen, mens innpumping av injeksjonsmasse og installasjon av bolter, sprøytbetong mm. bør utføres på natt. Da kan sement/betong herdes i løpet av natten. På den måten brukes det ikke tid på ikke-støyende arbeid under perioden for støyende arbeid, og driften effektiviseres i større grad. Det er likevel vanskelig å planlegge og forutse alle hendelser i et tunnelprosjekt, slik at det er naturlig om det oppstår avvik. I praksis er det f.eks. vanlig å installere boltene kort tid etter boltehullene er boret (Statens vegvesen, 2002).

Massetransport skjer parallelt med kutteprosessen. Dette inngår derfor i arbeidstimene til kutteprosessen og har ideelt sett ingen påvirkning på fremdrift i tunnelen. Vedlikehold av roadheader og bytte av kutterenheter skjer med fordel når sikringsarbeid og boring utføres, evt. om natten.

7.2 Anleggsområder

I Oslo sentrum er det svært begrenset plass til å etablere anleggsområder. Det betyr at det må legges til rette for mindre og mer arealeffektive anleggsområder, enn i utenforliggende strøk. Roadheader krever relativt liten plass for montasje og utførelse av tunnelarbeid, men det skal driftes flere maskiner på anlegget, i forbindelse med injeksjon og installasjon av sikringstiltak. Sjakter som angrepspunkter kan bidra til effektive løsninger.

7.2.1 Tunneldrift via sjakt

I urbane strøk er det flere fordeler med sjakter som angrepspunkter. Mye av arbeidet kan flyttes fra overflaten til undergrunnen, slik at maskiner og annet utstyr er mindre synlig i byen. Det gjør at anleggsarealene i dagen kan minimeres, men det kreves samtidig god logistikk gjennom sjakten, normalt med et kransystem over sjakten (Rowland, 2021). Ventilasjonssystemer må også etableres, men opptar liten plass i sjakt og på anleggsområdet. Figur 7.1 viser eksempel på oppsett ved TBM som drivemetode. Det samme prinsippet kan benyttes for roadheader og D&B.

Med strenge krav til støy og andre forstyrrelser er det fordelaktig å etablere støydempende overbygg over sjakten. Først og fremst er det gunstig for det ytre miljøet, men det kan også gjøre at flere arbeidstimer tillates pr. dag (Rowland, 2021). Om kveldstid/natt er det nyttig å oppbevare tunnelmassene innenfor overbygget, dersom massetransport ut av anlegget ikke tillates.

I bunn av sjaktene må enkel og effektiv infrastruktur etableres. Det bidrar til bedre logistikk for trafikk i tunnelen og er nødvendig for oppbevaring av masser, maskiner og annet utstyr. I tillegg er det fordelaktig om vedlikehold og represjon av maskiner kan skje i sjakten, og ikke er avhengig av å heises opp og ned av sjakten. Utvidelsene som etableres i forbindelse med tunneldriften bør være minst mulig, med mindre det får en nyttig funksjon etter tunnelen er ferdigstilt. En sjakt med diameter 10 - 16 m er ofte stor nok, så lenge infrastruktur etableres i bunn (Brox, 2015). Anleggsområdet i dagen trenger dermed ikke å oppta stor plass (Figur 7.1).



Figur 7.1: Eksempel på oppsett for tunneldrift fra sjakt. I dagen er det behov for kran, system for massetransport og mindre ventilasjonsanlegg (Tunnel Business Magazine, 2019).

7.3 Massetransport

Tunneldriving medfører store mengder masser som skal fraktes ut av tunnelen. I planlegging av massetransport er det viktig å legge vekt på å minimere miljø- og samfunnsbelastningen, samtidig som det bør være tids- og kostnadseffektivt. I Oslo må alunskifer spesialhåndteres, men dette diskuteres ikke videre. Flere alternativer for massetransport kan være aktuelt:

Transportbånd

Bruk av transportbånd er et godt alternativ for massetransport i urbane områder. Det er effektivt, miljøvennlig og bidrar til lavere CO₂-utslipp fra anleggsplassen (Tunnel Business Magazine, 2019). Det forutsetter samtidig at massene ikke har for store fraksjoner og ikke medfører høy slitasje på transportbåndet.

Med roadheader som drivemetode er blokkstørrelsene generelt liten, men det vil påvirkes av bergmassens oppsprekking (Tatiya, 2005). I Oslo er store deler av berggrunnen sterkt oppsprukket og de sedimentære bergartene er skifrig. Det kan tenkes at hovedandelen av

massene er av mindre størrelser, som fanges inn på transportbeltet til roadheader. Det er også gunstig ved bruk av vertikale transportbånd i sjakt, da alle massene må være av mindre fraksjoner (Figur 7.2). Større stein kan ikke fraktes på transportbånd og må knuses før videre transport, eventuelt fraktes i containere med kran. Det bør være en betydelig mengde med større stein for at knusemaskin skal vurderes. En knusemaskin bidrar til mye støy, støv og dårligere arbeidsmiljø i tunnelen (Ludt, 2015).

Transportbånd i tunnel og sjakt vil være gunstig uansett anleggsplassering, men for videre transport i dagen bør distansen fra anlegget til neste stoppested være minst mulig. I Oslo sentrum er det ingen deponi eller muligheter for gjenbruk i umiddelbar nærhet. Bruk av transportbånd i dagen anses som mest sannsynlig i kombinasjon med lekertransport. Da må det forventes å ha transportbånd 500 - 600 m fra anlegg til havn. For å forhindre støy og støvflukt i byen må transportbåndet være innelukket og ha støydempende beskyttelse. Det ytre miljøet påvirkes minimalt og massetransport kan sannsynligvis skje kontinuerlig, uten hensyn til tidspunkter (Tunnel Business Magazine, 2019).



Figur 7.2: Eksempel på et vertikalt transportsystem som benyttes i sjakt. Større blokker kan ikke fraktes med transportsystemet.

Plassering av anleggsområder ses med fordel i sammenheng med alternativer for effektiv og miljøvennlig massetransport. Bruk av transportbånd gir mulighet til å redusere antall lastebiler i sentrum av Oslo. Potensielt kan hele transportlengden fra stuff til avlastning være med transportbånd. I kombinasjon med lekertransport fra havnene i Oslo blir antall lastebiler redusert i størst mulig grad.

Lektertransport

Med relativt kort nærhet til havn, vil lekertransport være et aktuelt alternativ i Oslo. Hensikten er å redusere antall lastebiler i sentrum, slik at alternativet anses som mest realistisk i kombinasjon med transportbånd. Det kan dessuten være konkurransedyktig på pris mot massetransport med lastebiler (PG Fornebubanen, 2018).

Massene blir med fordel benyttet til formål som har umiddelbar nærhet til sjøen, for eksempel utvidelse av friluftsoyer.

Lastebiler

Massetransport med lastebiler er lite gunstig i urbane strøk. Alternativet er ofte forbundet med negative miljøpåvirkninger og ulemper for naboer langs transportrutene. Det er derfor viktig at anleggsområdene legges i kort nærhet til hovedveiene. For bymiljøet i Oslo er det ikke ønskelig med den ekstra belastningen, og utkjøringstidspunktene må utføres til hensiktsmessige tidspunkt (PG Fornebubanen, 2018). Det krever god planlegging for effektiv og økonomisk drift på anlegget. Fordelen med lastebiler er muligheten for fleksibel og enkel massetransport fra anlegg til mottaker.

Dersom massetransport skal skje med lastebiler i Oslo må det stilles strenge miljøkrav. Belastning i form av støy og forurensning er mindre med elektriske lastebiler, og vil sannsynligvis være et viktig krav i anleggsgjennomføring (Bane Nor, 2020).

7.4 Ventilasjon

Roadheader er elektrisk drevet, som i utgangspunktet bidrar til et godt arbeidsmiljø i tunnelen. Men fordi kutteprosessen genererer betydelig støvkonsentrasjon på stuff, er det nødvendig å ha ventilasjonssystem tett inntill stuff. Vannsystemer på kutterhodet kan installeres og vil redusere støvkonsentrasjonen, men ikke nok til å fjerne behovet for ventilasjon (Sleight, 2010). Dersom alle anleggsmaskinene i tunnelen er elektrisk kan det tenkes at ventilasjonssystemet ikke trenger like stor effekt.

På anleggsområdet i dagen opptar ventilasjonsanlegg liten plass, men det må vises oppmerksomhet til ventilasjonsstøy som er forstyrrende for miljøet rundt anleggsområdet. Tunnelvifte med støyisolert duk, lydfelle og skjermet luftinntak er enkle tiltak som bør vurderes (NFF, 2014).

8 Estimat inndrifter

I dette kapittelet blir resultatene fra prognosemodellen presentert. Fra resultatene beregnes hva som hadde vært forventet brutto og netto inndrift med roadheader i Oslotunnelen. Vurderingene som ligger bak bestemmelsen av parameterverdiene i prognosemodellen blir gjennomgått.

8.1 Bestemmelse av parametere i prognosemodell

Parametrene i prognosemodellen er i hovedsak bestemt på grunnlag av data og observasjoner som er presentert i Kapittel 5.

8.1.1 UCS

Bergartenes UCS er den viktigste geologiske parameteren som danner grunnlaget for estimat av ytelsen til roadheader. Alle bergartene har et vidt spenn av UCS-verdier, slik at det er vanskelig å bestemme én verdi som er representativ for hver bergart. Det er derfor beregnet tre UCS-verdier, som tar for seg det verst tenkelige, det gjennomsnittlige og det best tenkelige scenarioet. Gjennomsnittet av de fire laveste og de fire høyeste UCS-verdiene benyttes til beregning av minimums- og maksimumsverdier. Basert på dette fremkommer det tre estimater som representerer hvert sitt scenario. Andre parametere som er uavhengig av UCS-verdien endres ikke i disse estimatene. Dvs. at bare J_{UCS} i RMCR-systemet og TC justeres med UCS-verdiene. Tabell 8.1 viser UCS-verdiene som benyttes.

Tabell 8.1: Minimums-, gjennomsnittlig- og maksimumsverdi av UCS [MPa].

Bergart	UCS_{min}	UCS_{snitt}	UCS_{maks}
Skifer	22	43	94
Alunskifer	33	64	94
Kalkstein	26	78	189
Diabas	57	138	224
Syenitt/mænaitt	108	176	237
Rombeporfyr	113	135	172

8.1.2 Rock Toughness Rating (k_1)

Styrkekoefisienten TC beregnes basert på UCS og BTS. UCS-verdiene fra Tabell 8.1 benyttes sammen med BTS-verdiene i Tabell 8.2 for bestemmelse av TC, og derav korreksjonsfaktor k_1 .

Tabell 8.2: Minimums-, gjennomsnittlig- og maksimumsverdi av BTS [MPa].

Bergart	BTS_{min}	BTS_{snitt}	BTS_{maks}
Skifer	2,1	3,5	6,1
Alunskifer	2,5	4,6	6,7
Kalkstein	2,0	5,5	11,8
Diabas	4,1	9,3	13,7
Syenitt/mænaitt	7,4	11,7	18,2
Rombeporfyr	6,5	9,2	11,6

8.1.3 RMCR (k_2)

I henhold til prognosemodellen, klassifiseres bergmassen etter RMCR-systemet. For hver bergart er det bestemt én parameterverdi, selv om parameterverdien i realiteten varierer langs tunnelen. Det er fokusert på å gi en verdi som representerer de mest forekommende forholdene. Bare J_{UCS} justeres for de ulike scenarioene.

For J_{BS} er det tatt hensyn til at de mest skifrige bergartene har mindre blokkstørrelse, mens massive gangbergarter normalt har større blokkstørrelse. I de mest oppsprukket sonene vil J_{BS} sannsynligvis være noe lavere enn hva som blir benyttet i utregningene.

Ved bestemmelse av J_{JC} er det vanskelig å definere én verdi som stemmer overens med ratingkriteriene. Det er gjort vurderinger som er fornuftig opp mot beskrivelsene av sprekkeforholdene fra Bane NOR (1980). Det er heller valgt en for høy verdi enn en for lav verdi.

J_{Ori} vurderes som lik for alle bergartene. Det er ikke godt nok grunnlagsmaterialet til å gjøre en detaljert vurdering av denne parameteren. Det antas at sprekkesettene har middels gunstig orientering.

8.1.4 Matekraft (P)

En transverse roadheadermaskinen som benyttes i samferdselstunneler har normalt matekraft på 300 kW. Matekraften vil sannsynligvis endres etter forholdene, men det er antatt lik matekraft i alle bergartene gjennom hele tunnelen.

8.2 Beregning av NCR

Beregningene av kuttekapasitet er basert på Plenninger og Restner (2015) sin prognosemodell. Dette gir et estimat av ytelsen til roadheader i kontakt med bergmassen.

Fordi det er stor variasjon i styrkeparametrene er det valgt å beregne en minimums, en gjennomsnittlig og en maksimumsverdi av NCR. Hensikten er å vise variasjonene i NCR som potensielt kan forekomme. Minimumsverdien er å regne som minst gunstig og gjennomsnittsverdien er å regne som et estimat av mest forekommende forhold. Det er bare justert for UCS-relaterte parametere, da denne parameteren er av størst betydning for NCR. Det betyr at andre parametere ikke endrer seg for de ulike scenarioene. Resultatet er presentert i Tabell 8.3. I Vedlegg B1 er fullstendige utregninger vist.

Tabell 8.3: Minimums-, gjennomsnittlig- og maksimumsverdi av NCR [$\text{m}^3/\text{kuttetimer}$].

Bergart	NCR_{\min}	$\text{NCR}_{\text{snitt}}$	NCR_{maks}
Skifer	60	112	178
Alunskifer	61	84	133
Kalkstein	23	54	132
Diabas	17	27	59
Syenitt/mænaitt	18	23	37
Rombeporfyr	24	30	37

Resultatene i Tabell 8.3 viser at det potensielt er store variasjoner i NCR. Det er lite sannsynlig å oppnå minimums- og maksimumsverdiene over lengre distanser, men det er sannsynlig at det kan forekomme over flere kortere distanser. I de sedimentære bergartene, spesielt skifer og alunskifer, vil roadheader oppnå god inndrift. I de vulkanske gangbergartene er ytelsen mer begrenset.

8.3 Estimat inndrifter

8.3.1 Netto inndrift

Netto inndrift defineres som meter tunnel pr. time kutterhode er i kontakt med stuff (Bruland, 2016). Basert på estimerte verdier av NCR (Tabell 8.3), beregnes netto inndrift innenfor hver bergartsgruppe. De mest forekommende forholdene, NCR_{snitt} , benyttes som grunnlag. Netto inndrift avhenger av tverrsnittets størrelse og er beregnet for en enkeltspor- og dobbeltspørtunnel. Tabell 8.4 viser resultatene. Utrekningene er vist i Vedlegg B2.1.

Tabell 8.4: Netto inndrift.

Bergart	Netto inndrift	Netto inndrift
	enkeltspor	dobbeltspor
	[m/kuttetime]	[m/kuttetime]
Skifer	1,40	0,95
Alunskifer	1,05	0,71
Kalkstein	0,68	0,46
Diabas	0,34	0,23
Syenitt/mænaitt	0,29	0,19
Rombeporfyr	0,38	0,25

8.3.2 Brutto inndrift

Brutto inndrift defineres som antall meter ferdig tunnel pr. uke (Bruland, 2016). For driving med roadheader er det en funksjon av netto inndrift og tidsforbruk i sikringsarbeidet. Massetransport skjer parallelt med kutteprosessen og påvirker i utgangspunktet ikke inndrift.

Tunneldata

Data om tidsforbruk baserer seg på driving av ettløpstunnel. Brutto inndrift beregnes derfor med tanke på at tunnelen drives som ettløpstunnel med teoretisk tverrsnitt på 118 m². Den totale lengden av bergtunnel er 3020 m, fordelt på to strekninger med lengde 600 m og 2420 m.

Driving av tunnelen

I realiteten er det naturlig å drive tunnelen fra flere stuffer samtidig. I dette estimatet antas bare drift fra én stoff, med én roadheader. Fremdrift og gjennomførbarhet innenfor hver bergartsgruppe blir illustrert.

Sikring og driving

Det forutsettes vanlig 12/9 skiftordning. Det gir 101 t/uke knyttet til driving og sikring av tunnel (Bruland, 2016). Av disse timene vil en betydelig del gå med til boring av injeksjonshull. Hver injeksjonsskjerm er 24 m lang, hvor 6 m overlapper til neste skjerm. Nye injeksjonshull bores dermed for hver 18 m tunnel. Grunnet svake grunnforhold og høy oppsprekking langs store deler av tunneltraséen, antas det å drive 6 m tunnel av gangen, etterfulgt av sikringsarbeid (systematisk bolting og sprøytbetong). For hver injeksjonsskjerm er det dermed tre sykluser av driving med roadheader og sikringsarbeid. Tidsforbruket for drift av roadheader baserer seg på netto inndrift (Tabell 8.4), mens tidsforbruket knyttet til injeksjon og sikring er basert på erfaringstall fra Statens vegvesen (2002) og Messelt (2013).

Fordi mektigheten til de vulkanske gangbergartene varierer fra noen cm til flere meter, er det vanskelig å gi et godt estimat av brutto inndrift for hver bergartsgruppe. I løpet av en uke vil driving potensielt skje i tre ulike bergartsgrupper. Videre blir det beregnet brutto inndrift i alunskifer, skifer, kalkstein og gangen av rombeporfyr. Det antas at hele lengden av hver bergart drives sammenhengende, og ikke med hyppige vekslinger som det i realiteten er.

Ukeinndrift

Estimert ukeinndrift er vist i Tabell 8.5. I Vedlegg B2.2 vises fullstendig utregning.

Tabell 8.5: Brutto inndrift.

Bergart	Inndrift [m/uke]
Skifer	35,7
Alunskifer	32,0
Kalkstein	25,6
Rombeporfyr	17,7

8.4 Diskusjon av resultatene

I prognosemodellen behandles hver bergartsgruppe som en homogen bergmasse, med like forhold. Svakhetssoner og andre endringer i bergmassens karakteristik påvirker normalt inndrift, men blir ikke tatt hensyn til. Netto inndrift innebærer derfor noe usikkerhet, men gir likevel gode indikasjoner på hvilke bergartsgrupper som er egnet og mindre egnet for driving med roadheader. Brutto inndrift vurderes som et mer optimistisk estimat. De sekundære arbeidsoppgavene er basert på flere antagelser som normalt varierer mye fra uke til uke. Roadheader vil ha varierende arbeid knyttet til vedlikehold og bytte av kutterenheter, og i tilfeller med mer enn én injeksjonrunde har det stor effekt på brutto inndrift. Det er uforutsigbar tidsbruk knyttet til injeksjons- og sikringsarbeidet, og dermed usikkerhet i tallene som benyttes.

I en ettløpstunnel er det sannsynlig å drive tunnel med "benching-metoden". Estimaten baserer seg på at roadheader har rekkevidde til å drive hele tverrsnittet. I realiteten må det påregnes mer tid, dersom det drives med "benching". På en annen side har estimatet lagt til grunn at det drives med én roadheader på stoff. I en ettløpstunnel vil det være mulighet til å drive med to roadheadere, og dermed påvirke estimatet i positiv forstand.

Arbeid knyttet til injeksjon og sikringstiltak må utføres uansett drivemetode, slik at det i utgangspunktet er ytelsen i kutteprosessen som er avgjørende for om roadheader har konkurransedyktig inndrifter. Men roadheader gir jevnere og mindre påvirket tunnelkontur enn sprengte tunneler. I estimatet baserer antall arbeidstimer ifbm. sikringstiltak seg på erfaringstall fra sprengte tunneler. Det kan tenkes at antall arbeidstimer knyttet til sikringstiltak er mindre enn hva som er antatt. Fremdrift kan bli høyere om tidsbesparelsene i sikringsarbeidet brukes til drift av roadheader. Motsatt er det antatt bergsikring med bolter og sprøytbetong. Om tyngre sikringstiltak benyttes må det beregnes mer tid til sikringsarbeid enn antatt.

8.4.1 Kostnadsvurdering

Det er ikke gjort detaljerte vurderinger av kostnader i oppgaven, men i det følgende gjøres det rede for enkle kostnadsprinsipper ved driving med roadheader.

Slitasje på kutterenhetene er en viktig driftskostnad knyttet til driving med roadheader (Su og Akkas, 2019). SPC øker normalt med lavere NCR, slik at det er knyttet høyere kostnader til driving i Oslofeltets gangbergarter enn de sedimentære bergartene. I tillegg har kvartsinnholdet viktig betydning for SPC. Det er ingen av bergartsgruppene som har utpreget høyt kvartsinnhold, men fra Neby (2021) har gangbergartene, spesielt syenitt, høyere kvartsinnhold enn de sedimentære bergartene. Driving i syenitt må forventes å være dyrere enn andre bergarter. Skifrene i Oslofeltet har lavt kvartsinnhold og forventes å være mest økonomisk. Det begrunnes også med høy NCR.

I tillegg til de geologiske faktorene, er personellens kompetanse viktig. I kutteprosessen beveges kutterhode i alle retninger og mønstre. Dersom kutterhodet utsettes for vibrasjoner, støt og ujevne bevegelseser utsettes også kutterenhetene for unødvendig slitasje. I hard bergmasse oppstår vibrasjoner lettere, men et kompetent personale tilpasser bevegelsesmønsteret etter forholdene og kan bidra til å minimere slitasje (Su og Akkas, 2019).

9 Diskusjon

9.1 Roadheader som drivemetode på ny tog tunnel i Oslo

Denne oppgaven har gått gjennom de geologiske forholdene i Oslo og langs Oslostunnelen. Det har gitt et godt grunnlag for vurdering av roadheader sin ytelse i bergmassen. I urbane områder er drivemetodenes miljøpåvirkning, fleksibilitet og risiko også viktige kriterier å evaluere.

9.1.1 Inndrifter

Foldninger og forkastinger i Oslo sentrum gjør at grunnforholdene er vekslende og varierende. Styrkeegenskapene i bergartslagene varierer innenfor korte distanser. Ytelsen til roadheader er sensitiv for endring i bergmassens styrkeegenskaper, slik at detaljerte undersøkelser av berggrunnens styrke og karakteristikk er avgjørende for å vurdere forventede inndrifter med roadheader.

Berggrunnen langs Oslostunnelen domineres av alunskifer, skifer og kalkstein. Skiferbergartene har oftest lav - medium trykkfasthet, men verdier opptill 100 MPa er registrert. Alunskifer er myk og gir i utgangspunktet liten slitasje på kutterenheter. Både alunskifer og skifer er svært skifrig. Kalkstein er generelt sterkere enn skiferbergartene, og fremstår som stiv og hard. Det er registrert store variasjoner i trykkfasthet, men ved gjennomsnittlige forhold har kalksteinen moderat styrke. Skifer og kalkstein forekommer med hyppige vekslinger i Oslostunnelen. Oppsprekking er hovedsaklig moderat - sterk, hvor 25 - 30 % av tunnallengden er klassifisert som sterkt oppsprukket. Det er fordelaktig for driving med roadheader, som oppnår bedre ytelse i skifrig og oppsprukket bergmasse.

Fra prognosen ses det at roadheader har best ytelse i skifer og alunskifer. NCR_{min} viser at ytelsen er høy, selv ved de minst gunstige forholdene. Ved gjennomsnittlige forhold er NCR svært gunstig, spesielt i skifer. Det gir tydelige indikasjoner på at roadheader kan drive effektivt i skifer og alunskifer. NCR_{maks} er høy for skiferbergartene, men det er nok ikke sannsynlig at slike forhold forekommer over lengre distanser. I kalkstein er ytelsen betydelig lavere enn i skifer og alunskifer. NCR_{min} er kritisk lav, og driving under slike forhold er verken effektivt eller økonomisk over lengre distanser. Under gjennomsnittlige forhold er ytelsen i kalkstein akseptabel, men det er avgjørende at lavere ytelse ikke er dominerende.

Gjennomskjærende i de sedimentære bergartene er det over 30 vulkanske ganger av diabas, syenitt, mænaitt og rombeporfyr langs Oslotunnelen. Mektighet varierer fra noen cm til flere meter og bergartene har langt sterkere egenskaper enn de omkringliggende bergartene. NCR_{maks} viser at ytelsen til roadheader er begrenset under de mest gunstige forholdene. I de tynneste gangene med sterk oppsprekking kan det være sannsynlig å drive uten at det gir betydelige utslag på inndrift. Men NCR_{snitt} er kritisk lav og indikerer at roadheader ikke oppnår effektivt inndrift i mektige vulkanske ganger.

Prognosen av brutto inndrift viser at roadheader oppnår over 30 m/uke i skifer og alunskifer. Det er ikke gjort et estimat av inndrifter med andre drivemetoder, men det er ikke usannsynlig at roadheader er konkurransedyktig i skifer og alunskifer. I kalkstein er brutto inndrift forventet å være 25 m/uke. For et urbant tunnelprosjekt med strenge restriksjoner i anleggsgjennomføring, ansees det som akseptabel inndrift. En TBM vil nok oppnå høyere inndrifter, men forsiktig sprengning i urbane strøk gir nødvendigvis ikke høyere inndrifter.

Den vulkanske gangen av rombeporfyr er den mektigste gangen langs Oslotunnelen. Beregningene viser at inndrift er betydelig lavere enn i de sedimentære bergartene. Selv om det kan være gjennomførbart å benytte roadheader, er det normalt knyttet større kostnader og økt behov for bytte av kutterenheter. Det vurderes ikke som konkurransedyktig og lite gunstig å benytte roadheader i gangen av rombeporfyr.

Data fra roadheader-prosjektene i Montreal og Bormio viser at ytelsen til roadheader kan ha store variasjoner innenfor samme bergart. Det er sannsynlig at slike variasjoner forekommer i Oslo også, fordi forskjellen i NCR_{min} og NCR_{maks} er relativt stor for alle bergartene i Oslofeltet. Det er naturlig at maksimums og minimums forhold forekommer på deler av strekningen på ny Oslotunnel, selv om NCR_{snitt} forventes å være dominerende.

9.1.2 Fleksibilitet og risiko

Muligheten for å drive tunnel med fleksibilitet er en viktig fordel med roadheader. Tunnelverrsnitt kan justeres i alle fasonger med svært høy presisjon. Det innebærer etablering av nisjer, tverrforbindelser og stasjonshaller. Med to enkeltspørtunneler kan tunnelene legges med minste pilaravstand, og omlegg til ettløpstunnel ifbm. overkjøringssløyfer og stasjoner gjøres med enkle justeringer. I utgangspunktet er ikke et av tunnelkonseptene mer favoriserende for roadheader, men det oppnås høyere effektivitet om ”benching” ikke må benyttes, altså at tunnelverrsnittet ikke er større en rekkevidden til roadheader. Det er mest sannsynlig å oppnå for enkeltspørtunneler.

Fleksibilitet med roadheader ses også i drivefasen, hvor maskiner flyttes effektivt fram og tilbake på stuff. Med hyppig varierende berggrunn, som det kan være flere steder i Oslo, oppstår uforutsette hendelser oftere. Da er fleksibilitet høyt verdsatt, og med maskiner lett tilgjengelig kan sikring installeres på kort tid. Det bidrar til å minimere geologisk risiko og gjør drivestopp kortere. Tilgang til stuff og fleksibilitet ifbm. sonderboring og injeksjonsarbeid er også viktig når det er strenge tetthetskrav for tunneler under Oslo.

Driftsmessig innebærer driving med roadheader en viss risiko. Inndrift kan være uforutsigbar og ha store variasjoner innenfor korte distander, spesielt ved varierende styrkeegenskaper i bergmassen. Men så lenge detaljerte forundersøkelser utføres og bergmassekvaliteten identifiseres, trenger ikke risiko å være mer betydelig enn ved andre drivemetoder. Dersom det i tillegg legges opp til å ha en borerigg tilgjengelig og mulighet for å benytte D&B, minimeres risiko for betydelige forsinkelser. Fra utbyggingen av Montreal Metro ses det at driving med roadheader, og mulighet for å benytte D&B i harde gangbergarter, gir trygghet for å unngå forsinkelser i varierende berggrunn. Dette vil være en naturlig løsning for driving gjennom de mektigste vulkanske gangene i Oslo, hvor roadheader har begrenset ytelse.

Økonomisk vil det også være en viss risiko med roadheader. Når roadheadere kjøpes eller leies, fordrer det at maskinene benyttes på store deler av traséen. Slitasje på kutterenheter er vanskelig å forutsi, men hardere bergmasse enn antatt medfører mer vedlikehold og hyppigere bytte av kutterenheter. Det gir igjen høyere drivekostnader. Dette er også et argument for å benytte D&B i de mektigste vulkanske gangene i Oslo.

9.1.3 Klima og miljø

Med hensyn til befolkningen og eksisterende konstruksjoner over og under bakken i Oslo er det naturlig at miljøaspektene med drivemetodene vektlegges tyngre enn normalt. Samtidig har anleggsbransjen en viktig rolle i det grønne skiftet. Muligheter som bidrar til skånsom anleggsgjennomføring med lave klimagassutslipp blir viktigere og viktigere å utforske i fremtiden.

Fremtidige tunnelprosjekter i Oslo er avhengig av å gjøre grundige vurdering av drivemetodene. D&B er en etablert drivemethode i Norge, men bruk av roadheader legger til rette for å minimere de negative klima- og miljøaspektene med tunneldrift i større grad. Roadheader er drevet av elektrisitet og forhindrer utslipp av sprenggasser og annen forurensning i Oslo. Samtidig er det ingen rystelser og minimal vibrasjon i berggrunnen, som gjør at det ytre miljøet opplever minimal påvirkning. Anleggsområdene opptar dessuten liten plass i byen, og bryteprosessen muliggjør massetransport med transportbånd.

9.2 Anleggsgjennomføring

Overflaten i Oslo er tett bebygd og tilgjengelige arealer til anleggsområder er begrenset. Løsninger som bidrar til skånsom anleggsgjennomføring blir viktigere enn i andre avsidesliggende prosjekter, men tunnelen skal likevel bygges på en effektiv måte. I Hong Kong og Sydney bygges lange tunneler i svært tettbygde områder. Med flere dype sjakter utføres arbeidet hovedsaklig under bakken. Infrastruktur i bunn av sjaktene gjør at størrelsen på anleggsplassene i dagen kan begrenses. Strenge krav til støy under driving opprettholdes med støydempende overbygg over sjaktene. Driving med roadheader og D&B krever normalt mindre sjakter enn TBM, men det er sannsynlig at flere angrepspunkter er nødvendig med roadheader og D&B.

Plassering av anleggsområder ses med fordel i sammenheng med mulighetene for effektiv og miljøvennlig massetransport. I Oslo bør det i størst mulig grad skje utenom vegnettet og uten forstyrrelser for befolkningen. Bruk av roadheader legger til rette for å benytte transportbånd fra stoff. Med spesiallagde transportbånd transporteres massene effektivt også i vertikale sjakter. Ved videre transport i dagen dekkes transportbåndene med et overbygg som demper støy og forhindrer støvflukt. Innbyggerne påvirkes dermed minimalt og transportbåndet kan sannsynligvis driftes

hele døgnet. På HATS2A i Hong Kong var lektertransport tilgjengelig i umiddelbar nærhet til sjaktene og avgjørende for å ikke belaste veinettet. Traséen til ny tog tunnel i Oslo er ikke i umiddelbar nærhet til sjø og vil kreve massetransport 400 - 500 m i dagen før videre transport på lekter. Transportbånd i kombinasjon med lektertransport ansees som mest realistisk, da hensikten med løsningen er å fjerne tungtrafikk fra byen. Da kan massetransport utføres effektivt uten å forholde seg til gitte tidspunkter.

Massetransport med lastebiler er mer fleksibelt dersom massene skal deponeres. Deponiene er gjerne et stykke utenfor Oslo sentrum, slik at transportbånd ikke blir aktuelt for hele strekningen. Det er likevel mulig å opprette mellomstasjoner, hvor transportbånd benyttes ut av sentrum og lastebiler for videre transport til deponi. På den måten blir ikke tungtrafikk en del av bybildet. Mellomstasjonen opprettes med fordel i kort nærhet til hovedveiene.

9.3 Roadheader i kombinasjon med TBM og D&B

Fra relevante prosjekter som er omtalt i denne oppgaven, og det generelle inntrykket fra litteraturen, benyttes roadheader ofte i kombinasjon med andre drivemetoder. Fordelene med roadheader utnyttes både i kombinasjon med TBM og D&B, men bruksområdet til roadheader vil avhenge av kombinerende drivemetode.

I forbindelse med TBM-prosjekter fungerer roadheader ofte som en supplerende drivemetode. TBM benyttes ofte på lengre tunneler, slik at selve tunneldrivingen ikke utføres med roadheader. Roadheader blir forbeholdt etablering av adkomsttunneler, tverrforbindelser og andre utvidelser som krever fleksibilitet i bryteprosessen. Denne kombinasjonen legger til rette for klima- og miljøvennlig tunneldriving. Det er samtidig avgjørende at gode forundersøkelser utføres, fordi drivemetodene er sensitiv for uforutsett geologi.

I kombinasjon med D&B er drivemetodene nokså sammenstilt. Det arbeidet som utføres med roadheader kan som regel kunne utføres med D&B også. På ny tog tunnel i Oslo vil det være ønskelig å drive mest mulig med roadheader for å minimere de negative påvirkningene fra D&B. Men for å ha trygghet og forutsigbarhet i fremdrift, er det fordelaktig å ha mulighet for omstilling til D&B på kort varsel. Begge drivemetodene innebærer fleksibilitet som gjør at omstillingsprosessen nødvendigvis ikke medfører betydelige forsinkelser. At roadheader har dårligere ytelse enn antatt, er en typisk situasjon med behov for omstilling til D&B. Denne kombinasjonen legger til rette for å drive mest mulig med roadheader, uten at det er stor risiko

for avvik i fremdrift.

Egenskapene til roadheader kan utnyttes på ny togtunnel i Oslo, uansett om det er i kombinasjon med TBM eller D&B. I kombinasjon med TBM, fordrer det at minimalt med supplerende driving foregår i de vulkanske gangene hvor roadheader har begrenset ytelse. I kombinasjon med D&B er det ikke en problemstilling, da omstillingsprosessen mellom drivemetodene er kort.

9.4 Er roadheader egnet som drivemetode på ny togtunnel i Oslo?

Basert på beregninger og resultat fra prognosemodellen, er driving med roadheader gjennomførbart på store deler av tunneltraséen mellom Oslo S og Skøyen. Gjennom skifer og alunskifer er roadheader spesielt godt egnet, selv ved de minst gunstige forholdene. I kalkstein er ytelsen til roadheader noe lavere, men under gjennomsnittlige forhold oppnås god inndrift. I de vulkanske gangbergartene, som står for mindre enn 10 % av tunnellengden, er roadheader lite egnet. Roadheader som eneste drivemetode vurderes derfor ikke som gjennomførbart.

For å utnytte mulighetene med roadheader mest mulig, vurderes det som mest fornuftig å benytte D&B som kombinerende drivemetode. Da vil roadheader drive gjennom skifer, alunskifer og kalkstein, mens i harde, mektige vulkanske ganger er D&B et bedre alternativ. Det er heller ikke usannsynlig at D&B må benyttes i kalkstein, da roadheader har begrenset ytelse ved minst gunstige forhold.

Samtidig som roadheader driver effektivt gjennom store deler av tunneltraséen, bidrar det positivt for klima- og miljøaspektene med tunneldriving i urbane strøk. På ny togtunnel i Oslo vil mulighetene med roadheader kunne utnyttes langs store deler av tunneltraséen, og bymiljøet vil ha fordel av drivemetoden under anleggsperioden.

10 Konklusjon

I urbane tunnelprosjekter bør ikke kostnader og byggetid være ensbestemmende kriterier i valg av drivemetode. Det ytre miljøet skal ivaretas i anleggsfasen, samtidig ses det at anleggsbransjen stilles strengere krav til klimagassutslipp. På ny tog tunnel i Oslo kan roadheader drive effektivt langs store deler av tunneltraséen og bidra til skånsom anleggsgjennomføring. Følgende funn er gjort i oppgaven:

- Roadheader oppnår best ytelse i alunskifer og skifer i Oslo, og vil være en konkurransedyktig drivemetode gjennom skiferbergartene. I kalkstein er ytelsen noe lavere, men under gjennomsnittlige forhold oppnås god ytelse. I de vulkanske gangene er ytelsen begrenset, og det vurderes som lite sannsynlig å drive effektiv og økonomisk med roadheader gjennom slike forhold.
- Ytelsen til roadheader er sensitiv for endringer i bergmassen styrkeegenskaper. Geologiske variasjoner og styrkeegenskaper i berggrunnen gjør at roadheader bør kombineres med D&B i Oslo. På den måten blir alle mulighetene med roadheader utnyttet mest mulig, samtidig minimeres risiko for store forsinkelser når omstillingsprosessen til D&B kan skje på kort tid. De mektige vulkanske gangene langs Oslotunnelen er dessuten bedre egnet å drive med D&B.
- I Oslo er det strenge krav til innlekkasjer og sikringsomfanget kan endre seg innenfor korte distanser. Flexibilitet med roadheader legger til rette for å håndtere uforutsette hendelser på kort tid og redusere konsekvensene av geologiske risikomomenter.
- Bruk av roadheader legger til rette for miljø- og klimavennlig anleggsgjennomføring. Behovet for anleggsplass i dagen reduseres med sjakter som angrepspunkter og infrastruktur etableres med fordel i bunn av sjaktene.
- Alternative metoder for massetransport er avgjørende for å spare bymiljøet i anleggsfasen. Transportbånd i kombinasjon med lekertransport gir mulighet for effektiv og miljøvennlig massetransport.

I videre arbeid er det nyttig å få et bedre bilde av kostnadene ved driving med roadheader, og sammenligne inndrifter og kostnader mot andre drivemetoder.

Referanser

- Altindag, R. og Guney, A. (2010). Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (ucs, ts and sh) of rocks. Scientific Research and Essays.
- Bane NOR (1980). Oslo-tunnelen: geologisk sluttrapport.
- Bane NOR (2017). *Håndbok for offentlig plan og teknisk hovedplan*.
- Bane NOR (2020). Anbefalt konstruksjonsprinsipp for jernbanetunneler. Bane NOR.
- Bane Nor (2020). Miljø i byggeperioden. Bane Nor.
- Bane NOR (2021). Ny togtunnel oslo.
URL: <https://www.banenor.no/Prosjekter/prosjekter/togtunnel-oslo/>, hentet 25.02.2021.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses.
- Bjørlykke, K. (2012). Oslo-området geologi. Universitet i Oslo.
- Bratlien, H. (2014). Tunnelboremaskin (tbn). KVVU Oslo-Navet.
- Broere, W. (2016). Urban underground space: Solving the problems of today's cities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 55, 245-248.
- Brox, D. R. (2015). Norsk tunnelteknologi i asiatisk storby. Fjellsprengningsdagen 2015. NFF.
- Brox, D. R. (2020). Muntlig kommunikasjon.
- Bruland, A. (2016). Boring i fjell. anleggsteknikk gk. kompendium - del ii. NTNU.
- Endre, E. og Sørmo, E. (2015). Identifisering og karakterisering av syredannende bergarter. Miljødirektoratet.
- Gehring, K. (1995). Leistungs- und verschleißprognose im maschinellen tunnelbau.
- Grendal, A., Johansen, T., og Boge, K. (2015). Utfordringer og erfaringer med driving av tunneler i oslo-området. KVVU Oslo-Navet.
- Grøv, E. (2021). Muntlig kommunikasjon.
- Grøv, E. og Beitnes, A. (2006). Dobbeltspor lysaker – sandvika. 3. parts vurdering av drivemetode for tunnel mellom lysaker og sandvika. Bane NOR.

- Gullon, A. A. og Pacios, P. (2010). Experience in construction in strong rock with roadheader in the ariz-basauri section of the bilbao metro. ITA (International Tunneling Association).
- Hansen, J. N. (2018). Comparison of existing performance prediction models for hard rock tunnel boring based on data collected at the follo line project. NTNU.
- Hartlieb, P. og Bock, S. (2017). Theoretical investigations on the influence of artificially altered rock mass properties on mechanical excavation.
- HATS (2005). Stage 2a eia study - investigation.
- Keles, S. (2005). Cutting performance assessment of a medium weight roadheader at Çayirhan coal mine.
- Kotwica, K. og Malkowski, P. (2019). Methods of mechanical mining of compact-rock—a comparison of efficiency and energy consumption.
- Ludt, O. (2015). Problemer med transportbånd i tunnel.
URL: <https://www.at.no/anlegg/394227>, hentet 28.04.2021.
- Lutro, O. og Nordgulen, O. (2008). The oslo region bedrock map. scale 1:250 000. NGU.
- Messelt, E. F. (2013). Effektivisering av tunneldrift med referanse til lean construction. NMBU.
- Murrow, R. (2017). Roadheader solutions in focus. Tunnel Talk.
- Narum, S., Grendal, J., Boge, K., og Johansen, T. (2015). Jernbaneløsninger. KVVU Oslo-navet.
- Neby, A. (2021). Muntlig kommunikasjon.
- NFF (2008). Tung bergsikring i undergrunnsanlegg. NFF.
- NFF (2014). Støy fra bygge- og anleggsvirksomhet. NFF.
- NGU (2021). Berggrunnskart.
URL: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/>, hentet 26.02.2021.
- Peila, D. (2019). Forelesningsnotater om tunnel excavation methods for conventional tunnelling. POLITECNICO DI TORINO.
- PG Fornebubanen (2018). Massehåndtering. Oslo kommune.

- Plenninger, R. J. og Restner, U. (2015). Rock mechanical aspects of roadheader excavation. EUROCK 2015 64th Geomechanics Colloquium.
- Prostański, D. (2013). Use of air-and-water spraying systems for improving dust control in mines.
- Queensland Gov. (2010). Tunnelling road header and related operations: dust conditions and their control. Department of Justice and Attorney-General.
- Regjeringen (2017). Nasjonal transportplan 2018 – 2029.
- Restner, U. og Gehring, K. (2002). Quantification of rock mass influence on cuttability with roadheaders.
- Restner, U. og Reumueller, B. (2004). Metro montreal – successful operation of a state-of-the-art roadheader – atm 105-icutroc – competing with drill blast operation in urban tunnelling. EUROCK 2004.
- Rowland, J. (2021). Sydney highway excavations progress. TunnelTalk.
- Sandvik (2001). Atm 105 ic / 028 - project premedio ii.
- Sandvik (2018). *Cutting inline*.
- Sandvik (2021a). Roadheaders for tunneling.
URL: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/mechanical-cutting-equipment/roadheaders-for-tunneling/>, hentet 25.02.2021.
- Sandvik (2021b). Sandvik mt720 roadheader.
- Sleight, C. (2010). Sandvik launches new roadheader for construction markets.
URL: <https://www.khl.com/news/Sandvik-launches-new-roadheader-for-construction-markets/1058301.article>, hentet 28.04.2021.
- Statens vegvesen (2002). Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved t-baneringen. Statens vegvesen.
- Statens vegvesen (2003). Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø.
- Statens vegvesen (2014). Vegtunneler, håndbok n500. Vegdirektoratet.
- Su, O. og Akkas, M. (2019). Cost analysis of mine roadways driven by drilling and blasting

method and a roadheader. Conference: 26th International Mining Congress and Exhibition of Turkey.

Tatiya, R. R. (2005). *Surface and Underground Excavation*.

Thuro, K. og Plinninger, R. J. (1998). Geological limits in roadheader excavation - four case studies.

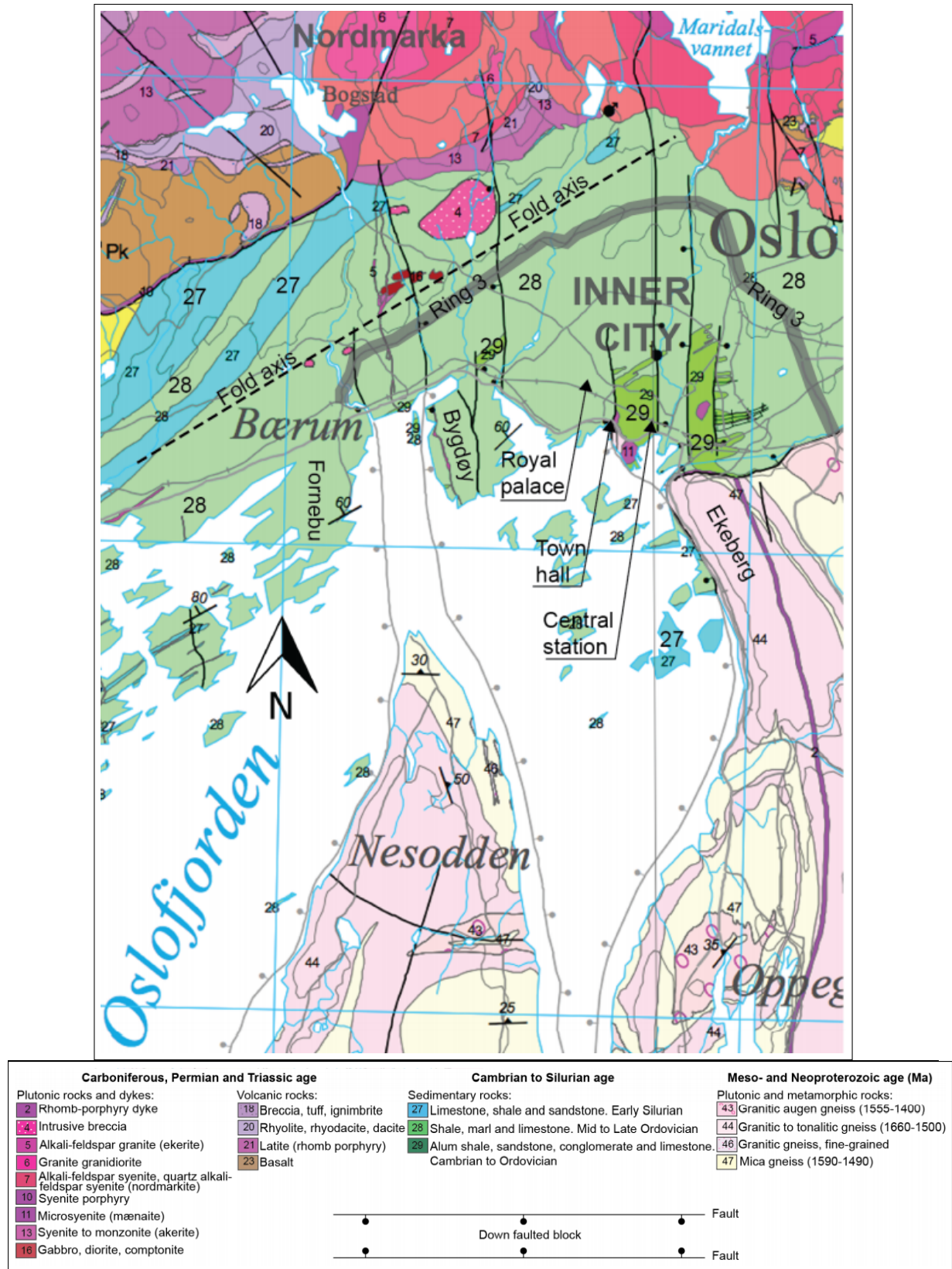
Tunnel Business Magazine (2019). The real deal on rapid excavation: It's about logistics, communication planning. Tunnel Business Magazine.

Tunnel Business Magazine (2020). Roadheader solutions in focus.

URL: <https://tunnelingonline.com/market-spotlightroadheaders/>, hentet 20.01.2021.

West Connex (2021). M4-m5 link tunnels. WestConnex.

A Berggrunnskart



Figur A.1: Berggrunnskart over Osloregionen (Lutro og Nordgulen, 2008).

B Prognosemodell

B1 Inngangsparametere og beregning av NCR

Tolkning av berggrunn, verst tenkelig scenario							
Bergartsfordeling langs tunneltrase							
Bergart	Skifer	Alunskifer	Kalkstein	Diabas	Syenitt/ mænaitt	Rombeporfyrr	
Samlet lengde (m)	995	580	1195	165	65	20	
Andel (%)	32,9	19,2	39,6	5,5	2,2	0,7	
Bergmekasisk data							
UCS_maks (MPa)	94	94	189	224	237	172	
BTS_maks (MPa)	6,1	6,7	11,8	13,7	18,2	11,6	
TC	15	14	16	16	13	15	
k_1	1,00	1,03	1,03	1,05	1,05	1,05	
RMCR							
R_UCS_maks	3	3	3	1,5	1,3	1,5	
R_BS	10	8	12	14	12	12	
R_JC	10	12	14	17	17	17	
R_Orl	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
RMCR	18	18	24	27,5	25,3	25,5	
k_2	2,67	2,67	2,01	1,76	1,91	1,89	
Prognose							
For MT-720 roadheadermaskin							
Matekraft (kW)	300	300	300	300	300	300	
NCR_eff (m ³ /kuttetime)	60	61	23	17	18	24	

Figur B.1: Beregning av NCR ved verst tenkelige forhold.

Tolkning av berggrunn, gjennomsnittlig scenario							
Bergartsfordeling langs tunneltrase							
Bergart	Skifer	Alunskifer	Kalkstein	Diabas	Syenitt/ mænaitt	Rombeporfy	
Samlet lengde (m)	995	580	1195	165	65	20	
Andel (%)	32,9	19,2	39,6	5,5	2,2	0,7	
Bergmekasnik data							
UCS_snitt (MPa)	43	64	78	138	176	135	
BTS_snitt (MPa)	3,5	4,6	5,5	9,3	11,7	9,2	
TC	12	14	14	15	15	15	
k_1	1,00	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	
RMCR							
R_UCS_snitt	6	4,5	4	2,5	1,8	2,5	
R_BS	10	8	12	14	12	12	
R_JC	10	12	14	17	17	17	
R_Ori	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
RMCR	21	19,5	25	28,5	25,8	26,5	
k_2	2,29	2,47	1,93	1,70	1,87	1,82	
Prognose							
For MT-720 roadheader							
Matekraft (kW)	300	300	300	300	300	300	
NCR_eff (m ³ /kuttetime)	112	84	54	27	23	30	

Figur B.2: Beregning av NCR ved gjennomsnittlige forhold.

Tolkning av berggrunn, best tenkelig scenario						
Bergartsfordeling langs tunneltrase						
Bergart	Skifer	Alunskifer	Kalkstein	Diabas	Syenitt/ mænaitt	Rombeporfyr
Samlet lengde (m)	995	580	1195	165	65	20
Andel (%)	32,9	19,2	39,6	5,5	2,2	0,7
Bergmekasnisks data						
UCS_min (MPa)	22	33	26	57	108	113
BTS_min (MPa)	2,1	2,5	2	4,1	7,4	6,5
TC	10	13	13	14	15	17
k_1	0,95	1,03	1,03	1,04	1,05	1,10
RMCR						
R_UCS_min	9,6	8,7	9,5	5,5	3,0	2,9
R_BS	10	8	12	14	12	12
R_JC	10	12	14	17	17	17
R_Ori	-5	-5	-5	-5	-5	-5
RMCR	24,6	23,7	30,5	31,5	27,0	26,9
k_2	1,96	2,04	1,59	1,54	1,79	1,80
Prognose						
For MT-720 roadheadermaskin						
Matekraft (kW)	300	300	300	300	300	300
NCR_eff (m ³ /kuttetime)	178	133	132	59	37	37

Figur B.3: Beregning av NCR ved best tenkelige forhold.

B2 Estimert inndrifter

B2.1 Netto inndrift

Tverrsnitt enkeltspørtunnel (m ²)	80							
Tverrsnitt dobbeltspørtunnel (m ²)	118							
Bergart	Skifer	Alunskifer	Kalkstein	Diabas	Syenitt/ mænaitt	Rombeporfyr		
NCR_snitt (m ³ /kuttetime)	112	84	54	27	23	30		
Netto inndrift enkeltspor (m/kuttetime)	1,40	1,05	0,68	0,34	0,29	0,38		
Netto inndrift dobbeltspor (m/kuttetime)	0,95	0,71	0,46	0,23	0,19	0,25		

Figur B.4: Netto inndrift for bergartsgruppene. Gjennomsnittlige forhold ligger til grunn.

B2.2 Brutto inndrift

Brutto inndrift						
Bergartsfordeling						
Bergart	Skifer	Alunskifer	Kalkstein	Rombeporfyrr		
Samlet lengde (m)	995	580	1195	20		
Andel (%)	32,9	19,2	39,6	0,7		
Tidsforbruk						
Netto inndrift (m/kuttetime)	0,95	0,71	0,46	0,25		
Boring pr. injeksjonsskjerm, 24 m (t)	14	14	14	14		
Antall sykluser, boring injeksjonsskjermer	55	32	66	1		
Total tid injeksjonsskjermer (t)	770	434	924	14		
Drift roadheader, 6 m (kuttetimer)	6,3	8,5	13,0	24,0		
Tilleggstid drift roadheader, 6m (t)*	1	1	1	1		
Antall 6 m sykluser, drift roadheader	166	97	199	3		
Total tid drift roadheader (t)	1213	914	2797	83		
Sikringsarbeid (bolter og sprøytbetong), 6 m (t)	5	5	5	5		
Antall 6 m sykluser, sikringsarbeid	166	97	199	3		
Total tid sikringsarbeid (t)	829	483	996	17		
Total arbeidstid (t)	2812	1831	4717	114		
Estimat						
Antall uker ved 101 t/uke	27,8	18,1	46,7	1,1		
Inndrift (m/uke)	35,7	32,0	25,6	17,7		

* Korrigerer for tidsforbruk utover effektiv drift av roadheader. Typisk flyttes kutterhodet ut og inn av bergmassen og maskinen manøvreres på stoff, som "Drift roadheader" ikke tar hensyn til. Det antas at dette tidsforbruket er 1 t/6m.

Figur B.5: Brutto inndrift for utvalgte bergartsgrupper. Gjennomsnittlige forhold ligger til grunn.

