

Tunnelbyggetid ved rystelsesbegrensninger

Tunnel construction time in case of
restrictions due to vibration

Trondheim Mai 2021

Navn studenter:

Jørgen Størdal Gravråk
Håkon Hermundstad Sanner

Intern veileder:
Omar Sabri

Ekstern veileder:

Prosjektnr:
2021-31

Rapporten er ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Problemdefinering, prosjektbeskrivelse og resultatmål

Standardisert tunnelsprengning er noe bransjen kjenner godt til, og har gode estimeringer og erfaringstall til. Når vi derimot må ta hensyn til rystelseskrav og dermed utføre forsiktig sprengning, er det et utvalg tiltak som må vurderes. Bransjen har ikke gode nok tidsestimater av fremdriften ved kortere salvelengde eller redusert sprengladning. Hvor mye tid taper vi på dette?

Målet med prosjektet er systematisere tunnelbyggetider og kapasiteter, og drøfte usikkerheter og variasjoner knyttet til rystelser. Ved å hente inn og bruke erfaringer fra bransjen kan forfatterne sammenfatte dataene og lage felles faktorer for tidsendring i rystelsesbegrensede situasjoner.

Stikkord fra prosjektet:

- Tunnel
- Tid
- Kapasitet
- Sprengning
- Rystelser

Forord

I anledning avslutning på bachelorstudiet ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim, utarbeides denne bacheloroppgaven tellende 20 studiepoeng. Gruppen består av to studenter som har tatt spesialisering innen anleggsteknikk og ingeniørgeologi i 5. semester.

Forfatterens drivkraft har i stor grad vært interesse og ønske om videreutvikling, både personlig og på bransjens vegne. Gruppen ville fordype seg innen tunneldriving, som har vært det største interesseområdet i emnet. Oppgaven ble presentert av NTNU som et aktuelt tema med stort forbedringspotensial, og ga studentene mulighet til å utfolde seg i både teorien og praksisen på området.

Arbeidet med oppgaven har vært svært utfordrende og lærerikt. Fordypningsarbeidet har gitt oss mange spennende oppdagelser som vil være en god plattform for videre læring.

Forhåpentligvis kan også arbeidet benyttes til videre utvikling av temaet, og vi ser frem til å se hvordan en gunstig modell strider frem.

Gruppen ønsker å takke intern veileder, universitetslektor Omar Sabri, og hjelpeveileder og professor Amund Bruland for sitt engasjement og god hjelp med oppgaven. Vi vil også takke kontaktpersoner i Forcit og Orica Mining for veiledning til sprengningsplan og tenningsystem, og en stor takk til respondentene fra Hæhre, Skanska og Veidekke.



Jørgen S. Gravråk

Trondheim, 20.06.2021

Sted, dato



Håkon H. Sanner

Sammendrag

Ved bygging av en tunnel må det noen ganger tas hensyn til eksisterende konstruksjoner som gjør at metoden for tunneldrivingen må endres. Gjennombrytning ved hjelp av sprengning medfører at vibrasjoner kan gjøre skade på fundament. Reduserende tiltak må fattes, som ofte vil forsinke progresjonen og redusere kapasitetene i byggingen.

Bacheloroppgaven ser på temaer innenfor anleggsteknikk og ingeniørgeologi, med vekt på tunneldrift. Her inngår generell informasjon om tunneldata og rystelsesteori. Rapporten tar for seg flere beregningseksempler for situasjoner der vibrasjonsbegrensende tiltak må iverksettes. Her vises det beregning av ladningsmengde, grenseverdier for vibrasjoner, kritiske avstander og metoder som reduserer belastningen på ytre omgivelser. Det beregnes hvordan tunnelbyggetiden påvirkes ved å se på endringer i salvesyklus og kapasitet.

Resultater på tvers av ulike tverrsnitt settes i sammenheng, og munner ut i felles faktorer for kapasitet og fremdrift. Disse beregnede verdiene sammenliknes med antakelser fra nøkkelpersoner via spørreskjema.

Abstract

During tunnel construction, existing constructions must sometimes be considered, which means that the method of tunneling must be changed. Explosive breakthrough causes vibrations that can damage the foundation. Reducing measures must be taken, which will often delay the progression and reduce the construction capacities.

The bachelor's thesis looks at topics within construction engineering and engineering geology, with emphasis on tunnel operations. This includes general information about tunnel data and vibration theory. The report addresses several calculation examples for situations where vibration limiting measures must be implemented. It shows the calculation of blast load, limit values for vibrations, critical distances, and methods for reducing strain towards external surroundings. How the tunnel construction time is affected, is calculated by analyzing changes in the round cycle and capacity.

Combinations of different cross sections are contextualized, and result in common factors for capacity and progress. These calculated values are compared with assumptions from key people via questionnaires.

Innholdsfortegnelse

Forord	iii
Sammendrag	iv
Abstract.....	v
Innholdsfortegnelse	vi
Figurliste.....	viii
Vedleggsliste	ix
1 Introduksjon.....	1
1.1 <i>Bakgrunn</i>	1
1.2 <i>Formål</i>	2
1.3 <i>Avgrensning</i>	3
1.4 <i>Begrepsforklaring</i>	4
2 Teori.....	5
2.1 <i>Rystelser</i>	5
2.1.1 <i>Spenningsbølger og -frekvenser</i>	6
2.1.2 <i>Tiltak mot rystelser</i>	8
2.1.3 <i>Beregning av grenseverdi</i>	10
2.1.4 <i>Beregning av enhetsladning</i>	11
2.2 <i>Tunnelteori</i>	13
2.2.1 <i>Tunneltverrsnitt</i>	13
2.2.2 <i>Tunnelsprengning</i>	15
3 Metode	18
3.1 <i>Forskningsmetoder</i>	18
3.2 <i>Datainnsamling</i>	19
3.3 <i>Behandling av data</i>	20
3.4 <i>Kvalitetssikring og feilkilder</i>	21
3.4.1 <i>Spørreskjema</i>	21
3.4.2 <i>Tidligere rapporter</i>	21
3.4.3 <i>Forskjellige beregningsmetoder</i>	22
3.5 <i>Plan om beregningsmodell</i>	22

4	Resultater	23
4.1	<i>Tunnelsprengning og salvesyklus</i>	23
4.1.1	Borplan og sprengningsplan.....	24
4.1.2	Tenningsplan.....	26
4.1.3	Netto syklustid.....	27
4.1.4	Netto ukentlig fremdrift.....	28
4.2	<i>Beregningseksempler for grenseverdi og fremdrift</i>	29
4.2.1	Eksempel 1: 10m avstand, bolig.....	30
4.2.2	Eksempel 2: 15m avstand, bolig.....	32
4.2.3	Eksempel 3: 15m avstand, sykehus.....	34
4.3	<i>Innhentede erfaringer</i>	36
4.3.1	Antall borehull.....	36
4.3.2	Tennmidler.....	38
4.4	<i>Faktorer for fremdrift i tunnel</i>	38
4.4.1	Kapasitet for forskjellige salvelengder.....	38
4.4.2	Faktor for volumkapasitet.....	39
5	Diskusjon	40
5.1	<i>Korte salvelengder</i>	40
5.2	<i>Alternative løsninger for beregningseksempel</i>	41
5.3	<i>Oppdeling av syklusen</i>	42
5.4	<i>Samspill i bransjen</i>	45
5.5	<i>Validitet for beregninger</i>	46
6	Innovasjon og veien videre	48
6.1	<i>Viktigheten av en modell for tidsestimering</i>	48
6.2	<i>Videre utvikling av beregningseksempelene</i>	49
7	Konklusjon	51
8	Kildeliste	52

Figurliste

Figur 1: Forplantningshastigheter for enkelte jord- og bergarter.	7
Figur 2: Dempingskoeffisient β ved beregning av enhetsladning.	12
Figur 3: Geometriske mål for tunneltverrsnitt.	14
Figur 4: Tunneltverrsnittsdata.	14
Figur 5: Sprengningsprofil SVV.	15
Figur 6: Stikning for boring i tunnel.	17
Figur 7: Ladningsmengder fordelt på hulltype for 5m salvelengde.	25
Figur 8: Boreplan for T9,5-profil med salvelengde 5m.	25
Figur 9: Tenningsplan, oppgitt i millisekunder.	26
Figur 10: Resultat av netto salvesyklus for forskjellige salvelengder og tverrsnitt.	27
Figur 11: Resultat av ukentlig fremdrift for forskjellige salvelengder og tverrsnitt.	28
Figur 12: Skisse for beregningseksempel 1.	31
Figur 13: Skisse for beregningseksempel 2.	33
Figur 14: Skisse for beregningseksempel 3.	35
Figur 15: Beskrivelse av volumuttak langs tunnelaksen.	35
Figur 16: Antall borehull til tverrsnitt, i tillegg til korreksjonsfaktor.	37
Figur 17: Oversikt over antall borehull ved ulike salvelengder og tverrsnitt.	37
Figur 18: Volumkapasitet for ulike salvelengder.	39
Figur 19: Kapasitetsfaktor fordelt over ulike salvelengder.	39
Figur 20: Tid til rensk med hensyn på tverrsnitt og salvelengde.	44
Figur 21: Gjennomsnittlig endring i fremdrift for alle tverrsnitt ved ulike salvelengder.	46

Vedleggsliste

Vedlegg 1: Artikkel	53
Vedlegg 2: Plakat.....	54
Vedlegg 3: Beregningseksempel 1	55
Vedlegg 4: Spørreskjema	58

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Tunnelbransjen har uttrykt et ønske om bedre tidsmodeller i rystningsutsatte områder. Et pågående samarbeid i bransjen, ledet av Entreprenørforeningen – Bygg og Anlegg (EBA), arbeider nå med å videreutvikle en slik modell for byggetid i tunnelprosjekter. I den forbindelse har Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU lagt opp til en oppgave relatert til tunnelbyggetid, som har resultert i en bacheloroppgave forfatterne har arbeidet med våren 2021.

Målet med oppgaven er å systematisere byggetider og kapasiteter, og drøfte usikkerheter og variasjoner knyttet til rystelser. Ved å hente inn og bruke erfaringer fra bransjen kan forfatterne sammenfatte dataene og lage felles faktorer. Langsiktig sett håper forfatterne at informasjonen og resultatene kan arbeides videre med, som et bidrag til utviklingen av fullt funksjonelle modeller som også tar hensyn til rystelsesbegrensninger.

Det finnes allerede beregningsmodeller for tunnelbyggetid og -kostnader. Disse modellene mangler utfyllende beregninger av endring i tunnelbyggetiden ved krav til vibrasjoner fra sprengningsarbeidet. Denne rapporten skal ta hensyn til disse kravene, og konkret finne tidspåvirkningen som et resultat av dem.

1.2 Formål

Formålet med oppgaven er å supplere tidligere byggetidsmodeller for tunneler. Ved å bruke relevante rystelsessituasjoner kan beregninger av tidsperspektivet bidra til at tunnelprosjekter får mer nøyaktige estimater. Som bakgrunnen til oppgaven forteller, er det mangel på et godt vibrasjonsfokuserert verktøy for byggetid. Målet er å etablere en rapport som:

- kan supplere byggetidsmodeller
- øker presisjonen på tidsestimatene
- øker forståelse og innsikt mellom byggherre og entreprenør
- er brukervennlig, oversiktlig og av høy kvalitet

Problemstillingene til oppgaven baserer seg rundt noen sentrale spørsmål. Hvordan påvirker vibrasjonskrav fremdriften til tunnelbyggingen? Kortere salver gir mindre vibrasjoner, men hvor store forsinkelser må da regnes med? Har byggherre og entreprenør forskjellige syn på disse forsinkelsene? For at samspillet mellom byggherre og entreprenør skal fungere best mulig, vil forståelse og estimering av byggetid være essensielt. Det finnes mange gode spørsmål relatert til dette temaet, og størst av dem alle; hvor mye tid går tapt i vibrasjonsbegrensede områder som krever forsiktigsprengning?

I tillegg har forfatterne et mål om å øke egen forståelse for tunneldrift, samt skape erfaringer og innsikt i teoretiske og praktiske situasjoner. Ønsket er å bruke teoretiske data i reelle sammenhenger, lage eksempler og anvende teorien i virkelighetsnære situasjoner.

1.3 Avgrensning

Det er tidligere utviklet tre typer estimeringsmodeller; grov tidligfase-, tidligfase- og ekvivalenttidsmodell. I denne oppgaven vil bare den sistnevnte modellen være relevant, nettopp fordi de to tidligfasemodellene er for grove og udetaljerte. En ekvivalenttidsmodell er langt mer nøyaktig, og tar hensyn til hvert enkelt ledd i byggeprosessen. De tidligere modellene gir allerede gode estimater, men det er store rom for forbedringer i områder med rystelsesproblematikk. Her ligger hovedfokuset i denne oppgaven. Estimaten som allerede finnes, tar ikke for seg effektene av forsiktigsprenning.

Ekvivalenttidsmodellen tar hensyn til åtte forskjellige tverrsnitt mellom T7,5 og T13,5. Det finnes både mindre og større tunneler enn disse, men de aller fleste tunneler inngår imellom de nevnte tverrsnittene. Det finnes også et bestemt utvalg salvelengder; fra 6m ned til 2m, med intervall på 0,5m. Lengder utover dette beregnes fra trendlinjer.

Opgaven ser i hovedsak bort fra kostnader, da et økonomisk perspektiv vil gjøre studiet langt større. Det finnes allerede gode økonomiske modeller for tunnelbygging. Enkelte metoder vil sees på som mer kostbare enn andre, uten at dette går nøyere inn på.

For å kunne beregne og sammenlikne syklustid og fremdrift for forskjellige tverrsnitt er flere av parameterne som påvirker tiden blitt bestemt på forhånd. Antakelsene er gjort på bakgrunn av tilgjengelig informasjon og erfaringer fra bransjen. Disse skal likevel være aktuelle for normalt bruk, eksempelvis borerigg med tre bomber.

1.4 Begrepsforklaring

BEGREP	FORKLARING
EKVIVALENTTIDSMODELL	Fremdrift per tidsenhet. Samlet vil en ekvivalenttidsmodell fortelle hvor stor fremdrift tunneldrivingen har, ofte oppgitt i m/uke eller m ³ /time.
STUFF	Den innerste veggen, fronten til en tunnel under driving. Det er her bore- og sprengningsarbeidet foregår.
ODD	Innerst i borehullene, det som senere blir neste stuff.
SALVE / SALVELENGDE	Etter hver runde med boring, vil det lades og sprenges én salve. Denne plasseres etter en sprengningsplan utover hele stuffen, og hver ladning sprenges etter hverandre med svært korte intervaller. Salvelengden er inndriften til salven, lengden fra stuff innover i fjellet som sprenges ut.
KUTT	En salves første initiering forekommer i kutten. Her finnes det både tomme og fulladede hull. De uladede borehullene skaper en fri flate, mens de fulladede hullene sørger for en sikker og god utløsning av salven.
STIKNING	Hver salve vil ha stikning, som går ut på å utvide stuffen innover i fjellet. Stikningen utvider normalt rundt 0,4m innerst i salven, slik at det «blir område å jobbe på» ved neste stuff.
HJELPERAST	Konturhullene har en tilhørende parallell linje med «hjelpeshull» innenfor i tverrsnittet. Disse hullene lades forsiktig for å ikke påvirke området utenfor konturen, men bidrar til god fragmentering og utløsning av konturladningene.

2 Teori

Teoridelen legger grunnlaget for beregningene som gjøres senere i rapporten. Her forekommer kjente data og beskrivelser av hvordan dataene fungerer. Ved å lese dette kapitlet vil leseren få nødvendig bakgrunnskunnskap til å kunne forstå og benytte tilhørende beregninger.

Berggrunnen i Norge er dominert av hardt fjell, og er langt gunstigere enn andre steder i verden. Likevel forekommer svakhetssoner og kritiske punkter i grunnen, som må kartlegges og tas høyde for. I tillegg er rystelser et gjengående problem, ettersom sprengningen av dagens tunneler må ta hensyn til eksisterende bebyggelse over bakken. Dette er mest aktuelt i byer og ellers bebygde områder med korte avstander til overflaten. Dersom det skal bygges et ekstra tunnellopp i nærheten av et eksisterende, vil rystelsesbegrensninger også spille en rolle her. Sentralisering og økende bebyggelse vil derfor være med på å øke behovene for kunnskap rundt sprengning med rystelsesbegrensninger, og vil bli enda mer aktuelt med tiden.

2.1 Rystelser

Ved sprengningsarbeid vil tredjepart, eksisterende bebyggelse, gi krav om forsiktighet i sprengningsarbeidet. I urbane strøk, gjerne med korte avstander til overflaten, må disse hensynene tas over lengre strekninger, ettersom det finnes flere kritiske punkt i lengderetning. I mer landlige strøk vil ofte begrensningene justeres noe opp mot kritisk punkt, og deretter avta etter punktet.

Den korteste avstanden mellom sprengningsarbeidet og det kritiske punktet er avgjørende for hvor store tiltak som må tas. Kortere avstander krever større tiltak. Likevel må hvert enkelt tilfelle analyseres, ettersom mye også bestemmes av de geologiske forholdene, i tillegg til hva som utgjør det kritiske punktet. Totalt sett gir dette en grenseverdi som forteller øvre toppverdi for vibrasjonene.

Ved tunnelsprengning i nærheten av bebyggelse settes det opp målere festet på grunnmurer og andre kritiske geologiske punkt i god tid før tunnelen kommer for nært. Så fort målingene nærmer seg grenseverdien for den respektive konstruksjonen, må tiltak gjøres i tunnelen for å redusere vibrasjonene sprengningen forårsaker. Grenseverdiene avhenger av konstruksjonens tilstand og avstand, mens rystelsene avhenger av grunnforhold og avstand. Beregning av grenseverdi forklares i punkt 2.1.3.

2.1.1 Spenningsbølger og -frekvenser

Rystelser er seismiske bølger som er initiert av sprengning. Nivået måles ut fra ledningsmengden og avstanden fra detonerende ladning til målepunktet. I tillegg finnes det geologiske faktorer som bergartsparemetere og topografi. Totalt sett er det mange faktorer som påvirker vibrasjonsnivået, både kontrollerbare og ukontrollerbare variabler. Nedenfor presenteres noen av de forskjellige parameterne i korte trekk.

Spenning

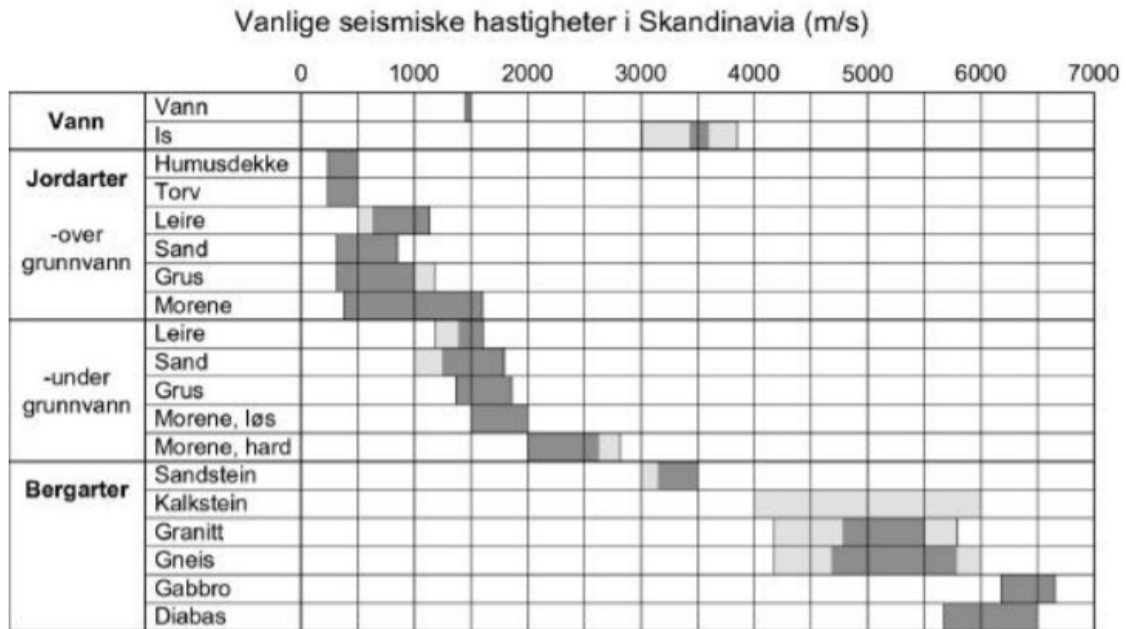
Spenningsene deles inn i rombølger og overflatebølger. De forskjellige bølgenes beveger seg i forskjellige retninger, og utgjør ulike mulige skader. Rombølger beveger seg tredimensjonalt i alle retninger, og deles opp i primære- og sekundære bølger (P- og S-bølger). P-bølgene er trykkbølger i forplantningsretningen, mens S-bølger er skjærbølger som svinger i utbredelsesretningen. I tillegg har vi overflatebølger som Love- og Rayleigh-bølger. Disse beveger seg langs jordoverflaten, og er generelt mindre farlige enn rombølgene (Store norske leksikon, 2017).

Frekvensinnhold

Frekvenser er antall svingninger per tidsenhet for bølgen. Sprengningsinduserte vibrasjoner har en frekvens som varierer mellom 10 og 100 Hz, oftest mellom 40 og 70 Hz. Farligst er de laveste frekvensene, ettersom eksisterende bygningskonstruksjoner har egenfrekvenser rundt 10 Hz. Derfor kan det være farlig for bygninger langt unna, ettersom frekvensene synker med avstand. Ved enkelte grunnforhold, spesielt leire eller andre liknende materialer, kan disse lave frekvensene strekke seg langt.

Forplantningshastigheter

Hastigheten bølgetypene forplanter seg i, avhenger av de geologiske materialene. Forskjellige materialer har forskjellige egenskaper, blant annet av lagdelinger og oppsprekking, slik at hastighetene sprer seg annerledes. Sterke bergtyper som gabbro og gneis fører til høyere hastigheter (NTNU Anleggsdrift, 1998).



Figur 1: Forplantningshastigheter for enkelte jord- og bergarter.

(NTNU Anleggsdrift, 1998)

Viktigheten av fri flate

En elastisk bølge som brer seg fra ett materiale til et annet med forskjellig densitet og elastisitet, vil skape refleksjoner eller refraksjoner av bølgen. Med et praktisk syn vil dette skje når et borehull detoneres og møter en fri flate. På grunn av at luft har helt andre egenskaper enn berget, vil bølgeenergien reflekteres i stedet for å overføres til luften. Slik vil oppsprukket fjell fra støtbølgene faktisk løsrive seg fra berget (Store norske leksikon, 2019).

2.1.2 Tiltak mot rystelser

I rystelsesbegrensede områder må det tas ekstra hensyn. Det finnes flere metoder for å gjennomføre forsiktigsprengning. Å redusere sprengladningene, korte ned på salvelengden, fordele tenningsmønsteret annerledes eller dele opp tverrsnittet i flere deler, er alle aktuelle måter å gjøre dette på. Basert på erfaringene fra bransjen vil justering på tenningsplanen være det første tiltaket som tas.

Disse tiltakene vil medføre at kapasiteten reduseres, mens tidsbruken og kostnadene øker. Likevel er metodene effektive for å redusere svingningshastigheten fra sprengladningene, som er den viktigste faktoren mot rystelsesproblematikk. Bortsett fra justeringer på tenningsplanen, vil hver av de andre metodene minke sprengladningen totalt sett, ettersom hver salve har mindre sprengstoff. Dette reduserer trykkbølgene som sprengstoffet gir, som dermed minker rystningene til ladningen.

Tenningsplan

Når man endrer på tenningsplanen, handler det om å ha forskjellig utløsningsintervall på hver enkelt ladning. Ved at ingen ladninger detoneres samtidig, vil trykket fra sprengstoffet fordeles bedre. Den dimensjonerende mengden sprengstoff begrenses til enhetsladningen i kutt og liggerhull. Ikke-elektriske tennere som NONEL er hyppig brukt i tunnelsprengning i dag, men elektroniske tennere er på veg opp og frem (Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, 2019). Disse har svært små feilmarginer på initieringsintervallene, og med nøyaktige detonasjoner og gode tenningsplaner vil dette totalt sett redusere rystelsene noe. Elektroniske tennere er dyrere, men stiller sterkere på HMS, presisjon, og garanterer etthullstening.

Å bruke elektroniske tennere er derimot ikke alene nok til å ivareta rystelseshensyn, ettersom det fortsatt er like mye sprengstoff som detoneres. Men man har bedre kontroll på tenntidspunkt og det er et enkelt og tidseffektivt alternativ for å redusere vibrasjoner.

Kortere salvelengde

Med redusert salvelengde vil man sprengre et mindre volum om gangen, og dermed må hele prosessen rundt tunneldrivingen gjøres langt oftere. Kortere lengde vil naturligvis kreve mindre sprengstoff enn normalt for hver salve. Dette reduserer rystelsene kraftig ut ifra hvor mye salvelengden kortes ned, men er også kritisk for tidsperspektivet for prosjektet. Dette presenteres i beregningseksempelene i kapittel 4.2.

Forskjellige rystelseskraav kan kreve forskjellige lengder på salven. Grenseverdi og avstand til kritisk punkt vil definere salvens maksimale enhetsladning, som da sier noe om hvor kort salvelengden må være. Merk at salvelengden også kan reduseres av andre årsaker, spesielt ved dårlige geologiske forhold.

Redusere sprengladning

En annen metode for å redusere rystelsene er ved å minke ladningene i salven. Hvert enkelt hull fylles med litt mindre sprengstoff. Dette fører til mindre trykkbølger, og dermed mindre vibrasjoner som følge av sprengningsarbeidet. Redusert ladning betyr også at man må kompensere med å bore flere hull, slik at man fortsatt totalt sett har nok sprengstoff til god brytning i salven. For få hull vil innebære en risiko for at effekten av salven ikke blir optimal, spesielt kan dårlig fragmentering forekomme.

I stedet for å dimensjonere ladningsmengde med sikkerhet for god effekt, blir det heller dimensjonert etter teoretiske minimumskrav for ladningen. I praksis vil dette prinsippet være lite aktuelt, ettersom entreprenørene heller legger mer penger på bordet for å sikre effektive og velfungerende salver. Derfor er redusert ladning noe vanskelig å ta i bruk, men kan likevel være en mulighet i svært krevende områder hvor enhetsladningen må senkes betraktelig.

Oppdeling av salven

Det er også en mulighet å dele opp salven i flere seksjoner. Stiffen kan for eksempel deles i to med ei vertikal linje, slik at vi får to «halvsirkler». Da flyttes kutten til én av sidene, og fungerer ellers på vanlig måte. I skjæringslinja i midten av stiffen vil det nå bli en slags kontur, som gjør at det her må sprenges litt forsiktigere enn vanlig. Dette gjøres for å forhindre en grov og ujevn flate, klar til å bore og sprengre den andre halvdelen av stiffen.

Dersom et kritisk objekt befinner seg over tunnelen, kan det være lurt å dele salven horisontalt og ta ut nedre del av salven først. Slik blir avstanden til objektet lenger ved den første sprengningen, og man kan øke ladningene noe. Dermed krever det mindre sprengstoff i den øvre delen fordi det er en ekstra fri flate og lavere innspenning.

For bruk av NONEL-system vil oppdelingen sikre at ingen hull går av samtidig, slik at enhetsladningen kan reduseres. Ved etthullstening med elektroniske tennere er det ingen hull som sprenges samtidig uansett, så her vil man ikke kunne øke enhetsladning på grunn av oppdeling av salven. Da vil kun kritisk avstand være en påvirkende faktor.

Dette er kanskje det aller mest inngripende tiltaket mot rystelser, ettersom salvene blir mye mindre. Likevel blir det ofte sett på som en siste utvei, da hele prosessen med boring, sprengning, lasting og ladning må gjøres langt flere ganger mer enn ved normal drift.

Andre metoder

En helt annen fremgangsmåte for å beskytte seg mot disse vibrasjonene er ved å utbedre det kritiske objektet. Slik øker man beskyttelsen på selve bygget, i stedet for eller i tillegg til å redusere enhetsladningen. Dette kan eksempelvis gjøres ved bruk av dempeputer i fundamentet, eller drive en grøft (Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, 2019).

I selve salven finnes det også flere muligheter. Patronert sprengstoff med mindre diameter gir mulighet for luft mellom sprengstoffet og fjellet. Dette gir normalt mulighet for litt mer sprengstoff per hull. En annen mulighet er sliss, som er boring av hull så tett at det dannes en åpen kanal. Dette kan også oppnås ved å lade annenhver hull i en søm, som fungerer som en presplitt. Får man en god knusningssone, fungerer dette som en sliss.

2.1.3 Beregning av grenseverdi

NS 8141 forteller om vibrasjoner og støt, og forklarer med formel hvordan man finner grenseverdi. Det er verdt å nevne at en revisjon ble utarbeidet i 2013/14, men at den gamle standarden fra 2001 fortsatt er gjeldende per våren 2021.

Formel 2.1 $v = v_0 * F_g * F_b * F_d * F_k$

der

v	Grenseverdi for toppverdien av vibrasjoner
v_0	Ukorrigert toppverdi av vertikal svingehastighet, fastsatt til 20 mm/s
F_g	Grunnforholdsfaktor, tar hensyn til grunnforholdene rundt byggverket
F_b	Byggverksfaktor, avhengig av type og utforming på byggverket
F_d	Avstandsfaktor, tar hensyn til avstand mellom vibrasjonskilden og byggverket
F_k	Kildefaktor, tar hensyn til egenskapene til vibrasjonskilden

De forskjellige faktorene tar hensyn til ulike parametere, som totalt sett gir et bredt grunnlag for vurderingen. Grenseverdien gir en veiledende toppverdi for hvor mye rene vibrasjonsskader konstruksjonen tåler. Verdien tar ikke høyde for setninger og deformasjoner som kan komme av endringer i geologien som følge av vibrerende arbeider (Standard Norge, 2001).

2.1.4 Beregning av enhetsladning

Siden 70-tallet er det utviklet mange forskjellige formler for beregning av enhetsladning, som Langefors' og Du Ponts formel for å nevne noen. Siden den gang er det utviklet α og β - verdier, som henholdsvis er en faktor for sprengstoffutnyttelse og dempingskoeffisient. Disse avhenger av type sprengningsarbeid og kritisk avstand. Her i Norge kan verdiene for α og β fastsettes, og dermed lage en forenklet formel. Denne formelen gir ofte relativt gode estimeringer for et bredt spekter av situasjoner.

Formel 2.2 $v = K * \frac{\sqrt{Q}}{R}$ eller $Q = \left(\frac{v * R}{K}\right)^2$

der

v	Krav til vibrasjoner [mm/s]
K	Fjellkonstant, varierer fra 100 til 350
Q	Enhetsladning [kg]
R	Avstand fra vibrasjonskilde til målepunkt [m]

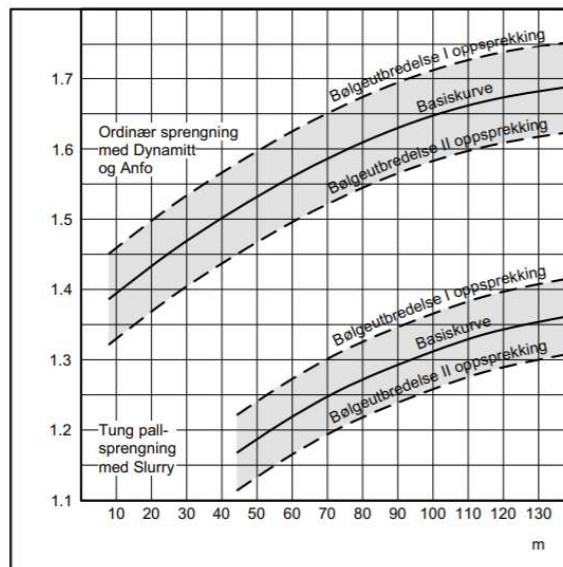
Prosjektrapport 14A-98 om sprengning med restriksjoner fra NTNU, presenterer en nyere beregningsmetode. Her må α og β leses av manuelt, mens fjellkonstanten K er byttet ut med fjellfaktoren c .

Formel 2.3 $v = 500 * c * \frac{Q^\alpha}{d^\beta}$ eller snudd med hensyn på Q : $Q = \left| \frac{v * d^\beta}{500 * c} \right|^{\frac{1}{\alpha}}$

der

- v Vertikal svingehastighet [mm/s]
- c Fjellfaktor
- Q Enhetsladning [kg]
- d Avstand fra vibrasjonskilde til målepunkt [m]
- α Ladningskoeffisient
- β Dempingskoeffisient

Fordelen med denne formelen er at dempingskoeffisienten β bestemmes for hver enkelt salve, og dermed vil avstandsparameteren få en større effekt. I figur 1 er koeffisienten framstilt som en funksjon avhengig av avstand fra kilde til kritisk punkt.



Figur 2: Dempingskoeffisient β ved beregning av enhetsladning.

(NTNU Anleggsdrift, 1998)

Begge disse to formlene tar utgangspunkt i enhetsladningene og svingehastighetene, og kan enkelt løses med hensyn på begge faktorene som vist over. Intensjonen for formlene er den samme, men resultatet vil variere noe ved ulike avstander. Vi kan se på et eksempel for å sammenlikne formlene:

Gitt middels fjell $c = 1,0$ og $K = 350$, vertikal svingehastighet $v = 48 \text{ mm/s}$ og kritisk avstand $R = d = 15 \text{ m}$. Løser ut med hensyn på enhetsladning.

$$\text{Formel 2.2} \quad Q = \left(\frac{48 * 15}{350} \right)^2 = 4,23 \text{ kg}$$

$$\text{Formel 2.3} \quad Q = \left| \frac{48 * 15^{1,42}}{500 * 1,0} \right|^{\frac{1}{0,8}} = 6,54 \text{ kg}$$

2.2 Tunnelteori

I dette kapitlet forklares de viktigste kravene og metodene som benyttes i bransjen, og som er relevante for denne rapporten. Det finnes utallige antall muligheter både angående utforming og teknikker for utførelse. Krav og retningslinjer for vegtunneler som bygges på norske offentlige veger, er håndbøkene fra Statens Vegvesen og Norsk Standard. Dette er gjeldende reglement med mindre byggherre har bestemt noe annet.

For eksplosiv gjennombrytning av fjell er det også faste regelverk som gjelder, men det er åpent for stor variasjon som likevel følger de overordnede kravene. Hvilken type sprengstoff skal brukes? Hvor mye sprengstoff kan det være i hvert hull? Hvordan skal alle hullene detoneres på best mulig måte?

2.2.1 Tunneltverrsnitt

Vegtunneler har standard geometrisk utforming som bestemmes av tunnelens bredde i sålen. Statens Vegvesens håndbok N500, Vegtunneler, presenterer ulike tunnelstørrelsers utforming. Tunnelens såle skal ha helning i henhold til vegens kurvatur og tverrfall.

Tunnelprofil	Total bredde B_t	Trafikkbredde B_k	Senterhøyde vegg radius Y_v	Vegg radius R_v	Senteravstand vegg radius X	Senterhøyde heng radius Y_h	Heng radius R_h
T7,5	7,5	5,0	1,570	4,790	1,550	2,481	3,594
T8,5	8,5	6,5	1,570	4,790	0,402	1,981	4,500
T9,5	9,5	7,0	1,570	4,790	0,450	1,213	5,212
T10,5	10,5	8,0	1,570	4,790	1,450	0,664	5,950
T11,5	11,5	9,5	1,570	4,790	2,598	-0,258	7,199
T12,5	12,5	10,0	1,570	4,790	3,450	-0,466	7,458
T13	13,0	10,5	1,570	4,790	3,950	-0,735	7,825
T13,5	13,5	11,0	1,570	4,790	4,450	-0,817	8,053

Figur 3: Geometriske mål for tunneltverrsnitt

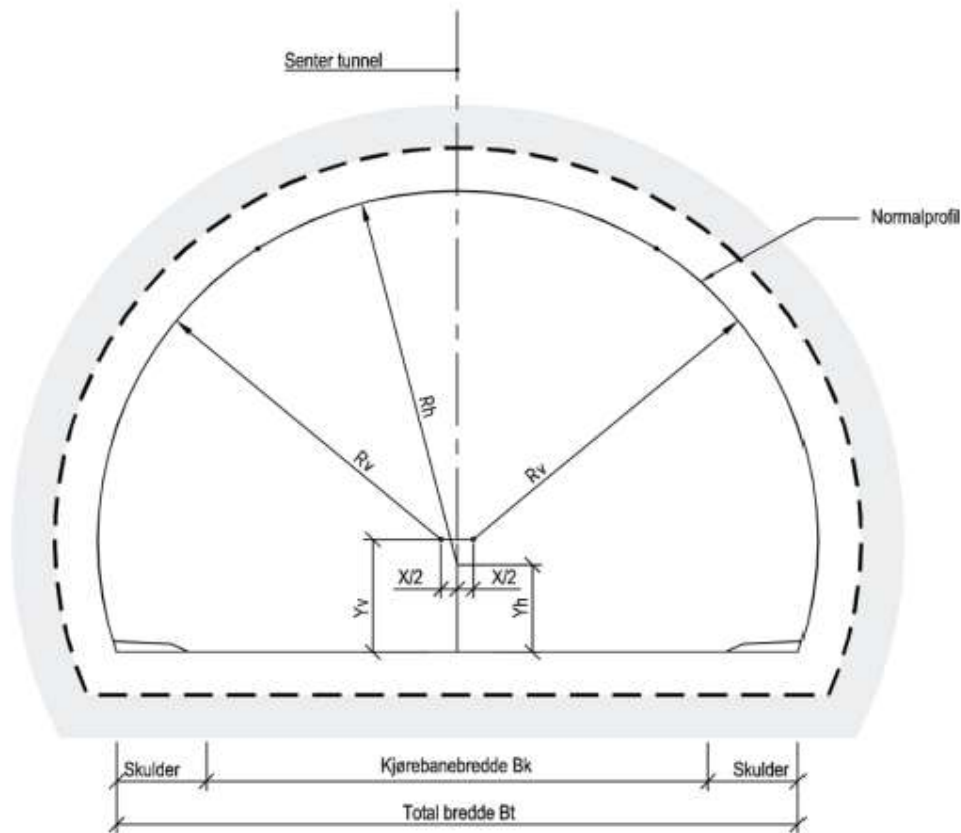
(Statens Vegvesen, 2020)

Tunnelprofil	Teoretisk sprengningsprofil		Normalprofil	
	Areal A_s [m ²]	Buelengde B_k [m]	Areal A_n [m ²]	Buelengde B_n [m]
T7,5	51,56	18,88	40,46	16,30
T8,5	61,92	20,56	49,66	17,99
T9,5	66,62	21,04	53,61	18,46
T10,5	74,59	22,13	60,64	19,55
T11,5	85,92	23,75	70,89	21,18
T12,5	91,32	24,32	75,49	21,73
T13	95,69	24,86	79,39	22,28
T13,5	100,52	25,46	83,73	22,88

Figur 4: Tunneltverrsnittsdata

(Statens Vegvesen, 2020)

Tabellene viser teoretiske data for ulike tunneltverrsnitt. Herunder inneholder tverrsnittene store nok områder til at bestemte kjøretøy får god nok plass, i tillegg til etablering av tekniske installasjoner over og rundt kjørebanelen. Vegtunnelenes geometriske utforming har tre overlappende sirkelbuer som utgjør tunnelens normalprofil. De forskjellige avstandene og sirkelsentrum er vist i figur 4. Teoretisk sprengningsprofil inkluderer den ekstra plassen som kommer av stikning ved boring, sikringstiltak og grøfter.



Figur 5: Sprengningsprofil SVV

(Statens Vegvesen, 2020)

2.2.2 Tunnelsprengning

Tunneldrift kan deles opp i mange forskjellige deler, og det må tas mange valg. Dette gjelder som nevnt utforming, men også blant annet sprengstoffbruk, ladninger og valg av tenmidler. Dette kapitlet tar for seg noen av de viktigste variablene i tunnelsprengning.

Valg av sprengstoff

Emulsjonssprengstoff er utvilsomt den mest brukte typen sprengstoff i tunnel i dag. Ammoniumnitratolje (ANFO) har tidligere vært dominerende i tunneldrift, men emulsjon (en type slurry) har noen egenskaper som gjør at den likevel foretrekkes. Emulsjon er ofte langt mindre kostbart, sikrere å oppbevare og bruke, samt høy vannresistans og motstandsdyktig mot kulde. I tillegg skaper emulsjonssprengstoff godt borehullstrykk og høy brisanshastighet.

Ladningsmengder

Borehull lades med en bunnladning og en pipeladning. Bunnladningen skal sørge for at alt sprengstoffet i hullet blir omsatt, og er vanligvis en liten patron med lett omsettelig sprengstoff. Pipeladningen kan justeres i større grad, utfra mengden sprengstoff som er nødvendig, og hvor mye som er tillatt. Ved bruk av slurry, lades hullet etter en bestemt fyllingsgrad. For konturhull er fyllingsgraden ofte lav, rundt 30%. I kutthull og liggere er den ofte 100%. I tillegg skal borehullene ha en forladning, en uladet lengde. Dette er for å redusere sprut og sannsynligheten for uomsatt sprengstoff.

Tennmidler

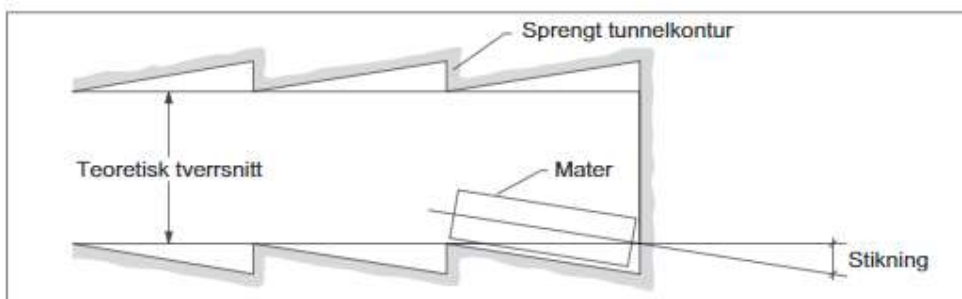
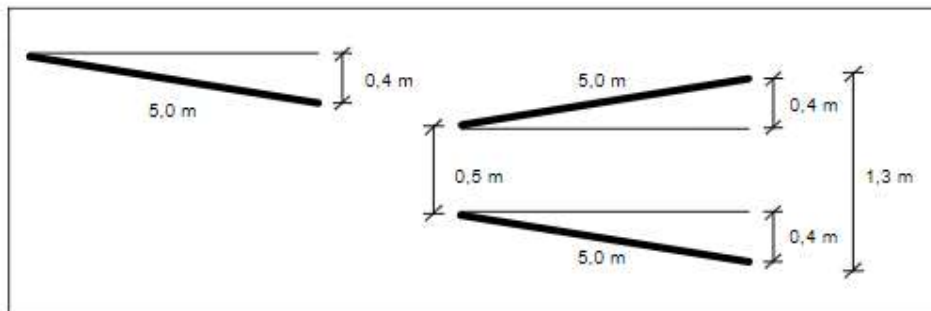
Det ikke-elektriske tennmidealet NONEL er det mest brukte ved normal tunneldrift i Norge i dag. Rapporten og eksemplene tar likevel en annen retning, og bruker elektroniske tennere. Disse er noe ulike, med egne fordeler og ulemper, men nytten kan forhåpentligvis bli større i lengden.

Det finnes mange fordeler med elektroniske tennere sammenliknet med NONEL. De er mer presise, er enkle å bruke, og gir mulighet for stor fleksibilitet i sprengningsarbeidet. Den har store styrker i et sikkerhets- og HMS-perspektiv. I tillegg genereres automatisk en rapport etter sprengningsskytingen, som kort fortalt gir en situasjonsstatus på sprengningen. En annen åpenbar fordel er at dersom alt er riktig utført, vil resultatet bli vesentlig bedre både for kontur og fragmentering, og antall omskytinger reduseres. Dermed kreves mindre etterarbeid på stoffen (Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, 2019).

Den største ulempen med elektroniske tennere er utvilsomt kostnad. Tennerne er gjennomsnittlig om lag 5 ganger dyrere enn NONEL, og i tillegg trengs dyrt tilleggsutstyr som skannere og «blastbox». I tillegg kreves det at leverandører av slike tenningsystem er ansvarlige fram til utførende virksomhet har nok kunnskap og erfaring til å gjennomføre på egenhånd. Det innebærer ytterligere utgifter til bemanning og support. Dessuten brukes det i dag muligens noe lenger tid på å gjøre klart til sprengning med elektronisk tenning, som gjør syklustidene noe lenger.

Stikning

I tunnel bores alltid konturhullene med stikning ut fra tunnelaksen. Dette gjøres fordi borevogna trenger litt ekstra plass der borstengene starter. Krav til stikning i kontur er 0,4m ut fra teoretisk tunnelprofil i odd, uavhengig hvor lang salven er. Mye boreutstyr krever ikke fullt så mye ekstra plass, men kravet på 0,4m gir også en sikkerhet for eventuelle ujevnheter etter forrige salve.



Figur 6: Stikning for boring i tunnel

Stikning brukes også for kutt- og strossehull. Da er hensikten å skape naturlig vanndrenering. Hullene bores med stikning, gjerne på mer enn 3% for å sørge for at vannet renner ut av seg selv uten behov for pumping.

3 Metode

Dette kapitlet forklarer hvordan rapportens innhold er utarbeidet. Metodene som er brukt vil belyses, hvor fordeler og ulemper med fremgangsmåtene vil drøftes. Her vil kildene være sentrale, og viktigheten av kritisk kildebruk vil være nyttig. Innhentet informasjon må være relevant til oppgaven, være av god kvalitet og gi et representativt uttrykk for bransjen.

3.1 Forskningsmetoder

Litteratursøk er grunnleggende for å kartlegge teori og bakgrunnskunnskap for oppgaven. Her forekommer søk og bruk av internett, offentlige rapporter og forelesningsnotater i relevante fag. Store norske leksikon har bidratt med offisiell rystelsesteori, det samme har forelesninger om temaet fra et lite utvalg forskjellige veiledere. Tidligere rapporter rundt samme problemstilling har også vært utslagsgivende for å innhente fremdrift til dags dato. Slik kunne forfatterne sette søkelys på å videreutvikle informasjonen, i stedet for å produsere resultater som allerede finnes. Dette gjelder spesielt bruken av TunSim (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c), en av de tidligere beregningsmodellene for tunnelbyggetid.

I tillegg har det vært svært viktig å innhente aktuell kunnskap fra aktører i markedet, det være byggherrer, entreprenører og andre leverandører. Disse, spesielt entreprenørene, kan i stor grad bidra med erfaringer og inntrykk fra hverdagen relatert til tunnelbyggetid. I den anledning ble det sendt ut spørreskjema til sentrale personer i bransjen. Fordelt over to omganger gjaldt spørreskjemaene normal drift og fremgang, vibrasjonsbegrenset drift med tiltak og estimeringer av forsinkelser, og sikringsarbeid med eventuell relevans til begrenset drift.

Totalt sett har forskningsmetodene lagt stor vekt på kvalitative tilbakemeldinger og innhentinger over kvantitative data. Færre utfyllende og presise svar har vært foretrukket fremfor mange lite informative svar.

3.2 Datainnsamling

I en tidlig fase ble det utstedt en epost til aktuelle aktører i bransjen, både entreprenører og sprengningsaktører. Her ble det delt kort informasjon om oppgavens innhold for å opprette kontakt og invitere til fremtidig samarbeid. Epost ble valgt som fremgangsmåte for å unngå å være påtrengende, samt at det er mer uforpliktende og innbydende til samarbeid.

Samtaler med sprengningsleverandørene var essensielt tidlig i prosessen, ved opprettelsen av sprengningsplan og -mønster til eksempeltunnelen. Her ble to personer kontaktet fra Forcit og Orica Mining, og disse bidro med oppdatert informasjon om sprengstoff, tenmidler og design av planen. Ved å bruke informanter fra anerkjente aktører kan man være sikker på at eksempelet er godkjent til bruk, og dermed være en mulig sprengningsløsning.

Videre var det viktig å hente inn informasjon fra entreprenørene. Slik fikk forfatterne erfaringer og innspill til bruk for oppgaveløsningen, i tillegg til opplysninger som avslutningsvis kan vurderes opp mot resultatene fra modellen. To spørreskjema ble sendt ut, og omhandlet både relevante faktaopplysninger om driften generelt, og spørsmål rundt deres tanker om forsinkelsene ved rystelsesbegrenset drift. Merk at disse dataene er personlige og uoffisielle, og ikke gjelder for bransjen eller entreprenørselskapene totalt sett. Likevel har informantene svært godt innblikk i praktisk drift, og gir i stor grad inntrykk av at de tenker likt i mange sammenhenger.

De to sprengstoffkjennerne ble også kontaktet på nytt senere i perioden. Dette for å få flere innspill om mulige løsninger i svært spesielle tilfeller, som eksempelet i kapittel 4.2.3 senere i rapporten.

3.3 Behandling av data

I stor grad vil det være forskjeller på teoretiske og praktiske løsninger og estimater i tunneldrift. Med en teoretisk tilnærming vil det stilles svært strenge krav til mannskap og maskiner, i tillegg til at geologiske forhold og naturlige prosesser vil opptre normalt. Praktisk virkelighet vil derimot ha en langt mer flytende overgang mellom hva man tror kommer til å skje, og hva som faktisk skjer. Dette gjelder spesielt berggrunnen, som uten grundige undersøkelser kan ha store uforventede variasjoner i egenskaper.

Denne problematikken er et naturlig punkt for forfatterne å tenke på. NTNU har i årevis utviklet teoretiske konsepter, som år etter år viser seg å faktisk være mulige å anvende i praksis. Derimot følges ikke disse fremgangsmåtene av entreprenørene, eksempelvis når det gjelder bore- og sprengningsplaner. Rapporter viser at man trenger langt færre hull enn hva som brukes i praksis, men det er en unødvendig risiko for entreprenøren. En mulig feil som fører til omskyting, er langt verre enn å bore og sprengre noen ekstra hull for å forsikre seg at salven går av som planlagt. Dette har forfatterne prøvd å ta hensyn til, og dermed lagt et nivå mellom teoretiske og praktiske løsninger.

Dette er relevant for nesten all data. Eksempler av sprengningsplaner presentert av sprengstoffleverandørene er velgjennomførte og gode, men blir sett på med «halvteoretiske» øyne. På samme måte blir teoretiske forsetninger og hullavstander vurdert på en kritisk måte, og tilpasset til en middelvei.

Som nevnt i punktet 3.2 ovenfor, vil de innhentede dataene fra entreprenørene være personlige tanker. Deres røffe estimater av blant annet fremdrift og forsinkelser ved forskjellige vibrasjonstiltak er i hovedsak til nytte for å se om resultatene gir liknende verdier som hva entreprenørene tror.

3.4 Kvalitetssikring og feilkilder

3.4.1 Spørreskjema

Til innhenting av informasjon har vi sendt ut to forskjellige spørreskjema til flere nøkkelpersoner i bransjen. Svarene fra de forskjellige entreprenørene var ofte relativt like, men tidvis litt uklare. Det kan skyldes at spørsmålene er dårlig formulert eller at de ikke er konkrete nok. I tillegg har spørreskjemaene tatt for seg flere fagfelt innen tunneldriving. For noen av respondentene har enkelte spørsmål vært vanskelig å svare på, da dette ikke inngår i deres ekspertise.

En annen potensiell feilkilde er at gruppen har fått lite respons fra entreprenørene. Tunnelsprengning er et komplekst tema og inneholder stor variasjon, både fra prosjekt til prosjekt og fra entreprenør til entreprenør. Totalt sett har forfatterne fått inn færre svar enn ønskelig, da flere av de spurte ikke har svart på forespørselen. Slik har forfatterne fått inn færre vinklinger på spørsmålene enn planlagt. Dette kan skyldes travle perioder for de spurte, eller at entreprenørene ønsker å holde på egen informasjon. Det er ikke uvanlig at firmaer vil tilbakeholde informasjon for å dermed få et fortrinn i profesjonell sammenheng.

3.4.2 Tidligere rapporter

I samtaler med aktører i bransjen har det kommet fram at mye NTNU-data er for teoretisk basert, og har høy risiko for dårlig effekt. Dette gjelder eksempelvis antall borehull og sprengstoffmengde i hullene.

Eksempelvis finnes det ingen fasit på hva som regnes som full salvelengde. Dette varierer i stor grad fra entreprenør til entreprenør, i tillegg til at større tverrsnitt gjerne benytter noe lengre borestenger. Med andre ord vil det knyttes usikkerhet til grunnlaget, og at korreksjonsfaktoren for antall borehull blir unøyaktig. Praksis varierer fra 18 fot til 20 fot stenger (4,8 til 5,2m inndrift). Forfatterne har her samkjørt med 2A-05 (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006a), og valgt 5,0m som full salvelengde i normal drift.

3.4.3 Forskjellige beregningsmetoder

For å regne ut syklustider og fremdrift for de korteste salvene på 2,0 og 2,5m har forfatterne regnet disse for hånd. Utregningen som er brukt, er hentet fra vedlegg D i rapport 2B-05 (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006b), som også er grunnlaget for beregningene i TunSim (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c). Likevel vil noen av variablene avvike med små marginer da de må avleses grafisk. Som nevnt går ikke alle grafene helt ned til 2,0m. Dette gjelder for eksempel de aller fleste korreksjonsfaktorer. Dermed har enkelte faktorer blitt estimert på bakgrunn av sannsynlig forløp i samarbeid med veileder.

3.5 Plan om beregningsmodell

Tilhørende rapporten var planen å lage en fullt funksjonell byggetidsmodell i Excel. Dette har dermed vist seg å bli vanskelig, ettersom det fortsatt finnes usikre parametere og det må gjøres mange forenklinger. Dette er noe som kan arbeides videre med, både som avsluttende oppgaver av studenter, men også fagpersoner i bransjen. I stedet har forfatterne satt søkelys på å lage felles faktorer, samt trekke sammenhenger mellom fremdrift og kapasitet ved forskjellige rystelseskrav.

Beregningseksemplene i kapittel 4.2 er utviklet i Microsoft Excel. Valget av Excel som teknisk løsning kom av at tidligere modeller er laget i Excel, det er universalt og enkelt å bruke, samtidig som at forfatterne kan lage avanserte formler som automatisk gjør beregningene.

Byggetidsmodellen TunSim01 (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c), utviklet av Shokrollah Zare for NTNU, er brukt som grunnlag for beregningene. TunSim er en modell som tar for seg tids- og kostnadsparametere ved tunneldrift. Forfatterne har benyttet seg av tidsberegningene, og justert flere av faktorene for å gjøre beregningene relevant for egne eksempler.

Vedlagt rapporten ligger den foreløpige modellen. De enkelte arkene er opprettet og benyttet til blant annet beregning av enhetsladning, salvelengder under 3,0m og beregningseksemplene.

4 Resultater

Dette kapitlet presenterer resultatene av arbeidet. Et tunnelverrsnitteksempel med en blanding av NTNU og bransjens praksis legger grunnlaget for videre beregning. Rystelseskrav bestemmer styrken på tiltakene, som igjen fører til forsinkelser i driften. Ved bruk av TunSim (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c) beregnes generelle byggetider, hvor ulike salvelengder danner ulike ekvivalenttider. Resultatene vil presentere både trendlinjer og felles faktorer, som settes i sammenheng for å konkludere hvorvidt begrensningene fører til forsinkelser.

Kapittel 4.2 legger også frem konkrete eksempler med bestemte grenseverdier og kritiske avstander. Totalt munner prosessen ut i estimater, hvor man kan sammenlikne fremdriften med normal tunneldrift. Hvor store forsinkelser man må regne med ved ulike krav til vibrasjoner?

Alle resultatene samles opp og presenteres i kapittel 4.4, før de drøftes i diskusjonskapitlet. Ekvivalenttidsmodellen og fremdriftsestimatene vil sammenliknes med de utvalgte entreprenørenes tanker om forsinkelsene. Tegningene er utført i ArchiCAD.

4.1 Tunnelsprenning og salvesyklus

For å skaffe et godt sammenlikningsgrunnlag i beregningene har prosjektgruppen utarbeidet et forslag til boreplan og tenningsplan. Det er også gjort enkelte beregninger for sprengstoffkonsentrasjon og plassering som danner grunnlaget for enhetsladning i eksemplene senere i kapitlet. Dimensjonering av boreplaner og sprengstoffmengder blir i dag ofte utført av dataprogrammer. Slike planer vil være skreddersydd hver enkelt salve, og ta hensyn til flere parametere samtidig. Derfor kan utformingen av hver salve ofte være svært ulik.

Det som er utarbeidet til denne rapporten er inspirert av eksempler fra Orica og Forcit som er brukt i virkeligheten, og samtidig tilpasset til teori fra tidligere NTNU-rapporter. Planene er designet for å kunne relateres til forskjellige tverrsnitt og forskjellig geologi, og for å definere en standard for videre beregning av tunnelbyggetid. Tenningsplanen er konstruert for bruk av elektroniske tennere.

I beregningsmodellen vil TunSim (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c) være verktøyet som gjør en del av oppgavens grovarbeid. Her har vi satt inn enkelte bestemte inngangsdata, som er faste for alle tunneltverrsnitt og salvelengder. Dette gjelder blant annet valg av dumper, Volvo L330E, og borhammertypen COP 1838 med tre borhammere. I tillegg er det fastsatt middels godt fjell, med middels bor- og sprengbarhet.

Dette kapittelet presenterer også nettoresultater for salvesyklusetid og fremdrift. Ved å lage listenett av disse resultatene vil de totalt resultere i faktorer og forholdstall som benyttes videre i oppgaven.

4.1.1 Borplan og sprengningsplan

Boreplanen i rapporten bruker hulldiameter $d_h = 48 \text{ mm}$ for ladede hull, og $d_g = 102 \text{ mm}$ for grovhull. Det er tatt utgangspunkt i en T9,5 vegtunnel med teoretisk sprengningsprofil på $66,6 \text{ m}^2$ og salvelengde på 5m.

Det er antatt parallellhullskutt med 4 grovhull for å opprettholde symmetri og øke sikkerhetsmarginen. Totalt grovhullsareal: $4 \cdot \pi \cdot (5,1 \text{ cm})^2 = 327 \text{ cm}^2$. Avstand fra grovhull til nærmeste ladede hull: $a = d_g \cdot 1,75 = 179 \text{ mm}$ (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006a). I tillegg til 5 + 8 ladede hull i kutten er det lagt til ytterligere én rad (3 hull) med hjelpere for å bidra til bedre utkast.

Konturhull har hullavstand $S = 0,7 \text{ m}$ og forsetning $B = 0,8 \text{ m}$ (Statens Vegvesen, 2018).






Kontur 2 har hullavstand $S = 1,1 \text{ m}$ og forsetning $B = 0,9 \text{ m}$.

Liggerhull har hullavstand $S = 0,8 \text{ m}$ og forsetning $B = 0,8 \text{ m}$.

Strossehull har hullavstand $S = 0,9 - 1,3 \text{ m}$ og forsetning $B = 0,8 - 1,2 \text{ m}$.

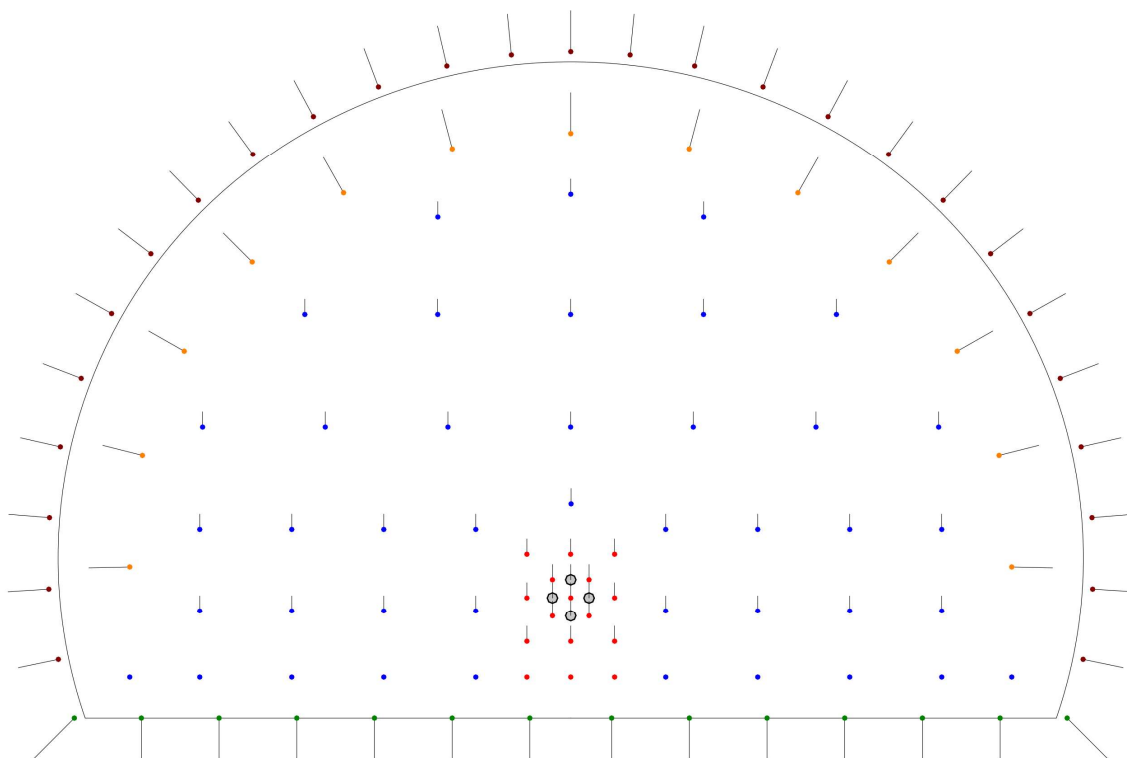
Hullavstandene varierer noe for tilpasning til tunnelprofilen, hvor stikning i odd er inkludert i målingen (Eksempelvis måles forsetning mellom kontur 2 og stross fra innerst i konturhullet til strosshullet, for å sørge for at den maksimale forsetningen overholdes for hele salvelengden). Konturhullene kan plasseres utenfor teoretisk profil for å forsikre om at eventuelle ujevnheter ikke er innenfor grensen, da dette vil medføre økt tid til rensk.

Etter utregninger inspirert av Orica og Forciti i tillegg til pensum i anleggsteknikk og ingeniørgeologi ved NTNU, blir ladningene fordelt som vist i figur 6.

Hulltype	Farge	Antall hull	Uladet [m]	Bunnladning [kg]	Bunnladning [m]	Streng [kg/m]	Pipelengde [m]	Pipeladning [kg]	Streng [%]	Ladning pr hull [kg]	Ladning totalt [kg]
Kontur		27	0,5	0,5	0,3	0,4	4,2	1,7	22 %	2,2	58,9
Kontur 2		13	0,5	0,8	0,5	0,8	4	3,2	44 %	4,0	52,0
Stross		42	1	0,5	0,3	1,8	3,7	6,7	100 %	7,2	302,1
Liggere		14	0,5	0,5	0,3	1,8	4,2	7,6	100 %	8,1	113,4
Kutt		16	0,5	0,5	0,3	1,8	4,2	7,6	100 %	8,1	129,6
		112									655,9

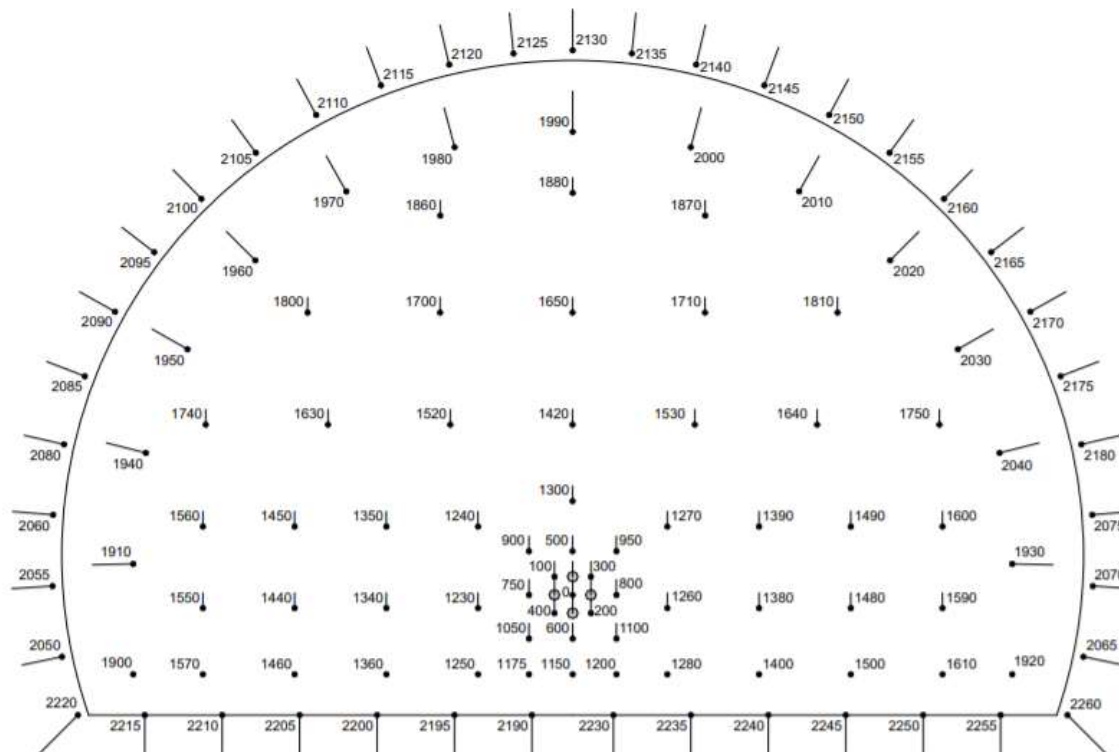
Figur 7: Ladningsmengder fordelt på hulltype for 5m salvelengde

Ukorrigert enhetsladning for en slik salve med salvelengde 5m blir da 8,1 kg.



Figur 8: Boreplan for T9,5-profil med salvelengde 5m

4.1.2 Tenningsplan



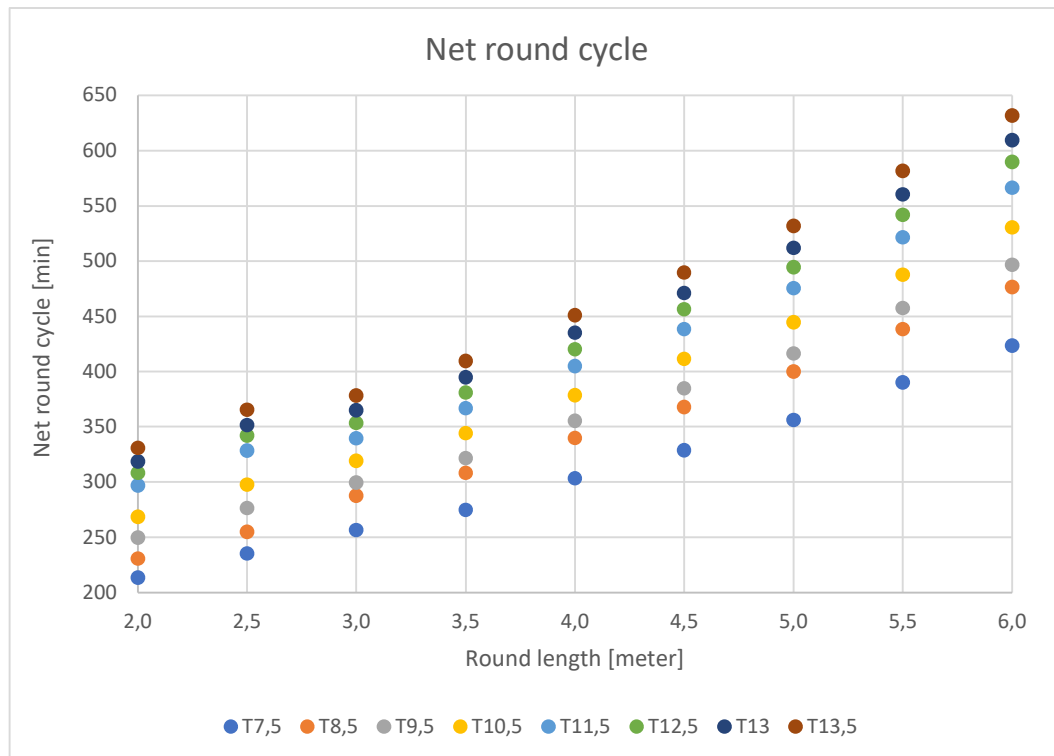
Figur 9: Tenningsplan, oppgitt i millisekunder.

Figur 8 viser tenntidspunkt oppgitt i millisekunder ved bruk av elektronisk tenningsystem. Ingen hull detoneres samtidig som begrenser påkjenningene på ytre omgivelser. Til tross for at ingen hull detoneres samtidig, er det kortere intervaller enn NONEL tillater, som kan gi bedre samvirke i tunnelsalven. Dersom tenningsplanen er konstruert riktig, vil samvirke mellom hullene føre til bedre fragmentering av tunnelmassene. I dette eksempelet er alle hullene detonert innen 2,3s til forskjell fra NONEL-tenning som ofte krever rundt 6,5s.

Utforming av tenningsplanen er inspirert av figur 15 i teknisk rapport 19 (Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, 2019), Kontursprengning i tunnel (Statens Vegvesen, 2011) og i samarbeid med Orica og Forcit.

4.1.3 Netto syklustid

Syklustiden til enhver salve avhenger av størrelsen. For å se på sammenhengen mellom dem opprettes et diagram med dataene. Hver graf tilsvarende et tverrsnitt, som igjen forandrer seg med salvelengde. I seg selv gir ikke disse resultatene noe informasjon om fremdrift og kapasitet, men det er likevel interessant å se på tidsforskjellene.



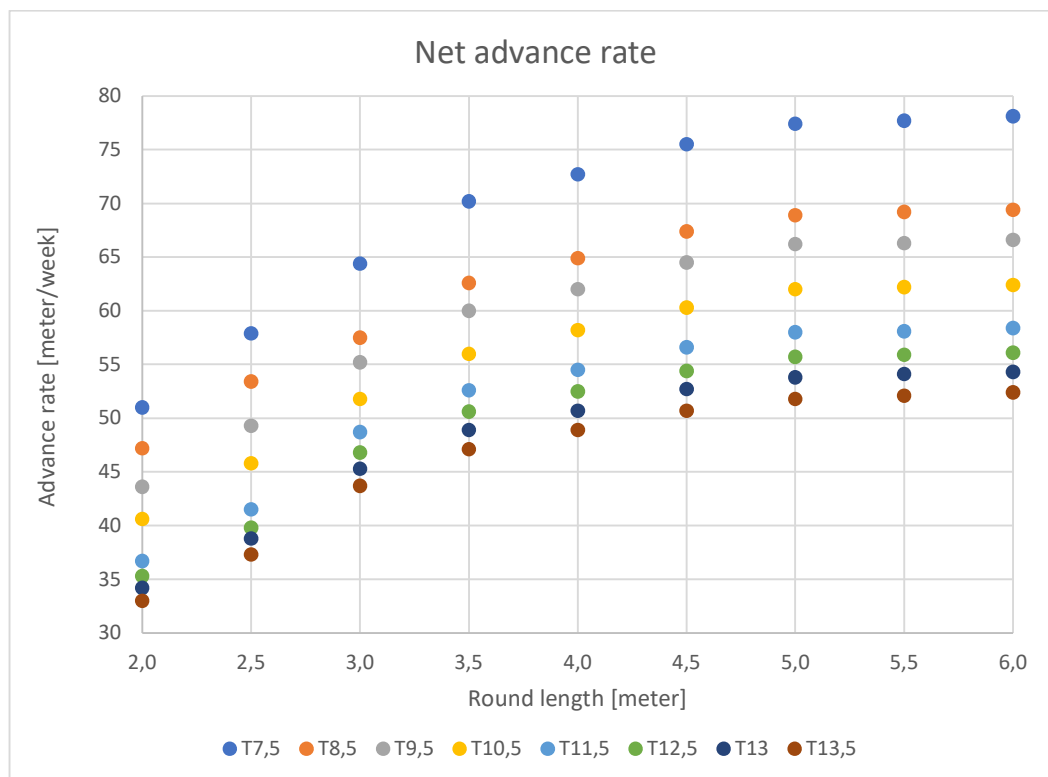
Figur 10: Resultat av netto salvesyklus for forskjellige salvelengder og tverrsnitt.

Som figuren viser, kan vi se at tidsforskjellene er størst for de lengste salvelengdene. Går man ned fra 6,0m salve til 5,0m, sparer man omtrent 80-100min per salvesyklus. Dersom man derimot korter ned fra 3,0 til 2,0m, vil man ikke redusere syklusen med mer enn rundt 50min. Dette gir naturligvis store utslag i fremdriften per uke.

Disse dataene tas med videre i beregningene, og blir basisverdier for tidsbruk per salve.

4.1.4 Netto ukentlig fremdrift

Ukentlig fremdrift forteller litt mer om hvordan kapasitetene fungerer i forhold til salvelengde. Som vi nå vet, påvirker salvelengden syklustiden mest for de lengste salvene. Det gjør naturligvis utslag på fremdriften.



Figur 11: Resultat av ukentlig fremdrift for forskjellige salvelengder og tverrsnitt.

De tre lengste salvene har tilnærmet lik fremdrift per uke. Teoretisk sett vil det vil være svært liten økning ved å gå opp til 6,0m salve dersom man normalt benytter 5,0m. Figuren viser derimot et solid fall ved kortere lengder, spesielt de aller korteste. Halveres en 5,0m salve, vil man redusere ukedriften med mellom 14 og 19m, avhengig av tverrsnitt. Til sammenlikning tilsvarer dette omtrent 70-75% av progresjonen.

4.2 Beregningseksempler for grenseverdi og fremdrift

For å illustrere sammenhengen mellom ladingmengde og grenseverdi vises noen teoretiske eksempler i dette kapittelet. En vegtunnel med profil T9,5 skal drives gjennom en ås. Et bolighus befinner seg over tunnellopet i to av eksemplene, med ulik avstand ned til tunnelen i de forskjellige eksemplene. Tunnelen i eksempel 3 går under et sykehus og danner dermed en mye større sone med strenge rystelsesbegrensninger.

Husets egenskaper er felles for de to første eksemplene; fundamentert på et tynt avrettingslag over berg med en plate av armert betong. Konstruksjonen er av tre, og regnes som en «vanlig bolig». I tillegg vil den ukorrigerede toppverdien for vertikal svingehastighet fastsettes til 20mm/s.

Sykehuset er fundamentert på en mer ujevn grunn med grus og silt. Bygget er i armert betong, og står på kohesjonspæler. Her er det ikke tatt hensyn til pælene med tanke på rystelseskravene. Man kan se for seg at tunnelen går litt til side for fundamentet, men at den kritiske avstanden fortsatt er 15m. α og β er hentet fra NTNUs 14A-98 (NTNU Anleggsdrift, 1998).

I tillegg ble det vurdert et eksempel med større avstand fra kritisk punkt til tunnelen. Det viste seg at avstander over tjue meter ikke gav noen begrensning for situasjonen med bolighuset, da normal drift vi ha en lavere enhetsladning enn maksimalt tillatt. For å få noen aktuelle data vil eksempel 3 sette strengere verdier for geologien og bygget over tunnellopet.

I eksemplene beregnes tider og fremdrift når man ser bort ifra sikring. Grunnen til at sikringsarbeidet ikke er inkludert, er at det er enorm variasjon som disse tiltakene medfører. Det gjør det vanskelig å sammenlikne resultatene for fremdrift. Merk at kritisk avstand beregnes ut fra nærmeste hull i hengen. Selv om enhetsladningen ikke vil være fullt så stor på denne avstanden, gir denne forenklingen økt sikkerhetsmargin for tidsberegningen. Samtidig vil praktiske tilfeller korrigeres for målingene som gjøres, noe eksemplene ikke kan ta høyde for.

4.2.1 Eksempel 1: 10m avstand, bolig

Grenseverdi

$$v_0 = 20 \text{ mm/s}$$

$$F_g = 2,5$$

$$F_b = k_b \cdot k_m \cdot k_f$$

$$\text{der } k_b = 1,0 \quad k_m = 1,2 \quad k_f = 0,8$$

$$F_b = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 0,8 = 0,96$$

$$F_d = 1,0$$

$$F_k = 1,0$$

$$v = 20 \text{ mm/s} \cdot 2,5 \cdot 0,96 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 48 \text{ mm/s}$$

Enhetsladning

$$v = 48 \text{ mm/s}$$

$$d = 10 \text{ m}$$

$$c = 1,0$$

$$\alpha = 0,8$$

$$\beta = 1,40$$

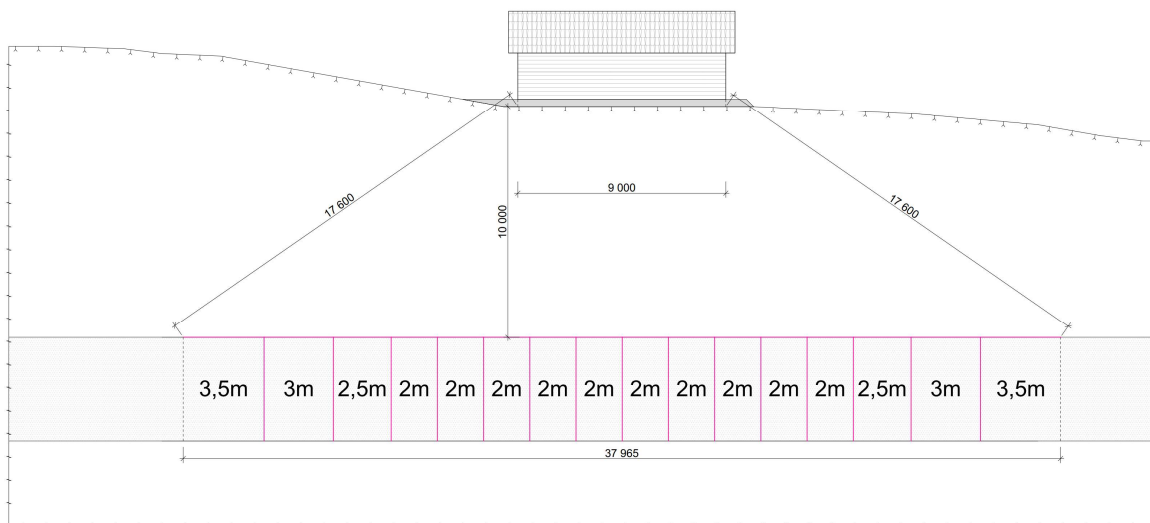
$$Q = 3,0 \text{ kg}$$

Tidligere er det vist at tunnelens ukorrigerde enhetsladning blir 8,1 kg for salvelengder på 5,0m. Hvor lang må avstanden til huset være for å kunne sprengre vanlig?

Formelen snus med hensyn på d:

$$d = \left| \frac{500 \cdot Q^\alpha}{v} \right|^{\frac{1}{\beta}}$$

Setter inn $Q = 8,1 \text{ kg}$ og får $d = 17,6 \text{ m}$



Figur 12: Skisse for beregningseksempel 1

Teoretisk sett vil tunnelen ha et kritisk område 14,5m horisontalt på hver side av huset. Området, som totalt utgjør 38m, krever tiltak som reduserer enhetsladningen. Her må enhetsladningene justeres etter målinger som blir gjort opp mot husets fundament. Det er ikke sikkert at det reelle tilfellet vil kunne gjøres nøyaktig slik eksempelet tilsier. Grunnforhold og avvik ved boring og tenning kan påvirke utslaget på måleapparatet.

Salvelengder og fremdrift

Det totale området på 38m vil bestå av 16 salver, fra 3,5m salvelengde i utkanten helt ned til 2,0m under bygningen. I denne situasjonen vil salvene være symmetriske på veg mot og fra bygget. Resultatene viser at den gjennomsnittlige fremdriften ligger på 47,8 m/uke eller 34,9m³/h, til forskjell fra 66,2m/uke og 48,0m³/h dersom man kunne brukt 5,0m salvelengder i området. Dermed vil rystelseskravene gjøre at prosessen vil ta 71,6 arbeidstimer på denne strekningen, som er 19 timer mer enn ved normal drift. Dette tilsvarer et tap av fremdrift i området under huset på 26,3%.

4.2.2 Eksempel 2: 15m avstand, bolig

Eksempel 2 har samme utgangspunkt som det forrige eksempelet. Her befinner derimot boligen seg 15m over tunnellopet. Denne situasjonen ble valgt for å illustrere hva som forandrer seg med den kritiske avstanden. Beregning for grenseverdi vil tilsvare den forrige oppgaven, men enhetsladningen og kritisk område vil forandre seg. Figur 12 viser situasjonen og avstandene, med tilhørende salver i tunnellopet.

Enhetsladning

$$v = 48,0 \text{ mm/s}$$

$$d = 15 \text{ m}$$

$$c = 1,0$$

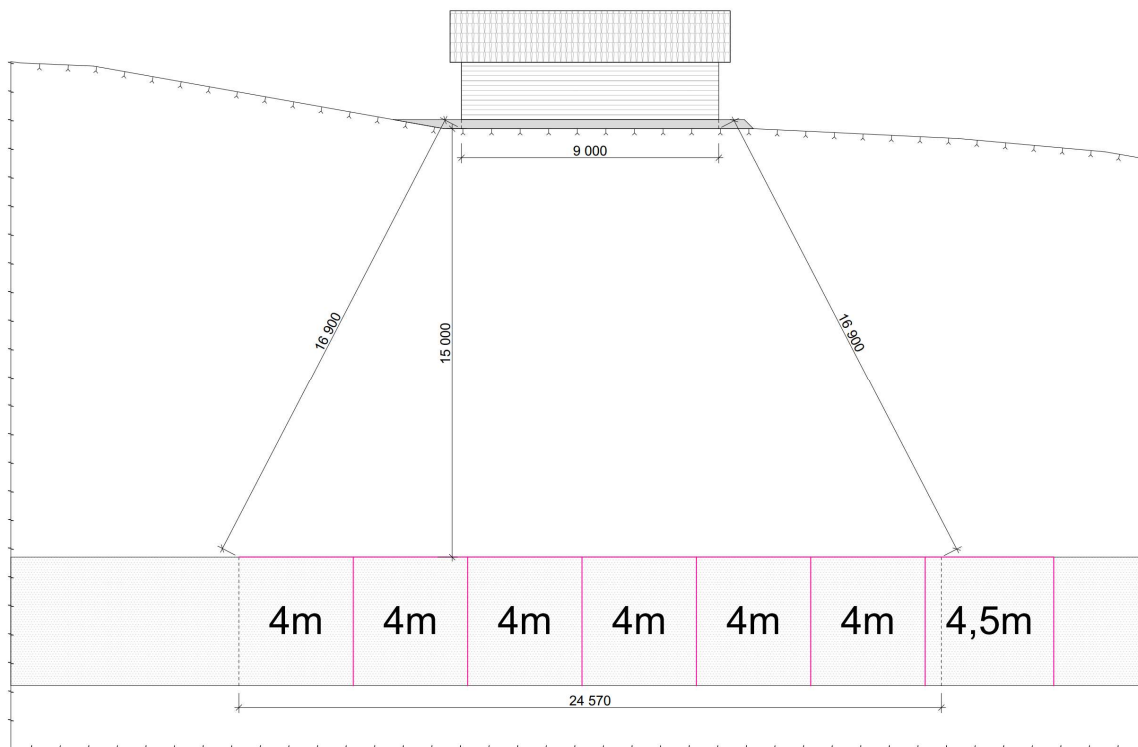
$$\alpha = 0,8$$

$$\beta = 1,42$$

$$Q = 6,5 \text{ kg}$$

Igjen snur vi formelen for å finne kritisk avstand

$$d = \left| \frac{500 \cdot Q^\alpha}{v} \right|^{\frac{1}{\beta}} = \left| \frac{500 \cdot 8,1^{0,8}}{48,0} \right|^{\frac{1}{1,42}} = 16,9 \text{ m}$$



Figur 13: Skisse for beregningseksempel 2

Salvelengder og fremdrift

Tiltakene som trengs for denne situasjonen, krever ikke like store justeringer. Det kritiske området består av seks salver på 4,0m, i tillegg til en salve på 4,5m helt i utkanten av sonen. Fremdriften vil dermed ikke reduseres like mye. Fra en gjennomsnittlig fremdrift for full salvelengde på 66,2m/uke og 48,0m³/h, blir den med disse tiltakene 62,4m/uke og 45,2m³/h. Dette resulterer i en økning i totaltid fra 39,5 til 42 arbeidstimer, og dermed en forsinkelse på bare 6% i det aktuelle området.

Det er den maksimalt tillatte enhetsladningen på 6,5kg som gjør at tiltakene blir relativt enkle å håndtere, og at forsinkelsene blir små. Dersom kritisk avstand hadde økt til rundt 18m, ville tillatt ladning vært så stor at sprengningsplanen kunne blitt gjennomført med normal drift gjennom hele sonen.

4.2.3 Eksempel 3: 15m avstand, sykehus

Situasjonen i eksempel 3 er noe mer utfordrende. Kritisk avstand mellom tunneløpet og sykehuset er 15m, og sykehuset står på toppen av et lag med grus og silt. Både sykehuset og grunnforholdene vil dette legge en vesentlig demper på maksimal enhetsladning.

Grenseverdi

$$v_0 = 20 \text{ mm/s}$$

$$F_g = 1,0$$

$$F_b = k_b \cdot k_m \cdot k_f$$

$$\text{der } k_b = 0,65 \quad k_m = 1,2 \quad k_f = 0,9$$

$$F_b = 0,65 \cdot 1,2 \cdot 0,9 = 0,70$$

$$F_d = 1,35 * d^{-0,19} = 0,81$$

$$F_k = 1,0$$

$$v = 20 \text{ mm/s} \cdot 1 \cdot 0,70 \cdot 0,81 \cdot 1,0 = 11,3 \text{ mm/s}$$

Utfra formelen varierer grenseverdien avhengig av den kritiske avstanden. Ettersom sykehuset har flere vibrasjonsfølsomme instrumenter og installasjoner, har byggherre satt en grenseverdi på 10mm/s for hele området.

Enhetsladning

$$v = 10 \text{ mm/s}$$

$$d = 15 \text{ m}$$

$$c = 1,0$$

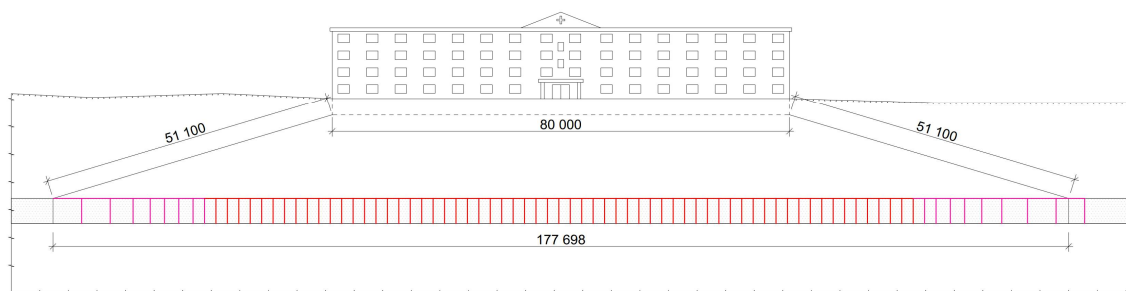
$$\alpha = 0,8$$

$$\beta = 1,42$$

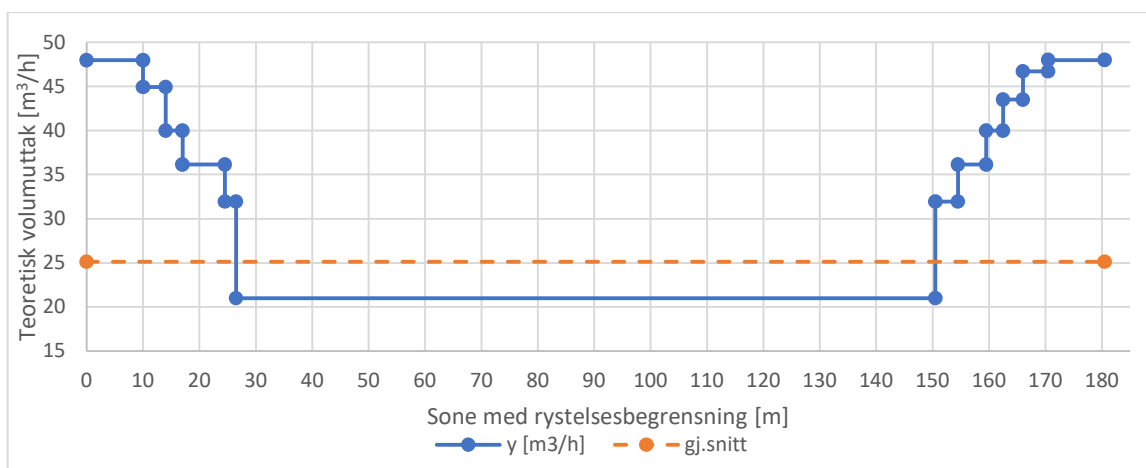
$$Q = 0,92 \text{ kg}$$

Kritisk avstand

$$d = \left| \frac{500 \cdot Q^\alpha}{v} \right|^{\frac{1}{\beta}} = \left| \frac{500 \cdot 8,1^{0,8}}{10} \right|^{\frac{1}{1,42}} = 51,1 \text{ m}$$



Figur 14: Skisse for beregningseksempel 3



Figur 15: Beskrivelse av volumuttak langs tunnelaksen

Salvelengder og fremdrift

Figur 13 viser oppdeling av salvene under sykehuset, mens figur 14 ser på den teoretiske volumdriften i tunnelen. Krittisk område begynner 48,8m før man befinner seg under sykehuset. På grunn av justering av β -verdi kan man likevel benytte seg av 5,0m salve i begynnelsen. Deretter vil man gradvis korte ned på salvelengden på grunn av økende krav til enhetsladning, for så å møte et punkt hvor 2,0m salvelengde i seg selv ikke er et godt nok tiltak.

Her har forfatterne valgt å benytte seg av patronert sprengstoff. De små patronene får luft imellom seg selv og fjellet, som gjør at enhetsladningen kan økes noe. Grenseverdien for enhetsladning er 0,92kg, men vi øker til 1,0kg på grunn av typen sprengstoff. Med den lave ladningen i hvert hull må det kompenseres med langt flere borehull enn normalt. Dette beregnes videre etter mengde sprengstoff per kubikkmeter. T9,5-tunnel benytter gjerne 1,5kg/m³, hvor tverrsnittet og salven utgjør 133,2m³. Dette utgjør totalt 200kg, som derfor blir 200 borehull.

Volumkapasiteten synker som kjent ved kortere salvelengder, men det desidert største utslaget kommer av de ekstra tiltakene rundt 27m inn i kritisk område. De 200 borehullene vil ta lenger tid, i tillegg til at patronert sprengstoff øker ladetiden. I tillegg kommer rensk, pigging og annet etterarbeid som fører til forsinkelser og kapasitetstap. Resultatene viser at man i denne situasjonen taper 48% tid, sammenliknet med vanlig drift. Volumuttaket reduseres til 52%. Dette tilsvarer totalt 234 arbeidstimer.

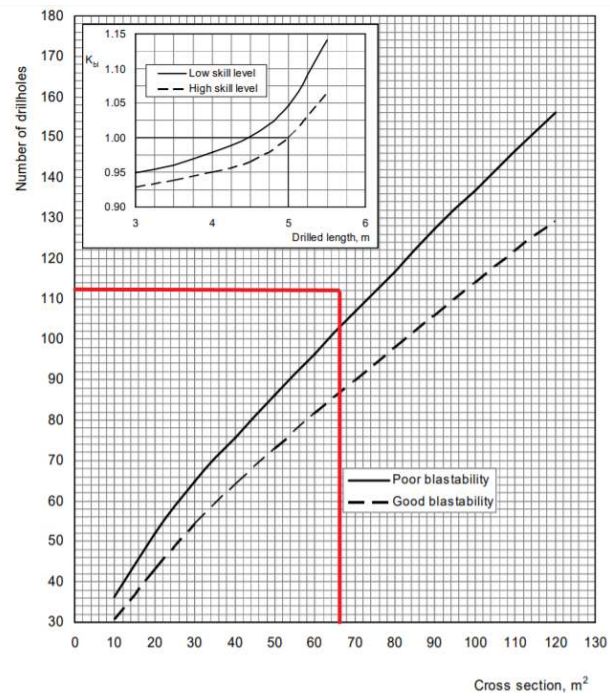
4.3 Innhentede erfaringer

4.3.1 Antall borehull

NTNU-modellene for tunnelsprengning er ofte langt mer teoretiske og forsiktige enn hvordan det faktisk praktiseres. I realiteten brukes mer sprengstoff for å øke sikkerheten for gjennombrytning. I eksempelet av sprengningsplan er det lagt inn 112 ladede hull for en T9,5-tunnel med 5m salvelengde, som etter figur 15 er 117% av det teoretiske antallet.

Tall fra bransjen sier at i et tilsvarende tverrsnitt med salvelengde 5,5m brukes 125-130 hull. Med vårt utgangspunkt i 112 hull på 5m, og en korreksjonsfaktor på ca. 1,07 for salvelengde på 5,5m, ender vår beregning i 120 hull. I motsetning ville den teoretiske beregningen vært på 102 hull for denne lengden.

Det sentrale er dataene som forandrer seg. Den viktigste parameteren er antall ladete hull. Her er det tatt utgangspunkt i sprengningsplanen fra teoridelen, gjeldende for 5,0m salvelengde i et T9,5-tverrsnitt. Med sine 112 ladete hull vil den gå utenfor NTNUs standarder for antall hull ved forskjellige tverrsnitt, som vist i figur 15. Beregningsgrunnlaget for denne oppgaven er markert i rødt. Dette fungerer som et bevis på at rapporten og modellen har lagt seg på en linje mellom det teoretiske og det praktiske, ettersom entreprenørene gjerne har enda flere hull enn dette tilfellet. Figuren viser også en korreksjonsfaktor for forskjellige salvelengder, som har bestemt antall borehull for andre tverrsnitt og lengder med utgangspunkt i eksempelet. Korreksjonen for 2,5m og 2,0m er forlengede grafer av figuren, med faktorer på henholdsvis 0,91 og 0,90.



Figur 16: Antall borehull til tverrsnitt, i tillegg til korreksjonsfaktor.

(NTNU Department of Civil and
Transport Engineering, 2006a)

	6,0m	5,5m	5,0m	4,5m	4,0m	3,5m	3,0m	2,5m	2,0m
T7,5	106	101	95	92	90	89	88	86	85
T8,5	121	115	108	104	102	101	100	98	97
T9,5	126	120	112	109	107	105	104	102	101
T10,5	134	127	119	116	113	112	110	109	107
T11,5	149	142	133	129	127	125	123	121	120
T12,5	155	147	138	134	131	129	128	126	124
T13	160	152	143	138	136	134	132	130	128
T13,5	166	158	149	144	141	139	137	135	134

Figur 17: Oversikt over antall borehull ved ulike salvelengder og tverrsnitt.

4.3.2 Tennmidler

Bruk av elektroniske tennere er svært normalt, omtrent obligatorisk, i rystelsesbegrensende områder. Derimot er dette mer omstridt i normal drift, da det er langt dyrere enn «vanlige» elektriske tennmidler, i tillegg til at det muligens tar noe lengre tid. Her har entreprenørene forskjellige syn på saken, men det gjentas at elektroniske tennmidler gjerne produserer et bedre resultat, men på bekostning av tid og penger. Geologiske forhold påvirker også i stor grad valget av tennmidler.

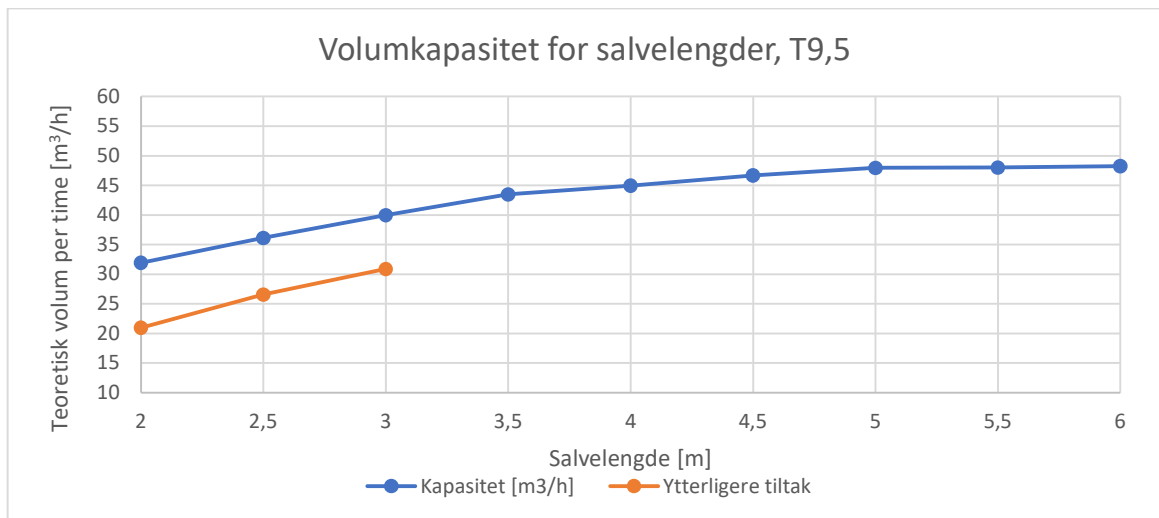
Likevel er elektroniske tennere også litt i vinden. Man kan ikke utelukke at slike tennmidler en gang i nær fremtid vil dominere også i normal tunneldrift. Derfor har rapportens sprengningsplan tatt slike tennere i bruk, og kan kanskje være en tidlig dytt i retning mot å vurdere elektroniske tennere i flere situasjoner. Ettersom det er standard i rystelsesbegrensede områder, kan det være fordelaktig å øke kompetanse og erfaringer til bruken av disse tennmidlene. Det tas ikke hensyn til opplæring i tennsystemet i beregningene.

4.4 Faktorer for fremdrift i tunnel

4.4.1 Kapasitet for forskjellige salvelengder

Ved hjelp av beregningene som er gjort i rapporten, blir det her vist et sammenfattet resultat av tunnelproduksjon. Grafen fokuserer på tunneldrivingen, uttak av fjell og klargjøring til neste salve. Tiden for sikringstiltak må beregnes separat. Den blå kurven for kapasitet gjelder normale tverrsnitt for forskjellige salvelengder. Den oransje kurven viser produksjonen der mer omfattende tiltak må gjøres. Eksempelvis liknende tiltak som gjøres i eksempel 3.

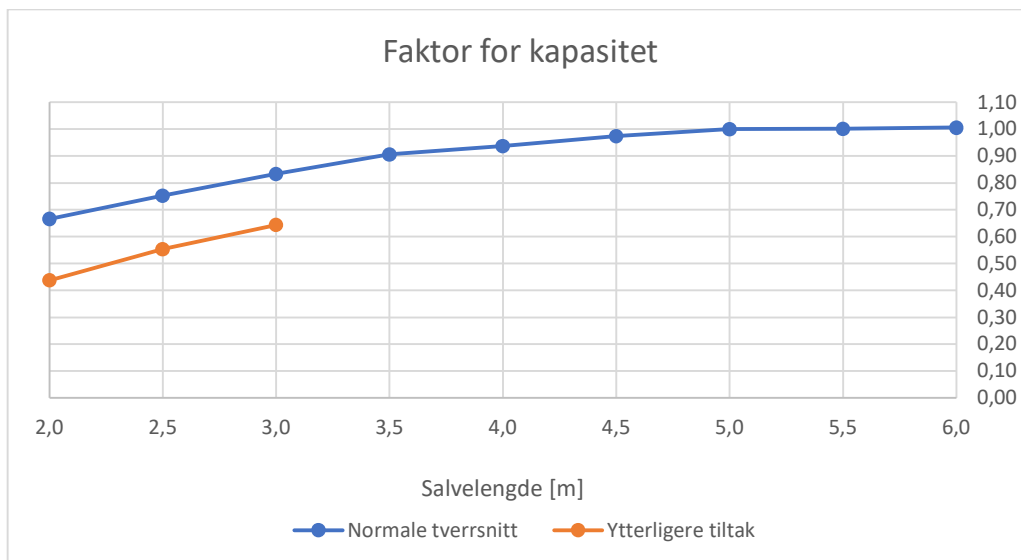
For korte salvelengder vil usikkerheten rundt syklustiden øke. Her vil små avvik ha større effekt på den totale tiden per salve. Dermed anbefales det ved avlesning av grafen at kapasiteten befinner seg et sted mellom den blå og den oransje kurven.



Figur 18: Volumkapasitet for ulike salvelengder.

4.4.2 Faktor for volumkapasitet

Når en entreprenør skal beregne kapasiteten de vil oppnå på et tunnelprosjekt, vil svarene variere avhengig av blant annet tilgjengelig utstyr, erfaring og geologi. Derfor har forfatterne valgt å vise beregningsresultatet for produksjon som en faktor. Ved å se på grafen kan man finne ut hvor mye kapasiteten reduseres når salvelengden endres. For halv salvelengde (2,5m), ser vi at kapasiteten er mellom 25 og 45% lavere. Faktoren er basert på beregningene av T9,5-tverrsnittet, men trenden vil være gjeldende for andre tverrsnitt.



Figur 19: Kapasitetsfaktor fordelt over ulike salvelengder.

5 Diskusjon

I dette kapitlet vil vi reflektere over spørsmålene i innledningen. Beregningens nøyaktighet og troverdighet vil drøftes. I tillegg vil diskusjonskapitlet ta for seg utfordringer med arbeidet. Det vil alltid finnes feilkilder som kan føre til unøyaktige resultater, det være seg formlene, beregningene eller tolkningen av resultatene. Resultatene bør undersøkes med kritiske øyne, og overføringsverdien fra beregningene til reelle tunnelprosjekter vil variere i henhold til mangfoldet i geologi og arbeidsmetoder.

Innledningsvis stilte vi noen sentrale spørsmål. Hvordan påvirker vibrasjonskrav fremdriften til tunnelbyggingen, og hvor mye tid går tapt ved forsiktigsprengning i disse situasjonene? Forrige kapittel har lagt frem konkrete tall, mens diskusjonen vil bryte ned resultatene i mindre deler og se på alternative løsninger.

5.1 Korte salvelengder

TunSim (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c) gir ingen mulighet til å beregne fremdrift og kapasitet ved salvelengder på under 2,8m. Slik har vi lite håndfast grunnlag for å si noe om ekvivalenttidene for denne lengden, men antakelser kan gjøres med bruk av de andre resultatene. Ved å sammenlikne netto salvesyklus eller netto ukentlig fremdrift for hver enkelt tunnelprofil og salvelengde, kan man ekstrapolere for å finne disse forsinkelsene. Ekstrapolasjon er derimot relativt usikkert og unøyaktig, ettersom de aktuelle grafene kan avvike fra det sannsynlige forløpet. For salvelengder under 3,0m kan eksempelvis grafene gå fra lineære til eksponentielle, som vil være svært vanskelig å forutse.

NTNU publiserte i 1975 og 1979 to rapporter som her kan være relevante. På den tiden var to til tre meter salvelengde normalt, og rapportene innehar derfor informasjon om korte lengder som nye rapporter utelater. Selv om rapportene opererer med de aktuelle salvelengdene, er dataene svært gamle og utdaterte. Disse rapportene tar eksempelvis hensyn til håndholdte boremaskiner. I dag har vi har naturligvis mer moderne utstyr og lengre erfaring og kontinuerlig forbedringer disse rapportene ikke har.

For å skaffe mer nøyaktige målinger av fremdrift ved veldig korte salvelengder bruker vi her manuell beregning etter oppskrift i NTNUs 2A-05 (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006a). Ved å først gjennomgå en normal situasjon med fem meter salvelengde til en T9,5-tunnel, kom vi frem til et relativt nøyaktig resultat. Håndberegningen viste 420,7min netto salvesyklus, mot TunSims (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c) 416,5min. Med en feilmargin på 1% ble denne metoden vurdert som den beste for å finne syklustider og netto fremdrift for de korteste salvelengdene.

Her viste deg seg at man sparer lite tid per salve på å korte ned salvelengde fra eksempelvis tre til to meter, sammenliknet med seks til fem meter. Likevel tilsvarer dette at fremdriften per salve er redusert med én meter, som resulterer i at ukentlig fremdrift reduseres langt kraftigere ved de aller korteste salvelengdene.

5.2 Alternative løsninger for beregningseksempel

Som et alternativ i eksempel 3, kunne det vært mulig å dele opp salven. Som nevnt i kapittel 2.2, medfører ikke en oppdeling av salven en endring i enhetsladningen dersom det brukes etthullstenning. Fordelen er at man kan konsentrere seg om den nedre delen av salven i første omgang, og der vil også avstanden til kritisk objekt være større. Etter at den nedre delen av salven er sprengt ut, har den resterende delen vesentlig lavere innspenning, som gjør brytningen lettere. Da blir det lettere å ta hensyn til rystelseskravene på områdene i tunnelen som er nærmest objektet som må beskyttes.

En annen mulighet er å utbedre forholdene i og rundt det kritiske objektet. Her finnes flere tiltak som senker påvirkningskraften til vibrasjonene. Dempeputer kan plasseres inntil objektets fundament, eller det kan drives ei grøft fremfor fundamentet (Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, 2019). Sistnevnte er sannsynligvis det beste og mest aktuelle tiltaket her. Skal grøfta være permanent, må den fylles med pukk og dreneres, samt legges duk i. Begge disse tiltakene bidrar til at objektet «tåler» vibrasjonene bedre, som igjen fører til at enhetsladningen kan økes noe. Ettersom forfatterne ikke har funnet ut av hvor mye disse tiltakene utgjør, kan det heller ikke sies noe om hvor mye driftskapasiteten eventuelt øker.

Det finnes også noen muligheter i selve salven som kan gjøres for å endre forplantningsevnen til vibrasjonene. Man kan benytte seg av slissing, eller bore en dobbel søm. I tillegg kan et alternativ være å bore søm der noen av hullene lades og brukes som presplitt. Søm boring er en kjent teknikk i kontursprengning.

5.3 Oppdeling av syklusen

Ved å dele opp salvesyklusen kan man analysere og diskutere resultatene bedre. Dette kapittelet ser nærmere på hoveddelene i syklusen hver for seg, og vurderer hvilke hensyn som ikke ble tatt med i beregningsgrunnlaget. Praktiske situasjoner kan justere svarene med parametere det ikke finnes teoretisk beregningsdata for.

Riggetid

Man antar gjerne at riggetiden er omtrent like stor uansett salvelengde. For en T9,5-tunnel beregnes totalt 40,8min for rigging, hvor arbeid i forkant av boring, lading, sprengning, lasting og transport inngår i tiden. Riggetid utgjør ved full salvelengde omtrent 10% av hele tidsbruken, og vil prosentvis utgjøre en noe større del av prosessen i mindre tverrsnitt. Det er derimot langt mer merkbart ved ulike salvelengder, da riggetiden vil utgjøre 16% ved 2,0m salvelengde i motsetning til 8% ved 6,0m salve.

Boretid

Med dagens utstyr blir kapasiteten for boring ganske lik, uansett tverrsnitt og salvelengde. Det er utvilsomt bergkvalitet som avgjør de største avvikene i boretid. Dårlig fjell kan føre til mange problemer, både når det gjelder borehastighet, utdragning av bor, i tillegg til knusningssoner som gjør at borehull ikke kan lades og brukes til sprengningen. Gitt gode norske fjellmasser, vil boretiden i hver salve variere avhengig av antall borehull og borelengde.

Med utgangspunkt i et T9,5-tverrsnitt med salvelengde på 5m, utgjør boretiden hele 35% av den totale syklustiden. Dette viser at boretiden har stor påvirkning på fremdriften i tunnelen. Mange entreprenører benytter seg av ekstra borehull og økt mengde sprengstoff for å sikre god effekt i skytingen. Vurderingen gjøres fordi det vil være kostbart å gjøre feil, men i og med at boringen utgjør så stor del av tiden, kan dette være en kilde til uenighet om fremdrift mellom byggherre og entreprenør.

Ladetid

Ladetiden påvirkes mest av type sprengstoff. ANFO og flytende eller patronerte løsninger av emulsjonssprengstoff har egne kapasiteter på denne tiden. Utover dette påvirker naturligvis antall hull og borelengde ladetiden. Flytende slurry har lavere ladetider enn patronerte sprengstoff, ettersom det går raskere å pumpe sprengstoffet inn enn å plassere og stampe det. Ifølge figur 2.8 i 2B-05 (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006b), er ladetiden for patronert sprengstoff omtrent det dobbelte av tiden for flytende.

I tillegg må ladningene kobles opp med tennmидdelet. Tiden avhenger av type tennmiddel, hvor ikke-elektriske er vanligst i normal drift. I rystelsesbegrensede områder er som kjent elektroniske tennere omtrent alltid i bruk. Ekstra tid kan forekomme, avhengig av erfaring og vane hos entreprenørene. Dette tilsvarer mellom 0-30% forsinkelse sammenliknet med NONEL (Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, 2019). Innhentet informasjon fra entreprenørene svarer at dette ikke utgjør mer enn 0-5%.

I beregningene er det ikke tatt hensyn til ekstra tid for elektroniske tennere. Det antas derfor at entreprenørene er kjent med slike tennmidler. Beregningene forteller at ladetiden utgjør 51,5min av salvesyklusen for T9,5 med full lengde. Dette stemmer godt overens med entreprenørenes antagelse på rundt én time.

Lastetid

Lastetiden utgjør 76,9min av syklusen, tilsvarende 18,5% for en normal situasjon. Halvert salvelengde fører teoretisk sett til halvert lastetid, altså er det et lineært forhold mellom salvelengde og lastetid. Fordi syklustiden ikke halveres ved halv salvelengde, vil lastetiden utgjøre en mindre del av syklusen ved kortere salvelengder.

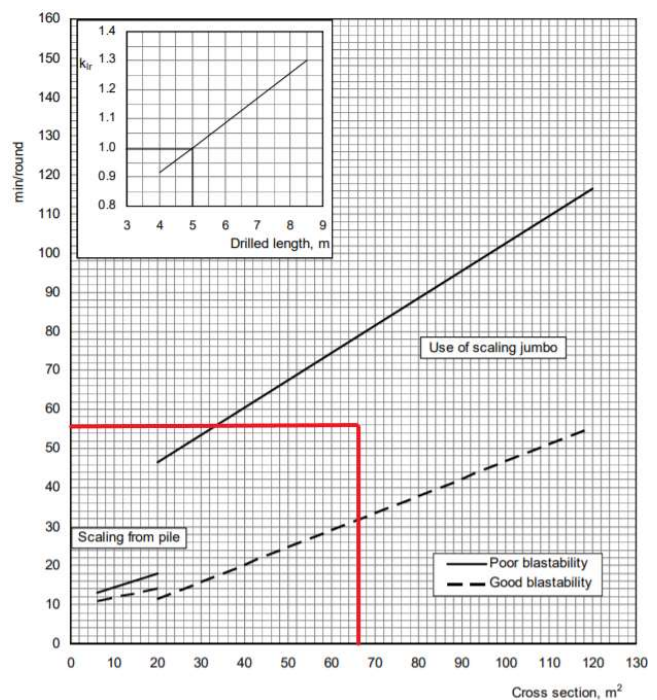
I tillegg må det tas med i beregningene at kortere salver har mindre innspenning, som er sentralt for lastetiden. Basert på erfaring fører dette til en mer lettlastet salve, som kan gjøre at lastetiden reduseres noe ved korte salvelengder. Denne sammenhengen er ikke tatt hensyn til, men vil i praksis kanskje redusere antall skuffer eller øke hastigheten til lastingen.

Forfatterne fikk også inn en morsom kommentar angående hva som kjennetegnet en god tunnellaster før i tiden. «Han står på stuff når liggerne går». Selvsagt fungerer det ikke slik i dag, sikkerhet kommer alltid først, men prinsippet er likevel aktuelt: Å ha en flytende drift, hvor en aktivitet tett følger en annen.

Rensk og ventilasjonstid

Mekanisk og manuell rensk påvirkes av både tverrsnitt og salvelengde. For T9,5 settes denne basisverdien til 55,6min, hvor ulike salvelengder gir en korreksjonsfaktor. Som figur 13 viser, har TunSim (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c) lagt seg på middels sprengbarhet. Korreksjonsfaktoren synker med $\approx 0,09/m$. Beregningene har forutsatt at denne faktoren synker lineært ned mot 2,0m salvelengde. Denne parameteren kan muligens justeres noe opp, ettersom enkelte faktorer er relativt stabile uansett salvelengde. Dette gjelder for eksempel riggetiden til renskarbeidet.

Ventilasjonstiden i TunSim (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c) er statisk på 11,5min uansett salvelengde for en T9,5-tunnel, og varierer dermed bare for tverrsnitt. Her regnes tiden til å være 9,5min for T7,5, og 15,9min for T13,5. Ventilasjonstiden vil i realiteten også forandres ved ulike lengder, men relativt lite; lengre salver har noe lengre ventilasjonstid.



Figur 20: Tid til rensk med hensyn på tverrsnitt og salvelengde

(NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006a)

Sikringstid

Sikringsarbeid er vanskelig å beregne tid for på et generelt grunnlag, fordi det finnes så mange forskjellige metoder og mengder av det. Sikringsarbeidet avhenger i stor grad av geologien og bergforholdene, som plasseres inn i bergmasseklasser. Disse klassifiseres igjen inn i sikringsklasser, som forteller hvilke tiltak som må tas. I tillegg kan ofte byggherre sette krav til dette arbeidet.

Hvis man ser på bolting som et eksempel, kan man se for seg at det settes 20 bolter ved normal 5,0m salve, og 10 bolter ved halv salvelengde. Dermed er boltetiden neglisjerbar, med mindre andre relevante parametere spiller inn. Vil man bruke lengre eller kortere tid per bolt ved halv lengde? Er riggetiden og annet tilhørende arbeid til bolting like omfattende uansett borelengde? Det samme gjelder også ved injisering av sprøytebetong. Totalt sett er det mulig at noe forsinkelse ved kortere salvelengder kan forsvares, ettersom sikringsarbeidet kan være mer tidskrevende per meter. Slike forsinkelser er det vanskelig å måle, og kan variere mye fra en salve til en annen.

Mengde og type sikring har ikke nødvendigvis noen sammenheng med rystelseskrav. Derfor er sikringstider utelatt fra beregningene. Sikringsarbeid vil utvilsomt øke syklustiden og redusere fremdriften for alle tunneler, sammenliknet med rapportens beregninger. Det knyttes derimot usikkerhet til hvor mye dette påvirker sammenhengen mellom forskjellige salvelengder.

5.4 Samspill i bransjen

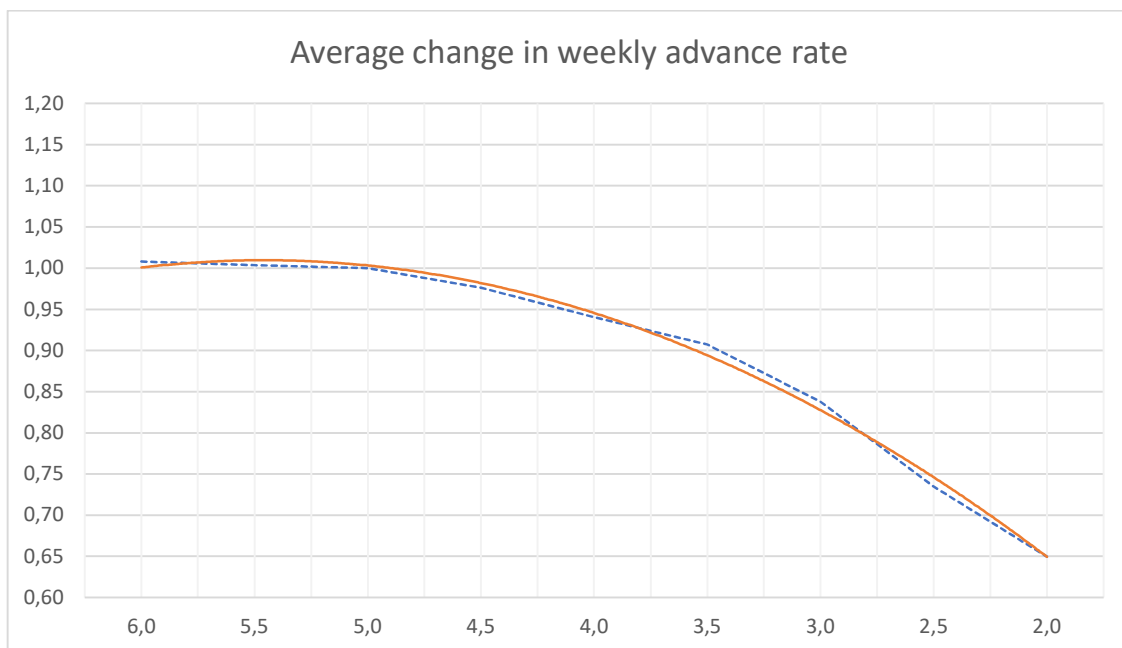
For å utarbeide den beste og mest mulig nøyaktige byggetidsmodellen vil det kreve god informasjonsflyt på tvers av firma og rolle i en entreprise. Dette er ønskelig for å ha et bredt nok spekter av erfaringer, slik at alle deler av prosessen kan optimaliseres.

Et slikt samarbeid er ikke nødvendigvis så enkelt. Forståelig nok ønsker kanskje enkelte å tilbakeholde informasjon andre bedrifter ikke har, for egen vinning. I et teknisk perspektiv kan dette gi fordeler i anbudsrunder eller liknende. Dersom all informasjon er allmenn, og alle bedrifter har tilgang til de samme tidsestimatene, vil forskjellene dem imellom minke. Konkurransgrunnlaget blir mer likt, og på sett og vis mer rettferdig.

I tillegg har vi entreprisesammensetningen, forholdet mellom byggherre og entreprenør. Får entreprenøren for liten tid vil det føre til dårlige resultater, mens for mye tid gir unødvendig slingringsmann og forsinkelser i driften. Den tenkte modellen bør gi et godt grunnlag av byggetid både for byggherre og entreprenør, slik at enighet og forståelse overfor hverandre blir enklere å gi.

5.5 Validitet for beregninger

Svarene fra resultatkapittelet gir relativt «streng» estimater, i form av at det fortsatt kan holdes et relativt høyt fremdriftsnivå ved korte salvelengder. Gitt at grunnforholdene ikke påvirker driften, og at rystelsesbegrensningene er dimensjonerende, er det ingen grunn til å ligge på latsiden; beregningene viser at tiltak mot rystelser ikke gir like store tap i fremdrift og kapasitet som først antatt.



Figur 21: Gjennomsnittlig endring i fremdrift for alle tverrsnitt ved ulike salvelengder.

Blå stiplet linje viser de faktiske tallene ved intervallene, mens den oransje grafen er en trendlinje. Figuren tar utgangspunkt i 5,0m salvelengde, som her tilsvarer 1,00. Her er det tydelig at man ved 4,0m lengde ikke mister mer enn $\approx 6\%$ av fremdriften, mens halv lengde mister $\approx 25\%$. Dette er et langt mindre tap enn hva forfatterne, veileder og entreprenørene antok.

I dialog med entreprenørene har de kommet med sine antydninger om redusert fremdrift. Her har forfatterne mottatt relativt entydige svar fra flere sentrale personer. For en reduksjon i salvelengde på én meter, mener de at fremdriften vil reduseres med rundt 15%. For halv salvelengde, hele 45%. Naturligvis vil det dermed dukke opp noen spørsmål; hvorfor er det så lite tap i fremdrift ved kortere salvelengder? Er modellen bygd opp for teoretisk, og finnes det noen andre parametere som burde vært med for å få gode nok estimater?

Her mener vi at det ikke er dannet tilstrekkelig grunnlag for å si at beregningene i rapporten er for «strenge». Avvikene kan komme av at rapporten tar utgangspunkt i teoretiske utregninger som ikke tar hensyn til menneskelige faktorer. Det vil sannsynligvis dukke opp flere problemer i rystelsesbegrensede situasjoner enn ved normal drift, som må vurderes kontinuerlig. Blant annet vil det kreve større grad av kompetanse og erfaring for personell og ledelse. Dette kan innebære at produksjonen oftere må stoppe opp for å gi tid til målinger, undersøkelser og inspeksjoner for byggherre.

Forfatterne mistenker også at scenarioet som er lagt til grunn, det å redusere salvelengde *kun* på bakgrunn av rystelseskrav, ikke er så vanlig. Korte salver kan gjerne komme i kombinasjon med geologiske forhold, uten at det nødvendigvis alltid er sånn. Dermed er det mulig at entreprenørenes antydninger også baserer seg på at situasjonen innebærer dårlig geologi, og vil kreve ekstra omfattende sikringstiltak.

Rapporten har i hele prosessen benyttet offisielle formler og verdier i beregningene, med unntak av antall borehull. Her gikk forfatterne klart inn for en økning – en kompensasjon for å gjøre sprengningsplanen mer realistisk og virkelighetsnært i motsetning til de teoretiske oppbygningsmetodene. Antall borehull er fremdeles ikke på et helt realistisk nivå, men det har ført til utslag i boretiden, som forfatterne mener forsterker sammenlikningsgrunnlaget.

6 Innovasjon og veien videre

6.1 Viktigheten av en modell for tidsestimering

Beregning av tunnelbyggetid der man må forvente redusert fremdrift er tema som er lite omtalt og redegjort for. Det finnes mange kloke tunnelarbeidere og ingeniører som har sine meninger om progresjon ved ulike forutsetninger. Likevel finnes det ingen felles metoder for utregning av byggetid som brukes som utgangspunkt. Målet bør være å kunne bruke gode modeller for å estimere tidsbruk, der modellene baserer seg på erfaring og realistiske forventninger. For å nå det målet må det gjøres en kollektiv innsats fremover med å samle erfaringsdata på en god måte. Dette gjelder både for tenningsplan og salvelengder.

Elektroniske tennere blir i økende grad vanlig for tunneldriving. I dag brukes de mest til sprengning der nøyaktigheten må være stor, og der konturen har mye betydning. I bransjen uttrykkes det at erfaringene med elektroniske tenningsystem er positive på alle bruksområder, men kostnadene er ofte betydelig større. Derfor er det begrenset hvor ofte det brukes.

For at bransjen i sin helhet skal kunne heve kunnskapsnivået rundt elektronisk tenning, må systemene produseres på en kostnadsreducerende måte. Særlig mindre entreprenører vil ikke ha mulighet til å delta i utviklingen, dersom prisen er for høy. Det beste for å skape økt forståelse for de positive egenskapene ved elektronisk tenning vil være om det blir et samarbeid på tvers av bransjen.

Det kan vises en tendens i tunnelvirksomhet at nøyaktigheten forbedres for hvert år. Når nøyaktigheten er høy, kan man øke salvelengden uten at det går utover resultatet. I en rapport fra 1975 vises det til en basis salvelengde på 2,7m, og i dag er standarden i overkant av 5m (NTH Anleggsdrift, 1975). Det kan tyde på at salvelengdene vil kunne øke i framtiden, i takt med økning av nøyaktighet.

Dersom tilfellet blir at basis salvelengde for normal tunneldrift går over verdiene i dagens modeller, er det viktig at innsamling av data fortsetter. Det vil kreve nye korreksjonsfaktorer, og andre mengder for borehull, feilmargin, sprengstoff, tennere osv.

Det er viktig å ha mulighet til nøyaktige estimeringer av tidsbruk i et prosjekt. Dersom entreprenøren i prosjektet har beregnet for lite tid, og begynner å henge bak skjema. Da er det fort at det tas noen snarveier for å komme i mål, og tjene mest mulig penger. Det kan for eksempel virke lett å hente inn tid på rensk, drenering og ventilasjon. Selvsagt medfører det stor risiko for tunnelarbeidernes sikkerhet. Planleggingen må være mest mulig presis for å ikke sette press på produksjonen som kan føre til store materielle eller personulykker.

6.2 Videre utvikling av beregningseksemplene

Beregningene i denne bachelor-oppgaven kan ansees for å være den første av sitt slag. Dermed bør resultatet brukes som et første utkast, og kun begynnelsen for tidsberegning under vanskelige sprengningsforhold. For at modellen skal kunne brukes for varierte tunneler i framtiden, må den testes og sammenlignes med reelle tunnelprosjekter. Hvordan kan man på best mulig måte sørge for en fullstendig tidsberegningsmodell blir laget og tatt i bruk, og treffer på tidsestimering i framtiden?

Resultatene har forbedringspotensial når det gjelder kvantitativt beregningsgrunnlag. For å øke modellenes treffsikkerhet og pålitelighet bør det samles syklustider fra forskjellige entreprenører for forskjellige tunneler på forskjellige steder. Desto mer data som blir samlet inn, desto bedre autentisitet. Dette kan for eksempel være stoff for framtidige fordypningsoppgaver av en felles bransjeorganisasjon eller forskningsinstitusjon. Her vil det være viktig å sørge for mest mulig rettferdig sammenligningsgrunnlag.

Det er høyst sannsynlig at dataene som samles inn vil ha stor variasjon. Derfor bør det samtidig redegjøres for eventuelle avvik. Over tid vil resultatet kunne vises i en normalfordeling. For dataene med størst avvik vil det sannsynligvis være mulig å finne hovedårsakene til avvik. Dersom dette er en tendens, vil det bli mulig å kartlegge vanlige årsaker til store tidsavvik, som igjen kan være med på å forbedre modellen ytterligere.

Utfordringen her er å ta vare på entreprenørenes «hemmeligheter» og egne metoder. Dersom alle data kommer fram i lyset, vil det ødelegge mye av konkurransegrunnlaget når det kommer til anbudsregning. For å unngå dette, kan alternativ være å anonymisere data, eller å kun systematisere de opptredende kapasitetene fra forskjellige tunneler. På denne måten unngår en å sverte entreprenørenes troverdighet.

Et forslag til videre arbeid innenfor temaet er å slå sammen kostnadsberegningsmodeller med byggetidsmodellen. Hvis dette blir mulig, vil planleggingen av byggetid bli mye enklere. Om modellen viser at den er presis for forskjellige tunnelprosjekter, vil også byggherrer kunne ta den i bruk og sørge for at det ikke blir satt feilaktig tidspress på utførende aktører.

7 Konklusjon

På bakgrunn av resultatene som er presentert i rapporten, kan gruppen konkludere på følgende måte: Det finnes utallige forslag for hvilke tiltak som kan gjøres dersom man møter rystelsesbegrensninger i en tunnel. Noen tiltak gir store forsinkelser i driften, mens andre gir mindre utslag, og ofte kan flere alternativer benyttes samtidig. Utgangspunktet kan være varierende, og effekten av forskjellige tiltak er situasjonsbasert. Derfor har rapporten lagt vekt på valg av mulige løsninger, og diskutert hvordan tunnelbyggetiden blir påvirket av disse valgene.

Ved å kun se på den teoretiske beregningen av reduksjon i fremdrift for omfattende rystelsestiltak, har det vist seg at påvirkningen er mindre enn hva entreprenørene antar. Menneskelige faktorer er krevende å ta hensyn til, og det vil forekomme «plunder og heft», men resultatene viser til at korte salvelengder fortsatt gir gode kapasiteter.

Ved hjelp av faktorene som er lagt frem, vil det være mulig å estimere tidsendringer ned på salvenivå, som kan bidra med å regne ut total byggetid. Forfatterne mener at det nå finnes et litt bedre grunnlag for å estimere rystelsesbegrenset drift, men at arbeidet ikke ferdig. Tunnelbyggetid ved rystelsesbegrensninger er et tema som kommer til å utbedres i nærmere fremtid, hvor erfaringsdeling og samarbeid vil bli viktig.

8 Kildeliste

Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, 2019. *Teknisk rapport nr. 19, Elektroniske tennere i tunnel*, s.l.: NFF.

NTH Anleggsdrift, 1975. *Prosjektrapport 2-75, Tunneldriftprognoser*, Trondheim: NTH.

NTNU Anleggsdrift, 1998. *Prosjektrapport 14A-98, Fjellsprengningsteknikk, Sprengning med restriksjoner*, Trondheim: NTNU.

NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006a. *Drill and Blast Tunnelling Blast Design, Report 2A-05*, Trondheim: NTNU.

NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006b. *Drill and Blast Tunnelling Advance Rate, Report 2B-05*, Trondheim: NTNU.

NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006c. *TunSim*, Trondheim: s.n.

Orica Norway AS, 2018. *Teknisk informasjon, Pentex 25*, s.l.: Orica Norway AS.

Orica Norway AS, 2021. *Teknisk informasjon, Civec Control*, s.l.: Orica Norway AS.

Standard Norge, 2001. *NS 8141, Vibrasjoner og støt*, Oslo: NSF.

Statens Vegvesen, 2011. *Kontursprengning i tunnel*, Oslo: Vegdirektoratet.

Statens Vegvesen, 2018. *Prosesskode 1, Standard beskrivelse for vegkontrakter - Håndbok R761*, s.l.: Vegdirektoratet.

Statens Vegvesen, 2020. *Vegtunneler - Håndbok N500*, s.l.: Vegdirektoratet.

Store norske leksikon, 2017. [Internett]

Available at: https://snl.no/seismisk_bølge

[Funnet 14 mars 2021].

Store norske leksikon, 2019. [Internett]

Available at: snl.no/sprengning

[Funnet 9 april 2021].

Tunnelbyggetid ved rystelsesbegrensninger

På NTNU i Trondheim har en mindre gruppe studenter ved institutt for bygg- og miljøteknikk studert mulighetene for en forbedret modell av tunnelbyggetid ved rystelsesbegrensninger. I et langsiktig perspektiv kan dette være gull verdt.

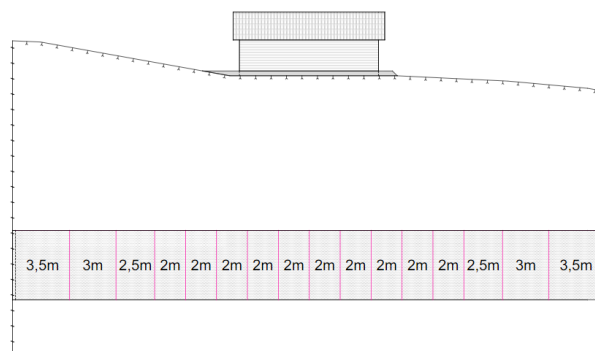
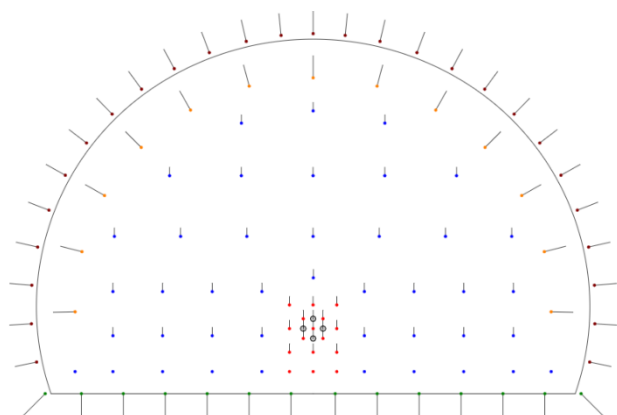
Tekst: Jørgen Gravråk, Håkon H. Sanner

Publisert: 20.05.2021 klokken 12:00

Bakgrunn og formål

I enkelte situasjoner kan man bli nødt til å ta hensyn til eksisterende bebyggelse under tunneldriving. Dette vil føre til forsinkelser, som det per i dag ikke finnes gode nok tidsestimater av. Forståelse og samspill mellom byggherre og entreprenør må fungere optimalt for å gjennomføre tunnelprosjekter på en mest mulig effektiv måte.

Temaet er komplekst, med både kontrollerbare og ukontrollerbare parametere. I dialog med nøkkelpersoner i bransjen kommer det frem antakelser om at tiltakene som må settes i gang vil redusere fremdriften kraftig. Korte salvelengder og oppdelte salver er noen av disse forsinkende tiltakene.



Reelle situasjoner

Med konkrete eksempler å vise til, gir beregningene sammenliknbare data. Endring i tunnelbyggetid på grunn av krav til rystelser blir beregnet i sannsynlige situasjoner, som under boliger og sykehus.

Resultatene viser tydelige tegn. Felles faktorer på tvers av tverrsnitt viser at en rekke tiltak som følge av rystelseskrav, ikke reduserer fremdriften like mye som antatt. Videre arbeid for å finne hvordan man kan opprettholde god fremdrift blir derfor viktig.

Innovasjon og utvikling

Arbeidet som er gjennomført legger et grunnlag for videre utvikling innenfor temaet. For at en komplett byggetidsmodell skal kunne realiseres, trengs det mye arbeid med å samle erfaringer fra forskjellige prosjekter. Da vil det være nødvendig med et bredt sammenlikningsgrunnlag, for å kunne kartlegge og systematisere avvik. Fordi avvik vil opptre i forskjellig grad for samtlige tunnelprosjekt, er dette avgjørende for å kunne lage en modell med tilfredsstillende nøyaktighet.

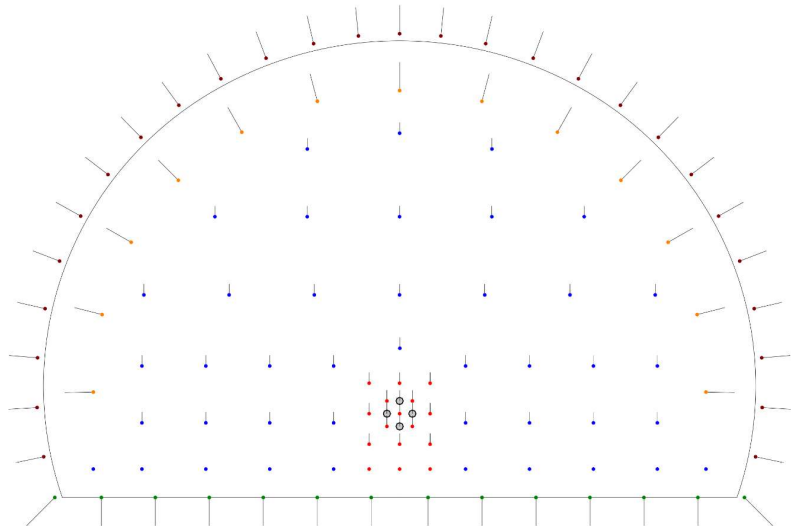
Tunnelbyggetid ved rystelsesbegrensninger Tunnel construction time in case of restrictions due to vibration

Prosjektnr 2021-31

Jørgen Gravrák, Håkon Sanner

Intern veileder: Omar Sabri

Bransjen har uttrykt et ønske om bedre tidsmodeller i rystelsesutsatte områder. Oppgaven går ut på å systematisere byggetider og kapasiteter, og drøfte usikkerheter og variasjoner ved sprengningstiltak på grunn av rystelser. Ved å sammenfatte data og lage felles faktorer, vil man kunne estimere tunnelbyggetiden også i begrensede områder.

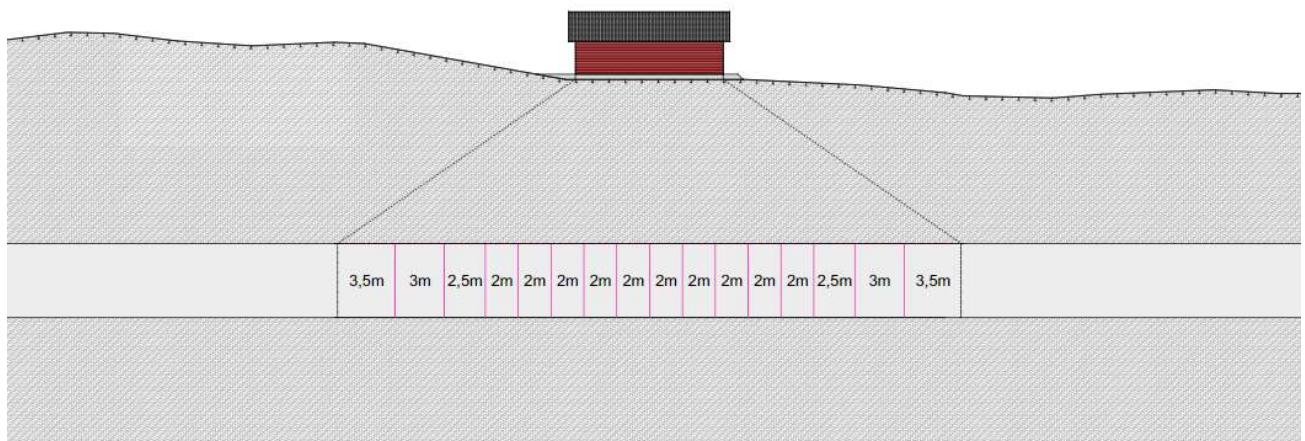
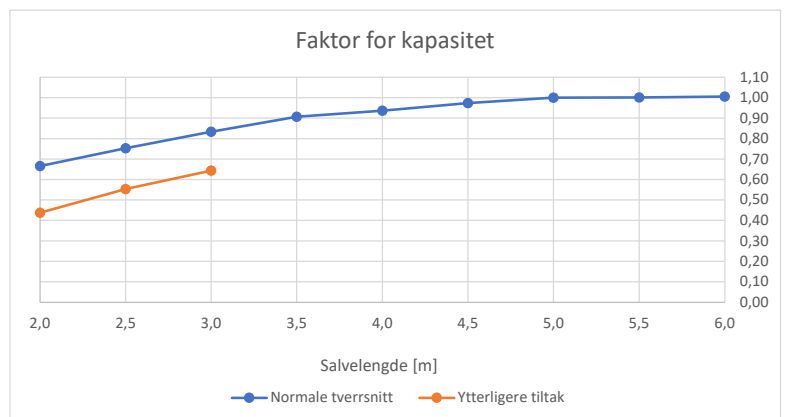


Oppgaven inneholder:

- Tunnel- og rystelsesteori
- Sprengningsplan
- Tenningsplan
- Grenseverdier og enhetsladning
- Rystelsestiltak
- Tidsberegning

Resultatene viser at man kan ha en høyere kapasitet enn antatt i disse situasjonene.

Forsinkelsene er ikke like store som forventet.



Input	Unit	Model	User	Value			
Eksempel 1							
Tunnel data							
Tunnel profile		T9,5		T9,5			
Tunnel cross section	m ²	66,62		66,62			
Tunnel length	m	3000		3000			
Standard round length	m	5		5			
Advance rate, normal rounds							
Net round cycle	min	416,5		416,5			
Weekly advance rate	m/week	66,2		66,2			
Theoretical volume per hour	m ³ /h	48,0		48,0			
Vibration data							
Restriction zone length	m		38,0	38,0			
Vibration limit	mm/s		48,0	48,0			
Max. blast load	kg	8,1		8,1			
Min. critical distance	m		17,6	17,6			
Restriction zone							
1. Round length	m		3,5	3,5	14,9	Crit. dist	
1. Round duration	min		321,7	321,7	6,04	Max. blast load	
1. Round advance rate	m/week		60	60	34500	Dist. from right	
1. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	43,49		43,49			
2. Round length	m		3,0	3,0	12,8	Crit. dist	
2. Round duration	min		299,8	299,8	4,63	Max. blast load	
2. Round advance rate	m/week		55,2	55,2	31500	Dist. from right	
2. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	40,00		40,00			
3. Round length	m		2,5	2,5	11,4	Crit. dist	
3. Round duration	min		276,6	276,6	3,78	Max. blast load	
3. Round advance rate	m/week		49,3	49,3	29000	Dist. from right	
3. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	36,13		36,13			
4. Round length	m		2,0	2,0	10,6	Crit. dist	
4. Round duration	min		250,1	250,1	3,33	Max. blast load	
4. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	27000	Dist. from right	
4. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96			
5. Round length	m		2,0	2,0	10,1	Crit. dist	
5. Round duration	min		250,1	250,1	3,06	Max. blast load	
5. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	25000	Dist. from right	
5. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96			
6. Round length	m		2,0	2,0	10	Crit. dist	
6. Round duration	min		250,1	250,1	3,00	Max. blast load	
6. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	23000	Dist. from right	
6. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96			
7. Round length	m		2,0	2,0	10	Crit. dist	
7. Round duration	min		250,1	250,1	3,00	Max. blast load	
7. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	21000	Dist. from right	
7. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96			

8. Round length	m		2,0	2,0	10 Crit. dist
8. Round duration	min		250,1	250,1	3,00 Max. blast load
8. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	19000 Dist. from right
8. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96	
9. Round length	m		2,0	2,0	10 Crit. dist
9. Round duration	min		250,1	250,1	3,00 Max. blast load
9. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	17000 Dist. from right
9. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96	
10. Round length	m		2,0	2,0	10 Crit. dist
10. Round duration	min		250,1	250,1	3,005 Max. blast load
10. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	15000 Dist. from right
10. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96	
11. Round length	m		2,0	2,0	10 Crit. dist
11. Round duration	min		250,1	250,1	3,005 Max. blast load
11. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	13000 Dist. from right
11. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96	
12. Round length	m		2,0	2,0	10,1 Crit. dist
12. Round duration	min		250,1	250,1	3,058 Max. blast load
12. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	11000 Dist. from right
12. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96	
13. Round length	m		2,0	2,0	10,6 Crit. dist
13. Round duration	min		250,1	250,1	3,328 Max. blast load
13. Round advance rate	m/week		43,6	43,6	9000 Dist. from right
13. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	31,96		31,96	
14. Round length	m		2,5	2,5	11,4 Crit. dist
14. Round duration	min		276,6	276,6	3,779 Max. blast load
14. Round advance rate	m/week		49,3	49,3	6500 Dist. from right
14. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	36,13		36,13	
15. Round length	m		3,0	3,0	12,8 Crit. dist
15. Round duration	min		299,8	299,8	4,629 Max. blast load
15. Round advance rate	m/week		55,2	55,2	3500 Dist. from right
15. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	40,00		40,00	
16. Round length	m		3,5	3,5	14,9 Crit. dist
16. Round duration	min		321,7	321,7	6,038 Max. blast load
16. Round advance rate	m/week		60	60	0 Dist. from right
16. Round theoretical volume per hour	m ³ /h	43,49		43,49	
Restriction zone average					
Restriction zone length	m	38		38	
Restriction zone duration	min	4297,2		4297,2	
Average advance rate	m/week	47,8		47,8	
Average theoretical volume per hour	m ³ /h	34,93		34,93	
Hours spent	h	71,62		71,62	

Compared to normal rounds

Restriction zone length	m	38	<input type="text"/>	38
Restriction zone duration	min	3165,4	<input type="text"/>	3165,4
Average advance rate	m/week	66,2	<input type="text"/>	66,2
Average theoretical volume per hour	m ³ /h	47,99	<input type="text"/>	47,99
Hours spent	h	52,76	<input type="text"/>	52,76

Time loss

Hours lost	h	18,86	<input type="text"/>	18,86
Percentage lost	%	26,34	<input type="text"/>	26,34

Advance rate

Theoretical volume capacity	%	72,79 %	<input type="text"/>	72,79 %
-----------------------------	---	---------	----------------------	---------

Del 1 - Normal drift

Anta gjerne en T9,5-tunnel for disse spørsmålene.

Hvordan fungerer vanlig arbeidstid og turnus for tunnelarbeidere? Antall dager i uken, timer om dagen, antall skift?

Ved normal drift, hvor lang er salvelengden? 5 eller 6 meter?

Erfaringsvis, hva bruker dere som utgangspunkt for fremdrift ved normale forhold? Rundt 50m/uke eller mer, eventuelt 1 salve per skift?

Omtrent hvor lang tid går det på henholdsvis lading, sprengning og ventilasjon, inkludert tid til rydding og flytting av maskiner osv.?

Hva er oftest synderen når det kommer til forsinkelser? Hvilke årsaker står oftest bak at det er vanskelig å holde skjemaet?

NFF har utarbeidet en rapport som gjelder bruk av elektroniske tennere i tunnel. Hva er deres tanker om elektroniske tennere i vanlig tunneldrift?

Del 2 - Vibrasjonsbegrenset drift

**Hvor nær grenseverdien for svingehastighet går man før tiltak for rystelser iverksettes?
Kan du fortelle litt om sikkerhetsvurderinger og beslutninger rundt dette?**

Hvilke tiltak prioriterer dere helst ved forsiktigsprengning, og hva unngår man helst å gjøre før det absolutt må til?

- Skifte tennmidler/tenningsplan
- Redusere salvelengde
- Redusere ladningsmengde
- Dele opp salven

Ved problematikk relatert til rystelser under tunnelsprengning, er det ...

- Aktuelt å bruke elektroniske tennere fremfor Nonel eller andre elektriske?
- Aktuelt å gå over til patronert sprengstoff fremfor bulksprengstoff?

Per uke, hvor mye tid tror dere går tapt ved de forskjellige tiltakene sammenliknet med vanlig tunneldrift?

- 1 meter kortere salvelengde?
- Halvert salvelengde?
- Dele salven i 2 eller 3 deler?
- Elektroniske tennere?