NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Forskjeller ved bruk av elektroniske og ikke-elektriske tennere på infrastrukturprosjekter i Norge

Sammenlikning av tidsbruk, kostnader og sikkerhet ved store prosjekter

Sigbjørn Næss Midtskogen

Bygg- og miljøteknikk
Innlevert: juni 2018
Hovedveileder: Amund Bruland, IBM
Medveileder: Arve Krogseth, BetonmastHæhre

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

NORGES TEKNISK-
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR BYGG, ANLEGG OG TRANSPORT

Oppgavens tittel: Sammenlikning av bruk av elektroniske og ikke-elektriske tennsystemer ved infrastrukturprosjekter i Norge	Dato:11/06/2018 Antall sider (inkl. bilag):107			
	Masteroppgave	x	Prosjektoppgave	
Navn: Sigbjørn Midtskogen				
Faglærer/veileder: Amund Bruland				
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Arve Krogseth, BetonmastHæhre AS				

Denne oppgaven ser på forskjellen på elektroniske og ikke-elektriske tennere for bergsprengningsarbeider, og på hvilken måte disse ulikhetene påvirker sikkerhet, tidsbruk for klargjøring av salve og kostnader ved bruk på infrastrukturprosjekter i Norge. Basert på disse funnene var det så et ønske om å se om dette kunne brukes til å finne ut av hvilket tennsystem som var hensiktsmessig å bruke til ulike arbeidsoppgaver. Oppgaven fokuserer mest på arbeid i dagen, men underjordsarbeider er også tatt med.

Emner som tas opp er:

- Sikkerhet: Forsagere og gjenstående hull, og mulige årsaker til disse samt utilsiktet detonasjon
- Tidsbruk: Tidsbruk for kobling av salve, arbeider langs trafikkert vei
- Kostnader: Innkjøpskostnader og mulige arbeidsreduserende gevinster

Rapporten bygger på tidligere utført forskning, empiri fra bransjen i tillegg til egne observasjoner. Datagrunnlaget som har vært tilgjengelig har vært begrenset og mangelfullt. Samtidig er temaet stort, og i et fag som preges av ulike utfordringer og varierende forhold, har det derfor ikke vært grunnlag for å trekke noen tydelige konklusjoner på hvilket system som er best egnet til ulike oppgaver. Ut i fra det grunnlaget som har latt seg innhente, er det ikke gjort observasjoner som viser at elektroniske systemer minsker forsagere og gjenstående hull, til tross for den avanserte funksjonen for å måle koblet salve. Det er observert at arbeid med elektroniske tennere tar lengre tid enn med ikke-elektriske systemer under normale forhold. Ved utfordrende salver ved dekking, eller hvor det er viktig å sørge for full opptenning, for blant annet å hindre sprut, er det observert at elektroniske systemer i noen tilfeller kan være raskere enn med ikke-elektriske. Når det gjelder kostnader, er det, basert på priskalkyle for et stort infrastrukturprosjekt, funnet at innkjøpskostnadene med elektroniske tennere er det dobbelte av ikke-elektriske tennere. På prosjektene som er observert er det ikke påvist at elektroniske systemers sprengningstekniske egenskaper har latt seg utnytte til å forbedre salveresultatet slik at det gir økonomiske besparelser i arbeidet.

Tidligere utførte forsøk viser likevel at elektroniske systemer har egenskaper som med riktig bruk skal forbedre både sikkerhet og sprengningsresultater. Med hittil lite utstrakt bruk av elektroniske tennere, er det trolig at det med større opparbeidet erfaring i bransjen, og videre utvikling av mer robuste systemer, kan sees en forbedring av sikkerhet og sprengningstekniske resultater med dette systemet. Det er også lite tilgjengelig dokumentasjon på bruken av de to systemene, og ved økt oppfølging og dokumentering av resultater vil det kunne være enklere å se hvilket system som er best egnet til ulike oppgaver.

Stikkord:

1. Elektroniske tennere
2. Ikke-elektriske tennere
3. Sprengning
4. Millisekund tennere

Sigbjørn Midtskogen
(sign.)

Forord

Som avslutning av en 5-årig utdannelse ved bygg- og miljøteknikk på NTNU, med retning anleggsteknikk, skal det utarbeides en masteroppgave i faget TBA4935 Anleggsteknikk, masteroppgave. Oppgaven, som er verdt 30 studiepoeng, utarbeides vårsemesteret 2018, med innlevering i juni.

I forbindelse med sommerjobb hos BetonmastHæhre, ved deres prosjekt med utbedring av E18 Rugtvedt-Dørdal ble det utarbeidet et tema til masteroppgave, som både jeg og BetonmastHæhre var interessert i å undersøke. Dette handler om fordeler og ulemper med bruken av elektroniske tennere i forhold ikke-elektriske systemer. Temaet ble i første omgang foreslått av Arve Krogseth, prosjektleder på Rugtvedt-Dørdal inntil utgangen av mai 2018, som også tok på seg oppgaven som veileder, og bidro med sitt kontaktnettverk etter mange år i bransjen. Tore Venåsen og Dan Stensvik, fra sprengningsledelsen i BetonmastHæhre har, med sin kompetanse, vært svært hjelpsomme med fagtekniske spørsmål, beregning av kostnader og satt meg i kontakt med noen av landets mest kunnskapsrike personer innenfor bergsprengningsfaget. Sprengningsarbeiderne på Rugtvedt-Dørdal har også vært svært behjelpelige med å la meg komme å observere og delta i arbeidet med flere salver, og svart på alle mine spørsmål underveis.

Takk til Martin Brekke for oppklaring av daglige forvirringer og for å ha organisert mine besøk hos Vestfold Fjellboring for å lære om ikke-elektriske tennsystemer. Harald Fagerheim og Arild Neby fra Statens Vegvesen/Vegdirektoratet, Thor Kristian Hustveit fra Nye Veier, Petter Jensen fra Hardrock Consult AS, Kjetil Morstad fra Orica og Per Isdahl fra DSB forjener også en takk, for å ha vist interesse for oppgavens tema, satt av tid til samtaler, bidratt med råd, innspill og grunnlagsdata. Takk også til Amund Bruland, som min veileder fra NTNU, for hjelp med oppgavens struktur, fremgangsmåte for arbeidet og tips underveis.

Sigbjørn Næss Midtskogen, Holmestrand, 11/06/2018

Sammendrag

Denne oppgaven er skrevet i sammenheng med BetonmastHæhre, og har opphav i at det i deres prosjekt for Nye Veier, E18 Rugtvedt-Dørdal, stilles krav om bruk av elektroniske tennere. Når det snakkes om elektroniske tennere, blir det fremstilt som at systemet nesten så godt som eliminerer forsagere. Til tross for dette har utstrakt bruk av elektroniske systemer latt vente på seg, da høy kostnad og et teknisk mer komplisert system i mange tilfeller fører til at ikke-elektriske systemer heller blir valgt.

BetonmastHæhre ønsket på sin side å se mer på bruken av elektroniske tennere i forhold til ikke-elektriske tennere, som et innspill og underlag til debatten om hvilket tennsystem som er best å bruke i ulike sammenhenger.

Oppgaven tar for seg hvordan sikkerhet, tidsbruk og økonomi ved sprengningsarbeider på infrastrukturprosjekter i Norge kan påvirkes ulikt med de to tennsystemene. Det er undersøkt om systemene gir forskjeller i antall forsagere, tilfeller der det står igjen hull, tidsbruk for kobling og klargjøring av salve, innkjøpskostnader og om tennsystemene gir mulighet til å forbedre resultatet av skutt salve, og på den måten medføre økonomiske besparelser.

Observasjoner og innsamling av datagrunnlag er gjort under reelle produksjonsforhold, for det meste på prosjektet Rugtvedt-Dørdal. Resultatene i oppgaven er basert på data som var tilgjengelig, egne observasjoner, erfaringer fra bransjen og tidligere undersøkelser og forsøk. Det har ikke vært mulighet å tilrettelegge salver eller arbeid spesielt for denne studien.

Ut ifra det grunnlaget som ble innsamlet, er det ikke klart å påvise at elektroniske systemer gir en reduksjon i forsagere og gjenstående hull i forhold til ikke-elektriske systemer. Det er observert at koblingsarbeid med elektroniske systemer er mer tidkrevende ved normale forhold, men kan likestilles med ikke-elektriske systemer ved utfordrende forhold der det er ekstra viktig å sikre full opptenning av alle hull. Innkjøpskostnadene for elektroniske systemer er funnet til å være dobbelt så store som for ikke-elektriske systemer. Det er ut ifra de undersøkelsene som er gjort ikke klart å påvise at sprengningstekniske resultater med bruk av elektronikk forbedres i noen stor grad, og dermed er det ingen store økonomiske besparelser i nedstrøms prosesser.

På grunn av de store variasjonene og ulike metodene som brukes ved bergsprengningsarbeider er det mange ulike scenarier å ta hensyn til. Samtidig har datagrunnlaget har vært lite og

mangelfullt, og det har derfor ikke vært mulig å påvise noen klare tegn på hvilke tennsystem som er hensiktsmessig å bruke til ulike oppgaver. Basert på tidligere forsøk og empiri er det likevel trolig at elektroniske systemer har sikkerhets- og sprengningstekniske egenskaper som kan gi forbedrede resultater utover det som er klart å påvise i denne oppgaven. Ved videre utvikling av et mer robust og pålitelig system, samtidig som erfaringen i bransjen økes med større bruk, kan det med større oppfølging og dokumentasjon være enklere å påvise om de avanserte funksjonene lar seg utnytte.

Summary

This report is written in collaboration with BetonmastHæhre, and the reports subject origined in that in their project for Nye Veier, E18 Rugtvedt-Dørdal, there is required use of electronic detonators for all rock blasting works. When talking about electronic detonators, it's almost as it is given the impression that the system can eliminate misfires. Despite this, extensive use of electronic detonators is still rare, as high costs and a technical more complicated system in many cases leads to non-electric detonators are being chosen.

BetonmastHæhre wanted to look at the use of electronic detonators compared to non-electric detonators, as an input to the debate of which detonator system is best suited for different tasks.

This assignment assesses how working safety, time spent on blasting preparations and economy is affected differently by the choice of detonator system. It has been investigated whether the systems differ in the number of misfires, cut-offs, use of time for blasting preparations, procurement costs and whether the systems provide the opportunity to improve blasting results, thus gives a rise to economical savings.

Observations and collections of data are made under real production conditions, mostly at the site of Rugtvedt-Dørdal. The results of the assignment are based on data already available, empirical information, own observations and previous research and experiments. It has not been possible to arrange any experimental blasts specifically for the case of this study.

Based on the data collected, it has not been able to prove that electronic detonators reduce the numbers of misfires and cut-offs compared to non-electric systems. It is also observed that preparation and coupling with electronic systems is more time consuming under normal conditions. In challenging conditions, however, where the importance of full ignition of all the blast holes is high, working with electronic systems is just as fast. Purchasing costs for electronic systems is found to be about twice as large as for the non-electric systems. From the observations done for this report, there has not been able to see any significant improvements from use of electronic detonators, and thus there are found no major economic savings in downstream processes.

Because of the wide variations and different methods used in rock blasting work, there are many different scenarios to consider related to the choice of detonator system. In addition, the

data has been limited and inadequate, and thus there has not been possible to draw any conclusions to which detonator system the best choice for different tasks. Based upon previous experiments and empirical information, it is assumed that electronic detonators have safety- and technological features which can improve the blasting results beyond what has been observed in this report. With further development of a more robust and reliable system, while the experience increases as the use increases, with greater follow-up and documentation, it might be easier to detect whether the advanced features can be exploited.

Innholdsfortegnelse

Forord I
Sammendrag II
Summary IV
Figurliste VIII
Tabelliste IX
1. Innledning 2
1.1. Bakgrunn 2
1.2. Formål 3
1.3. Struktur 4
1.4. Tidligere studier 5
1.5. Oppgavens begrensninger 7
2. Teori og bakgrunnsinformasjon 8
2.1. Prosjektinformasjon Rugtvedt-Dørdal 9
2.2. Generell innføring i sprengning 10
2.3. Tennsystemenes markedsandeler 13
2.4. Tennernes oppbygning 14
2.5. Tennsystemenes virkemåte og kobling 18
2.6. Tennsystemenes detonasjonsnøyaktighet 24
2.7. Elektroniske tenneres fordel i produksjon 26
2.8. Sammenlikning av ikke-elektriske og elektroniske tenner i tunnel 28
2.9. Utslipp av plastavfall ved deponi i maritimt miljø 30
3. Metode 32
3.1. Metoder 32
3.2. Datainnsamling 33
3.3. Vurdering av metoder 35
3.4. Oppsummering av metode 39
4. Sikkerhet 40
4.1. Gjenstående sprengstoff 42
4.2. Hendelser fra RUH 48
4.3. Nye Veiers statistikk over forsagere med elektroniske tennere 52
4.4. DSBs rapporter over uønskede hendelser 54
4.5. Byggherres krav til elektroniske tennere 56
4.6. Utilsiktet detonasjon og sivile funn av tennere 58
4.7. Sprengningsarbeidernes meninger 59
5. Tidsbruk 60

5.1. Tidsbruk for kobling av salve 60
5.2. Armering av elektroniske tennere 66
5.3. Arbeid langs trafikkert vei 66
6. Kostnader 67
6.1. Innkjøpskostnader 68
6.2. Arbeidskostnader 69
6.3. Oppnådde arbeidsreduserende effekter 70
7. Diskusjon 72
7.1. Sikkerhet 72
7.2. Tidsbruk 77
7.3. Kostnader 81
7.4. Sprengningsarbeidernes meninger 84
7.5. Utslipp av plastavfall ved deponi i maritimt miljø 85
8. Oppsummering og konklusjon 86
8.1. Oppsummering 86
8.2. Konklusjon 89
8.3. Videre arbeider 92
Referanser 93

Figurliste

Figur 1 - Strekningen Rugtvedt-Dørdal 9
Figur 2 - Hendelsesforløp ved skyting. 10
Figur 3 - Skissert løsbrytning av berg ved detonasjon. 11
Figur 4 - Tennplan med "V"-mønster, med ikke-elektriske tennere. 12
Figur 5 - Estimat over salgstall av de ulike tennsystemene, tall i millioner enheter 13
Figur 6 - Oppbygning av elektriske tennere. Momenttenner øverst og intervalltenner neders 14
Figur 7 - Oppbygning av Oricas Exel nonel-tenner 16
Figur 8- Oppbygning av elektronisk tenner 17
Figur 9 - Sammenlikning av motstand ved seriekobling og serie-parallellkobling av elektriske tennere. 18
Figur 10 - Ferdig koblet ikke-elektrisk salve med blå 67ms koblingsblokker. Tennerledningene er gule. 20
Figur 11 – Fra venstre: Bilde 1: 67ms intakt koblingsblokk før kobling. Bilde 2: To 67ms koblingsblokker koblet i til sammen fire tennere. Bilde 3: Detonert 17ms koblingsblokk gjenfunnet i røys. 20
Figur 12 - To elektroniske tennere koblet til en scanner fra Orica. 22
Figur 13 – Til venstre: kombinert logger og tester, Oricas Scanner 200. Til høyre, avfyringsmodul fra Orica, Blast Box 310R. Her fotografert under overføring av tennerdata fra scanneren til avfyringsmodulen. 22
Figur 14 - Sammenlikning av faktisk detonasjonstidspunkt ved enkethullsdetonasjon ved bruk av pyrotekniske tennere og elektroniske tennere. 24
Figur 15 – Grafen over tidsnøyaktighet for pyrotekniske og elektroniske tennere for fremstilling av nøyaktighet. 25
Figur 16 - Sammenlikning av fragmentasjon i steinbrudd. Til venstre for rød strek er Orica Exel pyrotekniske tennere brukt, og til høyre Orica I-kon elektroniske tenner 27
Figur 17 - Diagram viser oversikt over skadde og omkomne som følger av sprengningsulykker fra 1996-2015 40
Figur 18 - Fremstilling av DSBs registrerte sprengningsulykker med personskader etter type sprengningsarbeid, i perioden 1996-2015. 41
Figur 19 - Uønskede hendelser under sprengning med potensiell dødsulykke som utfall. Totalt 103 registrerte hendelser i 2015 42
Figur 20 – Skissert utsnitt av salve med doble kobingsblokker og sikring sidelengs. Pilene viser sjokkbølgens propageringsretning i slangene. 46
Figur 21 - Fremstilling av BMHEs registrerte RUH med bruk av ikke-elektriske tennsystemer, sortert etter hendelsesområde 48
Figur 22 – Fremstilling av BMHEs registrerte RUH med bruk av elektroniske tennere, sortert etter hendelsesområde 50
Figur 24 - Nye Veiers statistikk over forsagere og produksjonsmengde 52
Figur 23 - Fremstilling av BMHEs registrerte RUH med bruk av elektroniske tennere, sortert etter hendelsesområde 54
Figur 25 - Ikke-elektrisk salve med to hull i hver koblingsblokk 62
Figur 26 - Skjæring på Rugtvedt - Dørdal 82

Tabelliste

Tabell 1 - Antall hendelser sett i forhold til tennerforbruk, basert på RUH fra BMHE i prosjekter med ikke-elektriske tennere..... 49
Tabell 2 - Antall hendelser sett i forhold til tennerforbruk, basert på RUH fra BMHE i prosjekter med elektroniske tennere..... 51
Tabell 3 - Tall fra sprengningsaktivitet i Nye Veier. 53
Tabell 4 - Tidsbruk for kobling av salve med ikke-elektriske tennere..... 61
Tabell 5 - Tidsbruk for kobling av koblingsblokker på stor salve 62
Tabell 6 - Tidsbruk for kobling av salve med elektroniske tennere..... 63
Tabell 7 - Resultater for observasjoner av tidsbruk for lading, utlasting og maskinrensk for elektroniske og ikke-elektriske tennere i tunnel..... 65
Tabell 8 - Kostnader for tennmidler ved et stort veiprosjekt. 68
Tabell 9 - Sammenlikning av antall hendelser med elektroniske og ikke-elektriske systemer 75

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Norge har et sterkt fagmiljø innenfor sprengningsfaget, spesielt på grunn av den omfattende utbyggingen av vannkraftverk på 70- og 80-tallet. I nyere tid er det derimot vei og jernbaneprosjekter som står for den største delen av utsprengt fjell, og Norges Forening for fjellsprengning, NFF, oppgir at det aldri er registrert større uttak av bergmasser enn i 2017 (NFF, 2017). Med økt fokus på infrastruktur, både vei og jernbane, og rekordprosjekter som Ryfast, Rogfast og vedtak om bygging av Stadt skipstunnel viser at det vil bli stor aktivitet også i de kommende år. De siste årene har to større jernbanetunneler blitt drevet med tunnelboringmaskin, TBM: Nytt løp mellom Arna og Bergen sentrum med gjennomslag høsten 2017, og Follobanen hvor fire maskiner ventes å drive frem til vinteren 2018/2019. Det er likevel ikke alle tunnelprosjekter hvor TBM-drift er egnet. Varierende grunnforhold, ugunstig tverrsnittsprofil og liten fleksibilitet gjør TBM til et mindre gunstig valg, og konvensjonell boring og sprengning vil fortsatt være en viktig drivemetode i Norge fremover. For arbeider i dagen vil boring og sprengning fortsatt være enerådende.

Boring og sprengning er tidkrevende, kostbart og risikabelt arbeid, men kan vanskelig unngås. I en konkurranseutsatt bransje med store kostnadsrammer og små profittmarginer er det viet stor oppmerksomhet på forbedring av effektivitet og produktivitet. Samtidig setter både myndigheter, byggherre og entreprenører stadig strengere krav til HMS på arbeidsplassen, med en nullvisjon av arbeidsulykker som mål.

Etter at det ikke-elektriske tennsystemet kom på markedet på 1970-tallet har disse blitt svært mye brukt både i Norge og internasjonalt. To viktige grunner til at mange gikk over fra elektriske tennere var økt sikkerhet for sprengningsarbeiderne, på grunn av større trygghet mot utilsiktet detonasjon, samt systemets enkle og fleksible grensesnitt (Zou, 2017). Som neste steg i utviklingen av tennere kom digitale elektroniske tennere på markedet, med egenskaper som skulle gi ytterligere økning i sikkerheten og fleksibilitet. Elektroniske tennere har inntil de siste årene fortrinnsvis blitt brukt ved ekstra utfordrende salver, i forsøkssalver for å kartlegge tennernes potensiale, og nå de siste par årene ved større prosjekter med kontraktfestet krav om bruk av denne typen tennere. Systemets ankepunkter er i hovedsak høy enhetspris på tennerne i seg selv, samt nødvendig utstyr som avfyringsmodul og logger, i tillegg til å være et mer teknisk komplisert system som krever opplæring av fagarbeidere, i en relativt konservativ bransje.

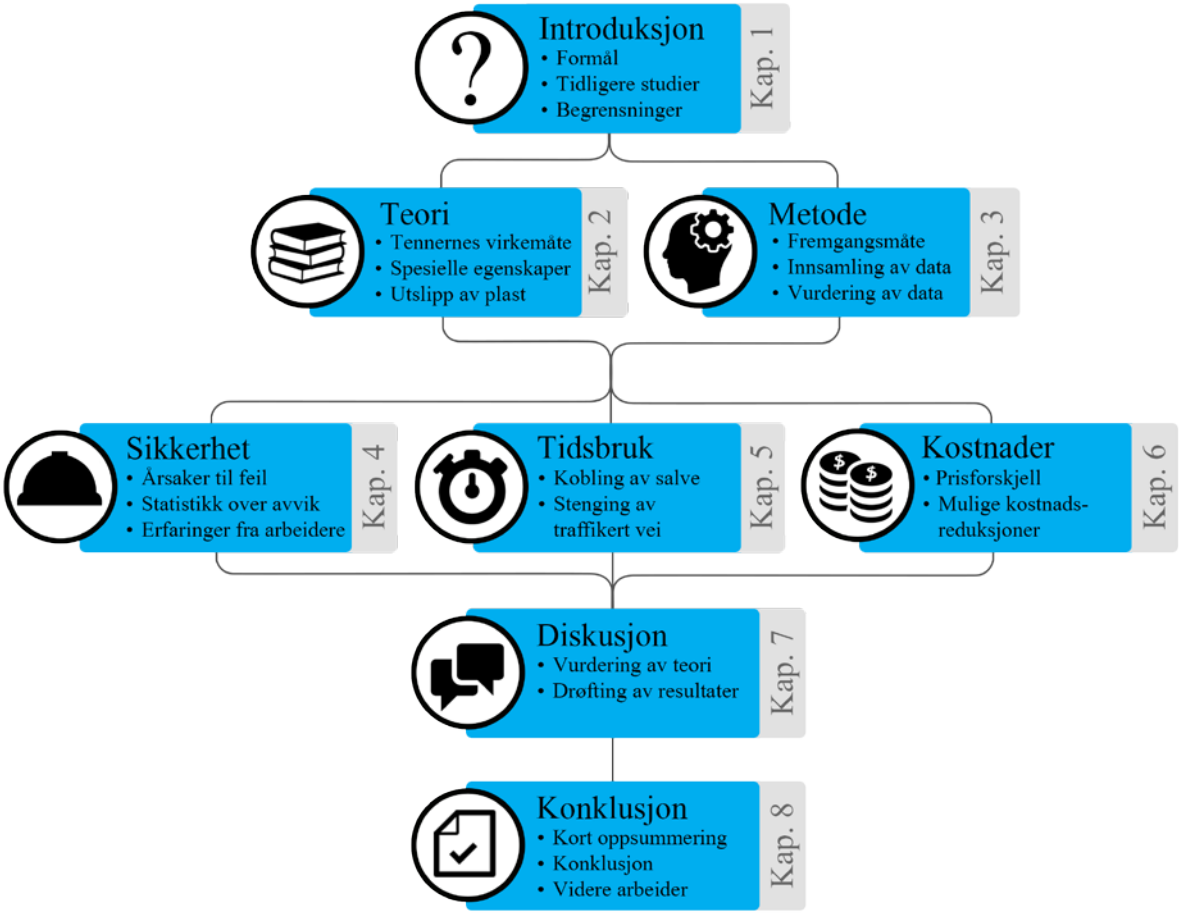
1.2. Formål

Denne oppgaven, utarbeidet i samarbeid med BetonmastHæhre, herfra forkortet til BMHE, ser på forskjeller ved bruk av ikke-elektriske og elektroniske tennsystemer. Fordi disse to tennsysteme har ulik byggemåte, har de også ulike egenskaper. Formålet med oppgaven er å se på tennsystemens egenskaper og hvordan de ulike egenskapene påvirker resultatet ved bruk. Disse funnene vil igjen kunne brukes i debatten om hvilket tennsystem som er best egnet til ulike oppgaver. I denne sammenheng er det spesielt tre faktorer som er viktige ved vurdering av hvilket system som er best egnet. De tre hovedfaktorene kan kortes ned til stikkordene *sikkerhet, tidsbruk* og *kostnader.*:

- *Sikkerhet:* Produkt- og brukerfeil, forsagere, tennebrudd og variasjon i detonasjonstidspunkt
- *Tidsbruk:* Sammenlikning av tidsbruk for skytingens forberedende arbeider
- *Kostnader*: Innkjøpskostnader og mulige optimaliseringer for reduksjon av nedstrøms kostnader

1.3. Struktur

Oppgaven er delt opp i 8 kapitler, hvor det første kapittelet består av en introduksjon hvor oppgavens formål er presentert, etterfulgt av to kapitler med teori og metode. Teori-kapittelet inneholder teoretisk bakgrunnsinformasjon, tennsystemenes virkemåte og flere teoretisk mulige sprengningstekniske effekter som kan påvirke resultatet. Kapittelet om metode beskriver fremgangsmåte for arbeid med oppgaven, hvordan innsamling av informasjon er gjort, og vurdering av de ulike kildene. Deretter er det tre kapitler om hver av de tre områdene oppgaven dreier seg om, sikkerhet; tidsbruk og kostnader. I kapittel 7 drøftes resultatene, både for seg selv og opp mot tidligere kjent kunnskap. Kapittel 8 inneholder en kort oppsummering av oppgavens viktigste innhold, før en konklusjon og en anbefaling av videre arbeider. Oppgaven er strukturert som følger:



1.4. Tidligere studier

1.4.1. Litteraturstudie høsten 2017

Bakgrunns-teori og -informasjon for oppgaven baseres på en oppgave utført i faget TBA4570 Anleggsteknikk fordypningsprosjekt, høsten 2017. Oppgaven bestod i et litteratursøk som tok for seg fordeler og ulemper med bruk av elektriske, ikke-elektriske og elektroniske tennere for generelt bruk, med spesielt fokus på sammenlikning av bruken og resultater med ikke-elektriske og elektroniske systemer ved infrastrukturprosjekter. Oppgaven var basert på noe selvinnhentet informasjon, men i hovedsak publiserte studier og forsøk fra både Norge og utlandet. Sistnevte ofte utarbeidet for å se på potensialet for å øke produktiviteten ved mineralutvinning i land som Australia, Sør Afrika og Canada.

1.4.2. Relevante studier

E16 Sandvika - Wøyen: Analysis of tunnel excavation, achieved contour quality and influence of applied initiation system.

Høsten 2016 leverte Anna Skłodowska en masteroppgave utført ved BA-instituttet på NTNU. Oppgavens hovedmål var å se på tennsystemenes innvirkning på konturkvalitet, basert på observasjoner gjort under driving av Bjørnegårdtunnelen, E6 Sandvika – Wøyen. Det ble sprengt salver med både elektroniske og ikke-elektriske tennere, og i oppgaven ble det sett på tennsystemens innvirkning på blant annet konturlengde, sprengt areal, overmasser og tunnelkonturindeks. Denne oppgaven gikk ikke direkte inn på tennsystemenes egenskaper, for eksempel tennernes nøyaktighet, og hvordan dette påvirker resultatet, men det viser at det er interesse innad i bransjen for å se hvilke muligheter som åpnes ved bruk av mer moderne teknologi.

Rapport fra forsøk med elektroniske tennere og detonerende lunte ved driving av Jarlsbergtunnelen

I 2010 ble det i et samarbeid mellom Nexco, LNS og Jernbaneverket gjort forsøk med bruk av detonerende lunte og elektroniske tennere i kontur under driving av Jarsbergtunnelen i Tønsberg. Årsaken til forsøket var å se om det kunne oppnås bedre konturresultat, og det ble satt fokus på blant annet skadesone, overmasser og rensk. Etter tidligere erfaringer med rester av detonerende lunte i røysa, som i noen tilfeller detonerte i knuseverk, ble det forbud mot bruk av detonerende lunte med over 20g/m. Forsøket innebar derfor også en mulighet til å se om elektroniske tennere kunne minske problemet med rester av detonerende lunte i røysa.

Driftserfaringer E 18 KBT - elektroniske tennere vs. ikke elektriske tennere, Sikkerhet og tekniske egenskaper i tunnel.

Under oppstarten av denne oppgaven var Petter Jensen, i Hardrock Consult AS, på oppdrag fra Nye Veier i gang med en rapport om sammenlikning av bruk av ikke-elektriske og elektroniske tennere under driving av Kjørholt-tunnelen på Nye Veiers prosjekt Kjørholt – Bamble tunneler, herfra forkortet til KBT. Rapporten er basert på data fra observasjoner og basrapporter, og det ble sammenliknet salver med både elektroniske og ikke-elektroniske tennere over en periode fra 6. november til 5. desember 2017. Det ble skutt 25 salver med elektroniske tennere, og 34 salver med ikke-elektriske tennere, og det er disse salvene som ligger til grunn for observasjonene i rapporten. Rapporten inneholder sammenlikning av kostnader, tidsbruk for kobling, lasting og maskinrensk, inndrift, overmasser og sprengstofforbruk. I tillegg omhandler den kort sikkerhetsaspekter, måling av rystelser og problemet med plast i røysa ved deponering i maritime områder. Resultatene fra denne rapporten vil brukes for deler av oppgaven som omhandler tunnel, med godkjennelse fra Petter Jensen og Nye Veier. Det påpekes at rapportens mål er å dokumentere driftserfaringer og anleggsoppfølging, og dermed ikke en vitenskapelig rapport.

1.5. Oppgavens begrensninger

Resultatene i oppgaven baseres i hovedsak på observasjoner samlet inn hos BMHE og deres prosjekter. E18 Rugtvedt-Dørdal er BMHEs første prosjekt med så stor bruk av elektroniske tennere, og det er derfor en begrenset tidsperiode med erfaringsdata. Det er derfor også lite sammenlikningsgrunnlag for ulike typer prosjekter og ulike geologiske forhold, da det meste av registrerte data for elektroniske tennere er hentet fra samme prosjekt.
Orica er sprengstoffleverandør til prosjektet, og oppgaven er utarbeidet på grunnlag av deres systemer, både med tanke på priser og utstyr. Eksempelvis er beskrivelsen av fremgangsmåte ved kobling, lading og avfyring gjort med bruk i Oricas systemer, og andre leverandørers elektroniske tennere vil derfor kunne avvike noe fra dette.

Observasjoner har vært gjort på eget initiativ under normale produksjonsforhold, og det har ikke vært muligheter for å utføre dedikerte forsøkssalver med ulike tennsystemer for denne oppgaven, og dermed gjøre direkte sammenlikninger av de to systemene, for eksempel med rystelsesmålere. I tidsperioden arbeidet med oppgaven foregikk, hadde BMHE ingen pågående prosjekter med ikke-elektriske tennere, og det ble derfor nødvendig å oppsøke andre anlegg for å gjøre observasjoner med dette tennsystemet, og sammenlikne resultater basert på ulike sprengningsarbeider.

Det er ikke gjort egne observasjoner for underjordsdrift. Oppgavens fokus har i hovedsak omhandlet arbeider i dagen, men det er også tatt med noen viktige temaer for drift under jord. Av tidligere utførte studier og forsøk, var oppgavens tema bedre belyst i underjordsdrift, og med lite tilgjengelig ressurser og mangel på erfaring med kontroll av tunneldrift, ville det ikke vært mulig å gjøre bedre undersøkelser enn hva som allerede finnes tilgjengelig.

2. Teori og bakgrunnsinformasjon

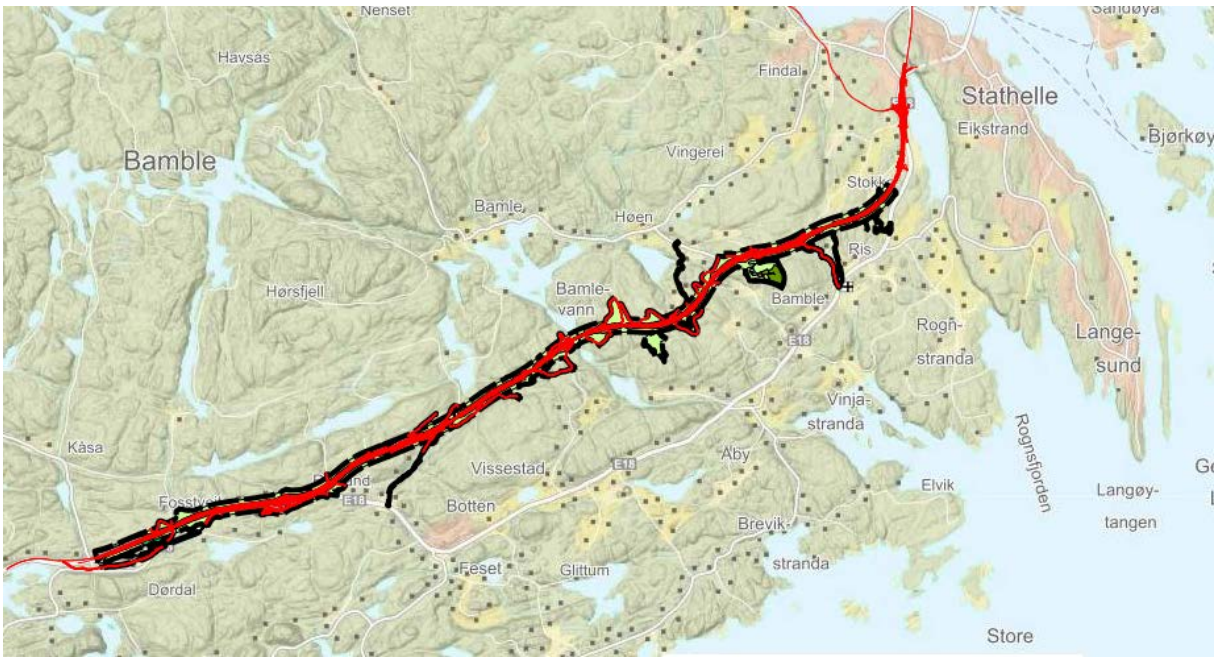
Dette kapittelet består av teori og bakgrunnsinformasjon. Det inneholder litt informasjon om BMHEs prosjekt Rugtvedt-Dørdal, som er årsaken til at denne oppgaven ble til. Flere av personene som har bistått med råd og som kilder har også vært tilknyttet BMHE og dette prosjektet.

Det følger så en del med teori om tennsystemene og hvordan de virker, samt produksjonsmessig fordeler som kan oppnås. Denne teoridelen ble i stor grad utarbeidet i en litteraturstudie høsten 2017, og vil være grunnlag for begreper og tekniske egenskaper som omtales i oppgavens hoveddel.

Kapitlene med resultater, det vil si kapittel 4, 5 og 6, vil også inneholde noe tidligere kjent informasjon. Dette er plassert sammen med resultater der teori og resultater har nær sammenheng, for eksempel er det brukt noe teori for å forklare og støtte opp under resultater som er innhentet.

2.1. Prosjektinformasjon Rugtvedt-Dørdal

E18 Rugtvedt-Dørdal er en del av arbeidet med utbedring av hovedfartsåren mellom Kristiansand og Oslo, og innebærer oppgradering fra to- til firefelts motorvei med fartsgrense 110km/t. Strekningen Rugtvedt-Dørdal er 16,5km lang, og foruten områdene rundt Rugtvedt i øst og til en viss grad området rundt Langrønningen i vestre del, går veilinja i jomfruelig terreng beskrevet som «småkupert skoglandskap med noen overordnede hovedkorridorer og mindre daler på kryss og tvers.» (Statens Vegvesen, 2013, p. 20). Kart over strekningen vises i Figur 1. Flere steder passerer veilinja bergknauser, hvor det har vært vurdert ulike tunnel-alternativer, som alle har blitt forkastet. Strekningen har derfor flere store skjæringer, og på prosjektet skal det tas ut til sammen 3,5 millioner fm3.



Figur 1 - Strekningen Rugtvedt-Dørdal (Kilde: Kart.nyeveier.no)

BetonmastHæhre vant anbudskonkurransen for strekningen, som var Nye Veiers andre store kontraktutlysning med totalentreprise. Spesielt for Nye Veiers prosjekter er at de krever full bruk av elektroniske tennere ved arbeider i dagen som en del av konkurransegrunnlaget, noe som har vært uvanlig i prosjekter med slikt omfang (Homleid, 2018).

2.2. Generell innføring i sprengning

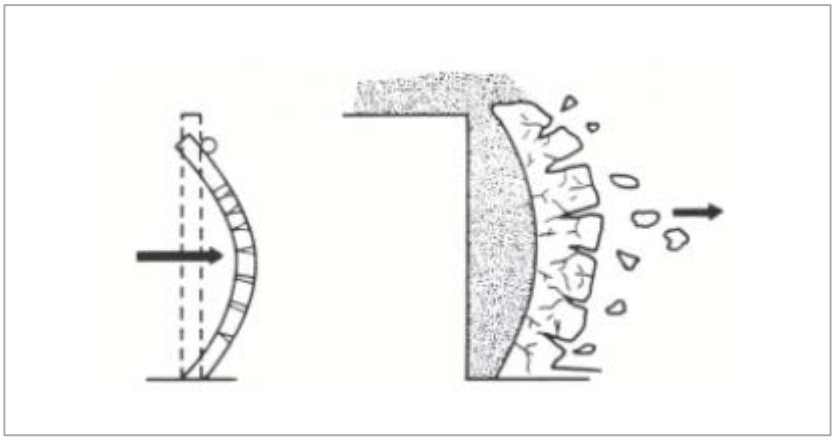
Bergsprengning er et konsept der det brukes eksplosiver for å bryte i stykker massive bergmasser til mindre fragmenter, som lar seg laste ut. Borhull bores med ulike mønstre og avstand, avhengig av type arbeid, ønsket resultat og bergets geologiske egenskaper.

Borhullene lades med eksplosiver av ulike typer. Det skilles i hovedsak mellom bunnlading og pipelading. Bunnladning består gjerne av ekstra kraftig sprengstoff, og plassert nederst i borhullet (Olsen, 2002a). Dette består vanligvis av patronert sprengstoff og har som oppgave å rive løs berget i borhullets bunn og tenne pipeladningen. I tillegg blir hovedtenneren dyttet inn i bunnladningspatronen, som har en modellkittaktig konsistens. Dette sørger for at opptenningen av et borhull starter i bunn, og gir størst sannsynlighet for at alt sprengstoffet i hullet omsettes. Vanlig prosedyre i daglige pallsprengingsarbeider er ½-1 kg som bunnlading.

Pipeladning er, der det ikke brukes topplading, resterende sprengstoff i borhullet, og har som oppgave å rive løs, knuse og kaste frem berget. I store sprengningsarbeider brukes vanligvis slurry, på grunn av den enkle lademåten som tillates. I forhold til bunnlading brukes ofte store mengder pipelading. Eksempelvis var det ved en av salvene observert i arbeidet med denne oppgaven et forbruk på 54kg bunnlading og 3093kg slurry, fordelt på 108 borhull med gjennomsnittsdybde på 8m. Slurry er et tyktflytende sprengstoff, med konsistens som romtemperert plantemargarin. Slurry er ikke spesielt følsomt, og en tenner rett i slurry vil ikke klare å antenne dette dersom tettheten er under omkring 0.9, og det er derfor nødvendig med bunnlading. Slurry kan levers med lastebil og pumpes via en slange rett i borhullene, og er derfor svært tidseffektivt.

Figur 2 - Hendelsesforløp ved skyting. Fra venstre: Bilde 1, før avfyring. Bilde 2, de første intervallene har detonert, løsriving og fremkast starter i bunn til venstre. Bilde 3, detonasjon av videre intervaller. Nebbenes, 3/5/2018

I Figur 2 vises hendelsesforløpet de første millisekundene etter avfyring. Løsbrytning av fjellet er skissert i Figur 3.



Figur 3 - Skissert løsbrytning av berg ved detonasjon. Kilde: Olsen, 2002a

Under omsetting av sprengstoff utvikles en stor mengde gass i løpet av svært kort tid, og det er denne gassutvidelsen som gjør arbeidet med sprengningen. Fordemming er en teknikk der øvre del av borhullet fylles med pukk, etter lading er ferdig, og fordemmingen forhindrer gassen som utvikles til å ha fritt utløp i toppen av borhullet.

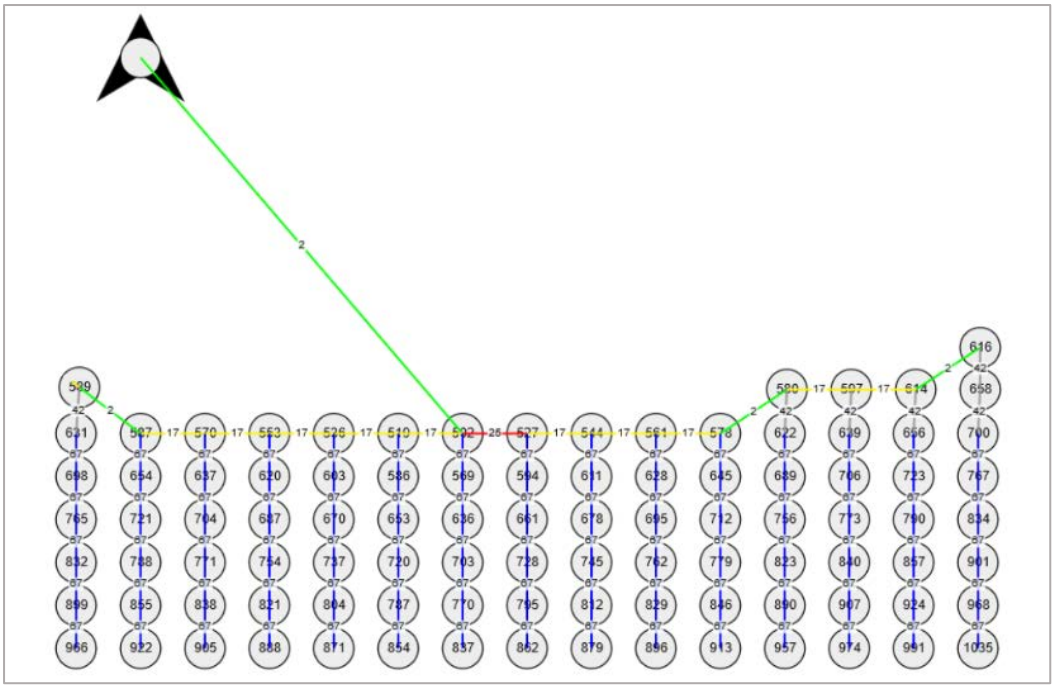
Gassutvidelsen gir to effekter i et borhull. Den første reaksjonen er en trykkbølge som følger av at en stor mengde gass blir dannet under omsetning av sprengstoffet, og det påføres et høyt trykk mot borhullets vegger (Olsen, 2002a). I området nærmest borhullets vegger vil denne plutselige trykkdannelsen forårsake knusing av berget, men kun i en utstrekning i størrelsesorden 2 ganger borhullets radius. Dette området kalles knust sone. Utenfor denne radiusen vil sjokkbølger gir små kompresjoner og ekspansjoner i berget, og fordi fjell har liten strekkfasthet, vil strekkspenningene skape riss i radiell retning ut fra borhullets senter. Dette området kalles skadet sone. I knust og skadet sone vil bergets stabilitet være helt eller delvis svekket.

Den andre reaksjonen er selve gassutvidelsen, hvor kraftig gass presses inn i riss fra sjokkbølgen og eventuelle svakhetssoner i berget. Dersom distansen til fri flate for utslag ikke er for stor, vil gassutvidelsen utvide riss og sprekker, til de når fri flate. Når fri flate er nådd, vil videre gassutvidelse kaste fragmentert berg fremover og gir fri flate til etterkommende detonasjoner av andre hull.

Om et borhull har mindre fri utslagsretning enn 90° vinkel fra borhullets senter, er borhullet innspent (Olsen, 2002a). Innspenninger har en låsende effekt på løsriving av berget, og med innspenninger kreves større lademengde i borhullet for å oppnå en god løsrivelse og fremkast.

Innspenning mot sålen i bunn kan ikke unngås, og denne innspenningen er både noe av grunnen til at borhull bunnlades med ekstra kraftig sprengstoff og grunnen til at fremkastet ved detonasjon starter midt i pallens høyde, som vist i Figur 3, til tross for at detonasjonen starter i bunn.

Ved utforming av detonasjonsmønster er det ønskelig å minimere innspenninger, for å få best mulig virkningsgrad av sprengstoffmengden. «V»-mønster er derfor et vanlig mønster, der første detonasjonsintervall er midt på salvens første rast, og siste intervall er hjørnene i bakre rast. Ved å forsinke borhullene sidelengs, til en V-form, vil tidligere detonasjoner skape større fri flate for neste intervall, og innspenningen blir mindre. I Figur 4 er det vist en tennplan for ikke-elektriske tennere, med V-mønster.



Figur 4 - Tennplan med "V"-mønster, med ikke-elektriske tennere. Kilde: Martin Brekke

Samvirke mellom nabohull er et fenomen der samtidige detonasjoner i borhull som ligger ved siden av hverandre kan gi en reduksjon i den skadede sonen omkring borhullene. En reduksjon i skadet sone er for eksempel ønskelig ved kontursprengning, da stor skadet sone i kontur ofte fører til økt behov for rensk og bergsikring (NFF, 2012). Samvirke mellom borhull kan oppnås om detonasjonen i to nabohull opptrer så samtidig at sprekkdannelsene ut fra borhullenes senter møter hverandre midt mellom borhullene, og skaper en sammenhengende sprekk. Dette vil da opptre som en svakhetsflate, og det vil være enklere for gassutvidelsen å gjøre et mekanisk arbeid langs denne svakhetsflaten enn i retninger med stor innspenning, og vil med riktig utførelse og berg uten store svakhetsplan eller slepper kunne begrense skadet sone i gjenstående berg. På grunn av rissdannelsens raske

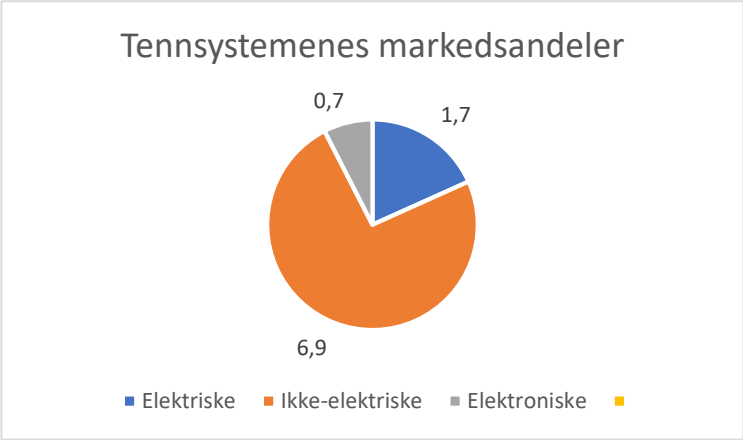
forplantningshastighet i berg, på omkring 2000m/s, er kreves svært nøyaktig detonasjonstidspunkt for at sprekkdannelser fra to borhull skal møtes på midten, spesielt ved liten hullavstand (Smirnov, 1968).

Under utforming av salveplan er et mange parametere som påvirker salvens resultat. Ikke-kontrollerbare parametere er gitt av arbeidsområdet, og er primært styrt av geologiske egenskaper som hardhet, homogenitet, og sprekker eller svakhetsplan (Olsen, 2002a). Kontrollerbare parametere må derfor tilpasses ikke-kontrollerbare forholdene. En salveplan består av borplan, ladeplan og tennplan, og til sammen inneholder de de viktigste kontrollerbare parametere. I borplanen inngår bormønster med bordiameter, hullavstand, forsetning, underboring, fordemming og hullenes helling. I ladeplanen inngår lademengde, både for bunn- og pipeladning, valg av sprengstoff og fordemming. Tennplanen inneholder informasjon om valg og mengder tennmidler, og detonasjon/koblingsmønster. I tillegg inneholder salveplanen øvrig informasjon, for eksempel om det er nødvendig med dekking.

Vanlig praksis på anlegg med stor sprengningsaktivitet er å revidere salveplanen ut ifra erfaringer med tidligere salver i samme område. Hvis det for eksempel er stor opptreden av blokker som må pigges i ettertid, kan hullavstand og forsetning minskes, og hullene lades lettere, eventuelt med mindre hulldiameter (Zou, 2017). Dette kan gi bedre fragmentering, men øker antall hull.

2.3. Tennsystemenes markedsandeler

Det har ikke lykkes å innhente offisielle salgstall for de ulike tennsystemene, men ut fra et kjennskap til det totale salget av tennmidler og forholdet mellom salgstall, er det estimert at salgstall for de ulike tennsystemene er som vist i Figur 5 (Jensen, 2018).



Figur 5 - Estimat over salgstall av de ulike tennsystemene, tall i millioner enheter. Kilde: Petter Jensen

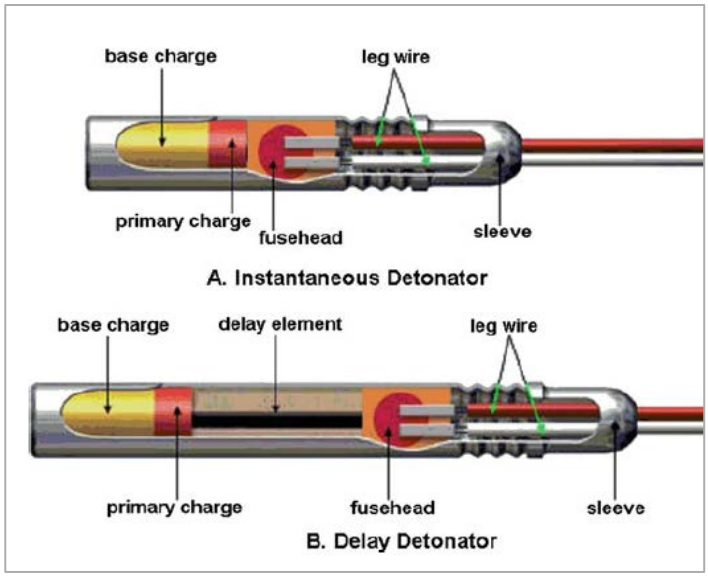
2.4. Tennernes oppbygning

I dag er det i hovedsak tre ulike tennsystemer på markedet: Elektriske, ikke-elektriske, og elektroniske. For en dypere forståelse av forskjellen på de tre ulike typene, vil oppbygning beskrives kort. Elektriske tennere er ikke en del av denne oppgaven, men i noen tilfeller vil elektriske tennere bli nevnt videre for sammenlikning av egenskaper mot de to andre systemene. Derfor vil også dette systemets virkemåte bli kort omtalt.

2.4.1. Elektriske tennere

Elektriske tennere var i mange år så og si enerådende, i mangel på andre gode alternativer. Elektriske tennsystemer har noen ulemper, og etter utviklingen av det ikke-elektriske systemet på 70-tallet, har dette tatt over som mest benyttede systemet i Norge (Olsen, 2002b).

Elektriske tennere består av en elektrisk ledende krets, glødetråd eller tennhode som antenner enten en forsinkersats eller tennsatsen direkte. Figur 6 viser skissert oppbygning av elektrisk momenttenner øverst og intervalltenner nederst.



Figur 6 - Oppbygning av elektriske tennere. Momenttenner øverst og intervalltenner nederst Kilde: Zou, 2017

Intervalltennere inneholder et forsinkerelement, bestående av et metallrør med innhold av et varmefølsomt, men tregt brennende stoff. Forsinkersatsens lengde og innhold avgjør forsinkelsestiden, og ligger plassert mellom tennhodet og tennsatsen, som skissert i Figur 6.

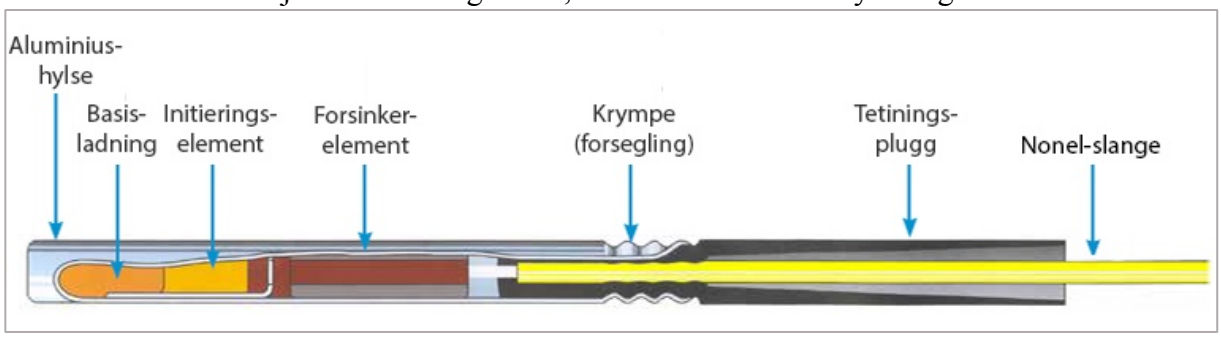
Forsinkertiden baseres på at en pyroteknisk reaksjon propagerer gjennom forsinkersatsen, og til slutt antenner tennsatsen, som ofte består av det høyeksplosive stoffet pentritt. Variasjoner i forsinkertiden kan forekomme på grunn av små variasjoner i forsinkersatsens lengde, pakningstetthet og forskjeller i komposisjonen av det brennende materialet (Zou, 2017). I tillegg kan propagasjonshastigheten variere ut ifra oksidasjonshastighet i satsen, samt fuktighetsnivå.

For å gi tilstrekkelig tennimpuls for opptenning av alle tennere i en salve med et tennapparat av håndterbar størrelse, er elektriske tennere sensitive mot elektrisitet og krever relativ lav strømimpuls for initiering (Cooper, 1996). Dette medfører at systemet ikke anbefales brukt i nærheten av forstyrrende elektriske kilder, for eksempel radiosendere eller høyspent strømledninger. Disse strømkildene kan være nok til å forårsake detonasjon av tennerne, og er en av de største grunnene til ikke-elektriske systemers popularitet. Det finnes likevel ekstra isolerte elektriske tennere for bruk der det kan bli problemer med elektrisk forstyrrelser. Disse krever kraftigere tennimpuls, og derfor et kraftigere tennapparat (Olsen, 2002b). Klassene defineres fra klasse 1-tennere, som er mest følsomme, til klasse 4-tennere, som krever kraftig tenninpuls, og derfor er mye mer resistent mot elektrisk forstyrrelser (Solum, 2016). Mest vanlig i Norge er klasse 1 og klasse 3-tennere.

Elektriske tennere fås vanligvis i 20 intervaller, fra 0-500ms forsinkertid, men det finnes også elektriske systemer med flere intervaller, blant annet har Austrin Rockstar 30 intervaller fra 25-1000ms (Austin Norge, n.d.; Zou, 2017).

2.4.2. Ikke-elektriske tennere

Ikke-elektriske tennsystemer består utelukkende av pyrotekniske komponenter. Prinsippet med forsinkerelement og tennsats er likt for ikke-elektriske og elektriske tennere. Forskjellen ligger i at ikke-elektriske tennere initieres av et sjokkbølgestøt som kommer hele veien fra tennapparatet, og ikke en elektrisk impuls. Dette støtet brer seg gjennom tynne plastslanger, kalt sjokkslanger eller sjokktubeslanger. Disse slangene er hule innvendig, og belagt med et tynt lag høyeksplosivt sprengstoff som overfører en detonasjon omtrent på samme måte som svartkruttlunta som kjennes fra tidlige tider, men med en svært høy hastighet.



Figur 7 - Oppbygning av Oricas Exel nonel-tenner. Kilde: Orica, 2014

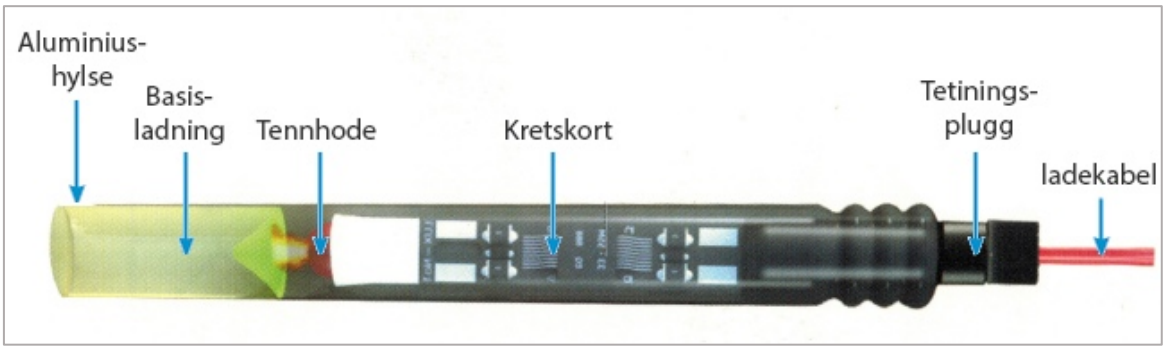
Fraværet av elektriske komponenter gjør systemet upåvirket av forstyrrende elektriske kilder, en av elektriske tenneres store svakheter. Bruken av ikke-elektriske tennere svært utbredt mye brukt på grunn av dette. I tunnelarbeider er ikke-elektriske tennsystemer dominerende, både på grunn av de mange elektriske installasjonene som brukes i moderne driving og den enkle koblingsmåten, buntopptenning, som brukes i Norge. Ikke-elektriske systemer er også mer fleksibelt ved utforming av forsinkerintervaller enn elektriske tennere, på grunn av konseptet med koblingsblokker, som forklares senere (Fagerheim and Neby, 2018).

I likhet med elektriske tennere er har forsinkersatsen en viss varians i forsinkertid, da forsinkersatsen er bygget på samme måte. Det kan derfor ikke forventes nøyaktig samtidig detonasjon av to tennere på samme intervall. Orica (2017) oppgir eksempelvis at deres LP-tenner med 6000ms forsinkertid har et maksimalt standardavvik på ±200ms, som tilsvarer 3.3%. Variasjonen av detonasjonstidspunkt er ytterligere forklart i kapittel 2.6. Denne variansen kan syntes liten, men vil i noen tilfeller ha negative konsekvenser, for eksempel ved å skape overlappende detonasjoner i salver med flere raster.

Ikke-elektriske tennere blir ofte også omtalt som Nonel-tennere, men i utgangspunktet er Nonel et registrert produktnavn av Nitro Nobel AB, nå Orica, som utviklet og patenterte systemet i 1971 (Zou, 2017). Tennernes generelle navn er ikke-elektrisk- eller sjokktube-tennere.

2.4.3. Elektroniske tennere

Elektroniske tennere kom på markedet tidlig på 90-tallet, og er siste teknologiske steg innen tennmidler som fås som hyllevare. I seg selv minner også disse i stor grad om elektriske tennere, og består av en vanntett hylse som inneholder tennsats, tennhode og en dobbel elektrisk leder. Forskjellen fra de andre tennerene er at disse ikke inneholder forsinkersats, men et lite kretskort, som digitalt styrer initieringen av tennsatsen (Zou, 2017).



Figur 8- Oppbygning av elektronisk tenner Kilde: ANB Mining Service, 2013, modifisert

Forsinkertiden blir programmet digitalt enten på stedet, eller på forhånd. På signal fra det digitale avfyringsapparatet, starter den digitale klokken i kretskortet nedtellingen til sitt detonasjonstidspunkt. Hver tenner inneholder også en kondensator som lades opp med strøm fra tennapparatet under armering, og sørger for tilstrekkelig impuls til opptenning av tennsatsen under avfyring. Tennimpulsen kommer derfor ikke direkte fra tennapparatet ved avfyring. Etter armering er hver tenner selvforsynt med strøm, og etter avfyring er de uavhengige av kontakt med resten av tennerne i kretsen (Zou, 2017). Denne løsningen gir en svært presis initiering av tennsatsen, og avvik fra nominell forsinkertid er under 1ms for de vanligste systemene på markedet.

At forsinkertider programmeres digitalt tillater bruk av alle forsinkelsestider fra 0 til maks forsinkertid, med 1ms intervaller. Maks forsinkertid kan være så mye som 30 000ms for visse systemer, men vanligvis begrenset til omkring 10 000ms. Dette gir stor frihet ved valg av detonasjonstidspunkt, i forhold til de andre systemene som kommer med et begrenset utvalg fastsatte intervaller.

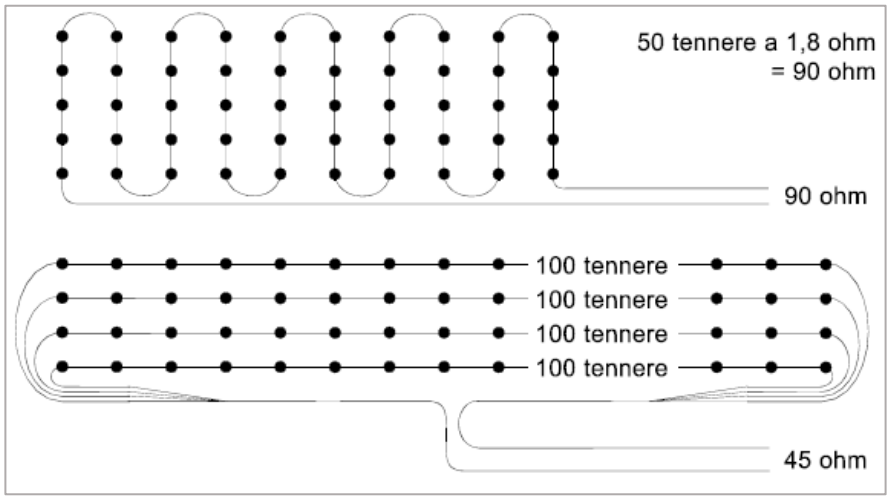
De digitale komponentene gjør systemet kostbart i forhold til de to andre, men gir større sikkerhet, fleksibilitet og nøyaktighet ved valg av forsinkertider.

2.5. Tennsystemenes virkemåte og kobling

Prosedyren for kobling av salve er noe ulikt for de forskjellige systemene, på grunn av deres virkemåte. Forrige del fokuserte på tennerne i seg selv, men denne delen vil gjennomgå andre nødvendige komponenter som brukes sammen med tennerne ved skyting.
Fremgangsprosedyre på kobling vil også bli forklart, da dette blant annet påvirker tidsbruk på kobling. Til slutt nevnes viktige egenskaper på tennsystemene i sin helhet, for eksempel hvordan ferdig koblet salve kan måles for feil, som er et viktig verktøy for å oppdage tenningsbrudd og minimere risikoen for forsagere.

2.5.1. Elektriske tennsystemer

Elektriske tennere kan kobles enten i serie, parallell eller en kombinasjon av de to, som skissert i Figur 9 (Zou, 2017). Hver tenner opptrer som en motstand, og nødvendig tennimpuls for opptenning av alle tennere avhenger av koblingsmåte, som følge av Ohms lov. Dette medfører i praksis at tennere i seriekobling gir større motstand og krever derfor høyere tennimpuls for initiering av alle tennere. Total motstand, R, tilsvarer summen av hver tenners motstand, R_i, og totalmotstand er gitt av $R = \sum R_i$.
Ved parallellkobling er derimot total motstand lavere enn summen av hver motstand, og totalmotstand er gitt av $R = \frac{1}{\sum_i^n \frac{1}{R_i}}$.



Figur 9 - Sammenlikning av motstand ved seriekobling og serie-parallellkobling av elektriske tennere. Skisse: Olsen, 2002a

Serie-parallellkobling er hybrid av de to overnevnte, hvor flere mindre serier er parallellkoblet, som skissert nederst i Figur 9. På denne måten kan en oppnå lavere motstand selv med mange tennere, og total tennimpuls nødvendig blir lavere enn ved ren seriekobling. Serie-parallellkobling anbefales ved salver over 150 tennere (Olsen, 2002b).

Ved parallellkobling er det viktig å koble like mange tennere i hver parallell, fordi elektrisk strøm alltid velger minste motstands vei (Olsen, 2002b). Dersom det er flere tennere i en parallell, vil denne ha høyere total motstand. Store forskjeller i motstand vil føre til at tennerne i serien med størst motstand ikke vil tennes.

For å teste elektriske tennere og tennkabel før skyting kan det brukes ohmmeter eller jordfeilmåler (Olsen, 2002b). Feil kan oppstå blant annet ved isolasjonsbrudd, feilkobling, defekt tenner eller brudd på ledning, da spesielt ved overdekning med tunge skytematter. Jordfeilmåler kan detektere isolasjonsbrudd, hvor strømmen fra ledningen lekker ut til jorden omkring, ved å måle om mengden strøm som blir sendt ut gjennom kretsen er den samme som mottas i den andre enden. Ohmmeter kan teste hver enkelt tenner eller hele kretsen etter brudd på ledninger eller tennere. Dette apparatet sender et svakt strømsignal gjennom kretsen, og måler om kretsen er sammenhengende. En ulempe ved denne målemetoden er at ohmmeterets strømsignal er vesentlig svakere enn strømmen fra tennapparatet, og ved delvis ledningsbrudd vil dette kanskje ikke oppdages før skyting. Delvis ledningsbrudd kan føre til enten for stor motstand for tennimpulsen ved bruddstedet, slik at tennerne ikke får tilført tilstrekkelig spenning, eller det kan føre til varmgang i ledningens reduserte tverrsnitt, som kan brenne av ledningen. Ohmmeter gir heller ingen indikasjon på hvor en feil er lokalisert, og ved feil må det letes med ohmmeteret til feilen er funnet.

Et usikkerhetsmoment ved måling av koblet salve med elektriske tennere er at motstanden i tennerne har en liten varians, som gjør at total motstand i flere tennere kan variere relativt mye (Morstad, 2018). Ved måling av en krets med flere tennere vil en på grunn av dette ikke kunne være helt sikker på at hver enkelt tenners motstand multiplisert med antall tennere stemmer nøyaktig med den målte motstanden. Eksempelvis oppgir Orica at deres Dynadet-C1 0ms NT-tennere med 2m ledning har en motstand på 1.4 ±0.3 ohm. Måling av motstand vil dermed ikke kunne gi et nøyaktig svar på antall tennere i kretsen (Morstad, 2018).

2.5.2. Ikke-elektriske systemer

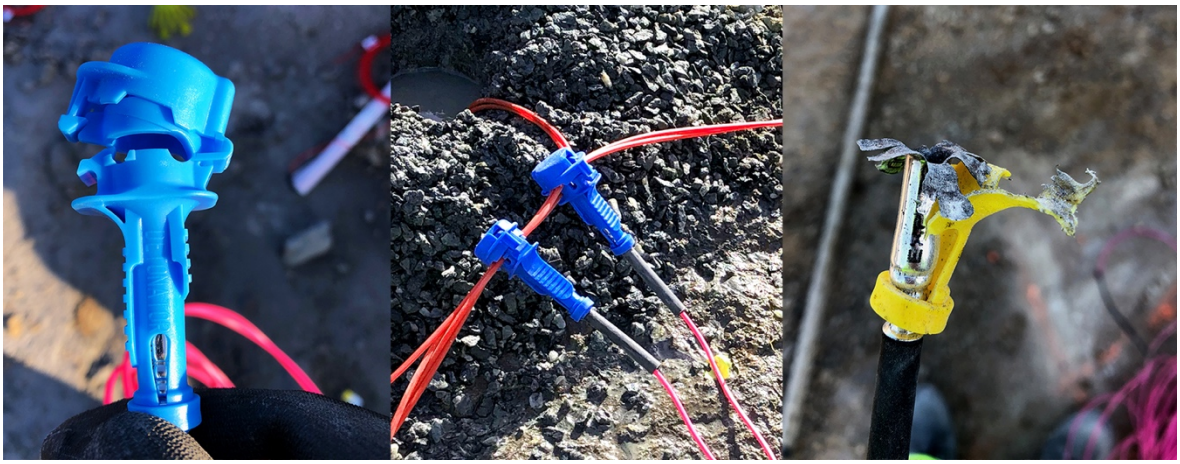
Ikke-elektriske tennsystemer består i hovedsak av tennerne, koblingsblokker, sjokkslanger og tennapparat, hvor alle komponenter er basert på pyrotekniske reaksjoner.

Ikke-elektriske tennerne kommer levert med slanger i ulike lengder med krympet ende. Slangens lenge velges ut ifra borhullets lengde og tennerens plassering i borhullet, da slangen må være lang nok til å nå ut av borhullet, hvor de kobles til en koblingsblokk av plast, som inneholder en liten tenner. Koblingsblokkene er klipsbasert, og man plasser slangene i et spor i koblingsblokken, og klipser fast lokket. Normalt blir hver tenner koblet i en egen koblingsblokk, som igjen er koblet til koblingsblokken ved siden av, som vist i Figur 10.

Fordi hver koblingsblokk inneholder en tenner, kan de også inneholde en forsinkersats. Denne

Figur 10 - Ferdig koblet ikke-elektrisk salve med blå 67ms koblingsblokker. Tennerledningene er gule. Nebbenes 03/05/18

forsinkersatsen forsinker overføring av sjokkbølgen, og det er med denne forsinkelsen detonasjonsmønsteret utformes. Det finnes koblingsblokker med ulik forsinkertid, som er fargekodet med ulike farger.



Figur 11 – Fra venstre: Bilde 1: 67ms intakt koblingsblokk før kobling. Bilde 2: To 67ms koblingsblokker koblet i til sammen fire tennere. Bilde 3: Detonert 17ms koblingsblokk gjenfunnet i røys. Nebbenes 03/05/18

Via kombinasjoner av flere koblingsblokker med forskjellig forsinkertid, kan detonasjonsmønsteret utformes i mye større grad enn for elektriske tennere, der eneste forsinkerelement sitter i selve tenneren. Figur 11 viser tre bilder av koblingsblokker henholdsvis før kobling, etter kobling og etter skutt salve.

Ved sprengning i dagen brukes vanligvis tennere med samme forsinkertid i alle borhullene, uavhengig av hullets endelige forsinkertid (Zou, 2017). Tennerens forsinkertid skal i utgangspunktet være lenger enn den siste koblingsblokken, for å hindre at slanger rives over før siste tenner har mottatt initieringsimpuls.

Det tilbys også spesialtilpassede Nonel-tennere med ulike intervaller, for bruk i arbeider under jord (Orica, 2007a). Oricas LP-tennere er et eksempel på dette, og det er her 32 ulike intervaller fra 25ms-6000ms, som kan brukes uten behov for koblingsblokker. Austins tunnelserie Indetshock TS har 40 intervaller fra 25-9000ms.

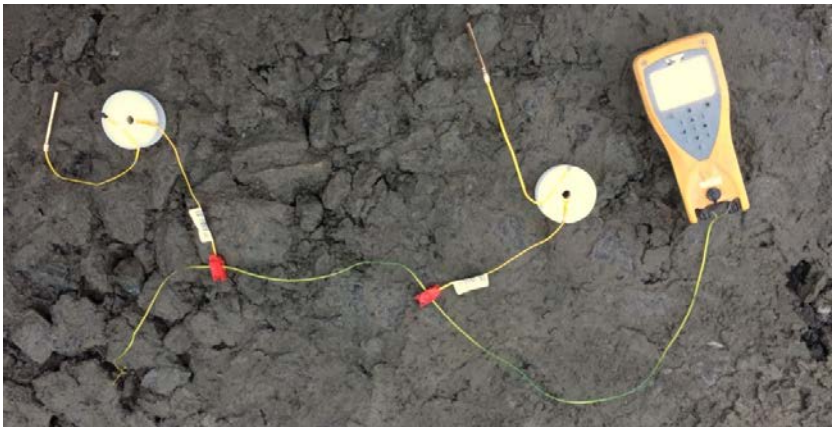
Når alle tennerne er koblet til en koblingsblokk, kobles koblingsblokken i første intervall til en lead-in line, som er en lang sjokkbølgeslange som til slutt kobles til tennapparatet. Nyere ikke-elektriske tennapparat er utstyrt med et batteri, transformator og en kondensator. Dette apparatet omformer den lave spenningen fra batteriene til en gnist kraftig nok til å sette i gang sjokkbølgen i den tilkoblede nonel-slangen, som så brer seg videre og forgrenes i koblingsblokkene og siden til hver enkelt tilkoblede tenner (Orica, 2007b). Det finnes også tennapparat som lades med en patron, liknende ammunisjonen til en salongrifle. Disse apparatene har da heller ingen elektriske komponenter.

På grunn av Nonel-systemets klips-løsning og enkle fargekodesystem er systemet svært effektivt og oversiktlig å koble.

Fordi Nonel-systemet baserer seg på et konsept der en sjokkbølge brer seg gjennom slangen, og kan på den måten sies å kun ha enveiskommunikasjon med tennapparatet, og det er ingen mulighet til å teste systemet for brudd på slange, utover visuell inspeksjon etter ferdig koblet salve. Spesielt ved overdekning med skytematter er faren for brudd på en slange tilstede, da nonel-slangene er relativt vare for skade. Etter overdekning er det heller ingen mulighet for å kontrollere salven visuelt, og tenningsbrudd ved bruk av Nonel-systemet er derfor ikke uvanlig. For å unngå at slanger kommer i klem, kan det bygges opp med løse stener i områdene rundt slangene, slik at mattenes vekt hviler på disse istedenfor direkte på slangene.

2.5.3. Elektronisk tennsystem

Det elektroniske tennsystemet består av tennere, bus-ledning, scanner, tester og en avfyringsmodul. Det finnes også kombinert scanner og tester i samme enhet. Figur 12 viser en kombinert scanner og tester i måle-modus, med to tilkoblede tennere.



Figur 12 - To elektroniske tennere koblet til en scanner fra Orica, Rugtvedt 6/12/17

Tenneren kommer levert med kobberbasert ledning, med klips og en lapp med strekkode i ledningens andre ende, som Figur 12 viser. Strekkoden er unik på hver tenner, og koden fungerer som tennerens ID. Etter plassering av tenner i borhull blir strekkoden lest av en håndholdt scanner, som registrerer og lagrer tennerens ID, sammen med forsinkertiden den blir tildelt (Nederskår, 2017). Hver tenner i salva må scannes og tildeles forsinkertid, hvis ikke vil det opptre som ukjent tenner, og gi feil under testing.

Figur 13 – Til venstre: kombinert logger og tester, Oricas Scanner 200. Til høyre, avfyringsmodul fra Orica, Blast Box 310R. Her fotografert under overføring av tennerdata fra scanneren til avfyringsmodulen, Rugtvedt 6/12/17

Etter at alle tennerne er koblet sammen ved hjelp av tennerledning kan testeren kobles til og måle kommunikasjonen med hver tenner for dens status. Det finnes også apparater som både har funksjonaliteten til loggeren og testeren. En slik er vist i Figur 12 og til høyre i Figur 13.

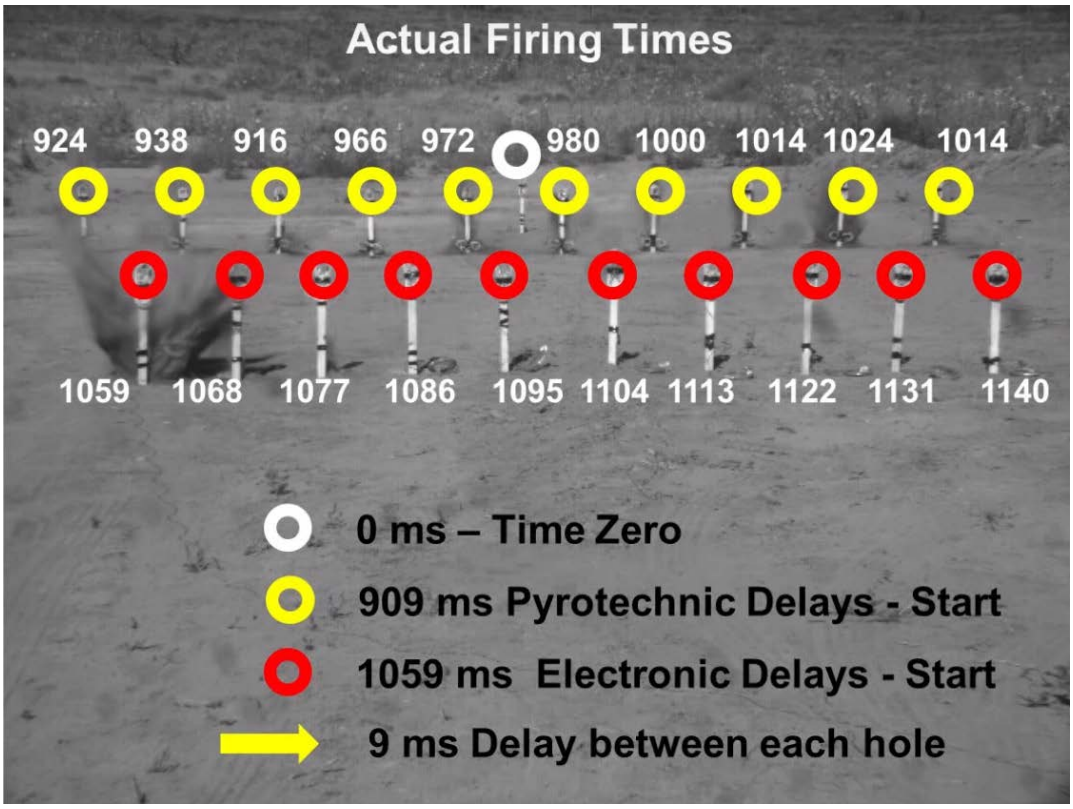
Dataen fra loggeren overføres så til en digital avfyringsmodul og kan sees til venstre i Figur 13. Denne sjekker og armerer alle tennerne før avfyring, og gir mulighet for dokumentasjonslogg av salven i ettertid. Avfyringsmodulen kobles til salven via skyteledningen. Det finnes også moduler med trådløse avfyringskontrollere. Dette muliggjør blant avfyring av salve under jord, uten behov for mannskap tilstede under bakken. I tillegg kan flere avfyringsmoduler linkes sammen, og gir mulighet til enda større salver.

På grunn av den digitale initieringen av elektroniske tennere, er disse svært tidsnøyaktige, og selv på de lengste forsinkertidene vil det kunne oppnås initiering med mindre enn et millisekund avvik fra nominell detonasjonstidspunk (Zou, 2017). Systemet påvirkes heller ikke av eksterne elektrisk forstyrrende kilder, og kan brukes i nærheten av elektriske kilder.

Metoden for å måle ferdig koblet salve er ofte nevnt som en av elektroniske tenneres viktigste egenskap. Fordi toveiskommunikasjon med tennerne er mulig, kan alle tennere sjekkes opp mot listen over scannede tennere, og på den måten kan systemet oppdage tennere som eventuelt er tilkoblet kretsen men ikke er scannet og tildelt forsinkertid, eller tennere som er scannet men mangler i kretsen (Orica, 2014). I tillegg kan testeren kontrollere lekkasjestrøm. Denne testen kan repeteres kontinuerlig, noe som er spesielt nyttig under arbeid med overdekning, da kan feil oppdages så fort de oppstår, for eksempel en ledning som rives i stykker. Det oppgis også hvilke tennere som ikke har kontakt, og det er på den måten enklere å lokalisere brudd enn ved test av elektriske tennere.

2.6. Tennsystemenes detonasjonsnøyaktighet

Tennere som varierer prosentvis mye fra sitt detonasjonstidspunkt kan skape utfordringer. Eksempelvis kan overlappende intervaller i rastvis detonasjon være lite gunstig, dersom et hull i rasten foran enda ikke er detonert når et hull i bakre rast går av (Zou, 2017). Spesielt ved rystelsesbegrensninger er det gjerne en fordel at enhetsladningene går av nøyaktig som planlagt. Overlappende detonasjon vil ikke inntreffe om avvik fra nominelt detonasjonstidspunkt er mindre enn halvparten av forsinkertiden til neste hull. For eksempel vil 25ms forsinkertid mellom to hull ikke risikere overlappende detonasjon om maks avvik er mindre enn ±12.5ms.

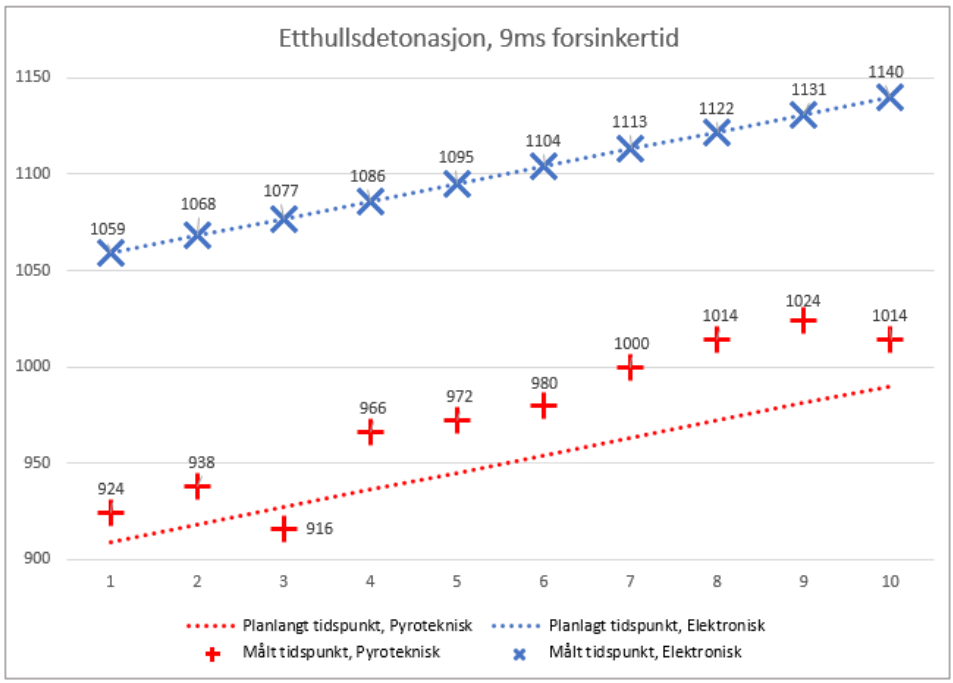


Figur 14 - Sammenlikning av faktisk detonasjonstidspunkt ved enkethullsdetonasjon ved bruk av pyrotekniske tennere (gult) og elektroniske tennere (rødt) Kilde: Dyno Nobel, 2015.

Figur 14 viser et bilde fra en video produsert av Dyno Nobel (2015), hvor tennerens nøyaktighet demonstreres. I bakre rekke med gul ring er det 10stk 900ms pyrotekniske tennere, mens det i fremste rekke med rød ring er elektroniske tennere. I denne testen hadde begge typene blitt satt med 9ms forsinkertid mellom tennerne, fra venstre mot høyre. Avfyringen ble filmet med høyhastighetskamera for å kunne bestemme faktisk detonasjonstidspunkt for hver tenner. Tallene på Figur 14 viser resultatet fra dette opptaket. Detonasjonstidspunkt for første pyrotekniske tenner skulle være 909ms, men første

detonasjon, som var tenner nr. tre, gikk på 916ms. Denne skulle gått på 927. Tenner 10 detonerer samtidig som tenner 8, altså før tenner 9. Som grafen i Figur 15 viser, detonerer de fleste pyrotekniske tennerne senere enn planlagt, og ingen tenner nøyaktig.

I fremste rad er samme prosedyre utført med elektroniske tennere, med første tenners detonasjonstidspunkt på 1059ms. Testens resultat viser at alle de elektroniske tennerne detonerer som planlagt, og at det må under mikrosekund-nøyaktighet for å måle noen form for unøyaktighet.



Figur 15 – Grafen viser tidsnøyaktighet for pyrotekniske og elektroniske tennere i den utførte testen. Kryss for målt tidspunkt, stiplet linje for planlagt detonasjonstidspunkt.

I denne testen er det brukt 900ms pyrotekniske tennere. Fordi spredningen blir større på trege tennere, vil denne fremstillingen være mer ekstremt enn de mer brukte 475 og 500ms-tennere, som også på grunn av stort salgsvolum er best utviklet og regnet som de beste pyrotekniske tennerne. Et forsøk gjort av 65 100ms ikke-elektriske viste et gjennomsnittlig avvik på 2.7%, hvor maksimum og minimum avvik på enkelttennere ble målt til henholdsvis 123.2ms og 79.8ms (Lusk et al., 2013). Tilsvarende viser rapporten at de elektroniske tennerne har millisekunds nøyaktighet opp til 8000ms forsinkertid. Maksimum og minimum avvik var her på 7995ms og 8015ms.

2.7. Elektroniske tenneres fordel i produksjon

Flere studier og forsøk har vist at det kan oppnås produksjonsmessige fordeler ved bruk av elektroniske tennere, fordi det gis muligheten til mer fleksible forsinkertider og nøyaktig detonasjonstidspunkt. Disse fordelene vil kunne virke gunstig inn på både tidsbruk og økonomi, ved å forenkle arbeidet med klargjøring eller etterarbeidet av salven, eller gi et bedre sluttresultat. Dette delkapittelet forklarer de fordelene som er vurdert som mest aktuelle.

2.7.1. Korreksjon av boravvik

Ved boravvik i ett eller flere hull, for eksempel i form av for liten eller for stor forsetning ved pallsprengning, kan elektroniske tennere programmeres til å kompensere for dette (Nederskår, 2017). Ved at det gis muligheten til å endre forsinkertiden med millisekunder, kan boravvik til en viss grad korrigeres ved å legge til eller korte ned på forsinkertiden i forhold til korrekt forsetning. Normal er forsinkertid omkring 10-20ms for hver meter forsetning ved rastvis detonasjonsmønster (Neby et al., 2011). Dersom forsetningen er større enn planlagt, vil en liten økning av forsinkertid kunne føre til bedre sekundærfragmentering og mindre pakket røys, som vil kunne forenkle lastearbeidet samt redusere forekomst av blokker som må pigges før lasting (Das Sharma, 2009). Ved bruk av ikke-elektriske tennere er man i større grad låst til de forsinkertidene koblingsblokkene leveres med.

2.7.2. Økning av salvestørrelse ved vibrasjonsbegrensninger

Ved arbeider nær konstruksjoner, eller det av andre grunner er nødvendig å begrense vibrasjoner, er et vanlig tiltak å redusere salvestørrelsene for å være sikker på å overholde kravene (Statens Vegvesen, 2012). Når salvestørrelsene reduseres vil antall sykluser med boring, lading og sprengning og lasting økes, og føre til mindre effektiv produksjon. Med elektroniske tennere kan det oppnås bedre kontroll over tennintervallene, og detonasjonene kan styres bedre med fritt valg av forsinkertid. Derfor kan salvens størrelse økes, uten at enhetsladningen pr. intervall blir større (Fagerheim and Neby, 2018). Med ikke-elektriske tennsystemer er man derimot bundet opp mot de tilgjengelige forsinkertidene blokkene leveres i, og om variansen i hver blokk og hver tenner forplanter seg bakover i salva gir dette mindre kontroll over enhetsladningene på hvert intervall.

2.7.3. Optimalisering av røys

På samme måte som det kan gjøres små tilpasninger ved boravvik, kan detonasjonsmønsteret gjøres mer komplekst med bruk av elektroniske tennere. Brukt riktig gir dette muligheten for

å oppnå mer uniform og optimal grad av fragmentasjon. Det gir mer effektiv lasting samt mindre behov for pigging av store blokker etter skyting, eventuelt mindre grovknusing i knuseverk. Også sprengstoffbruk kan reduseres om detonasjonsmønsteret lar seg optimalisere i forhold til ved bruk av andre typer tennere (Cardu et al., 2013).

I en rapport av David Miller og Drew Martin (2017) er det beskrevet et forsøk utført i Adelaide Quarry. Formålet var å undersøke nedstrøms produksjon med den forbedrede fragmenteringen som kan oppnås ved bruk av elektroniske tennere. Figur 16 viser resultatet av salven på omkring 91 000 tonn. Venstre halvdel ble skutt med ikke-elektriske, og høyre halvdel med elektroniske tennere. Bildet viser en jevnere fragmentering i delen der elektroniske tennere ble brukt. Etter endt prosessering av hele røysa viste resultatene at elektroniske tennere gav en reduksjon i forekomst av blokker på 43%, førte til 23% høyere gjennomsnittlig lasterate og 18% høyere produksjon i knuseverket. Etter ferdig prosessering av hele salven viste bruk av elektroniske tennere en reduksjon i totale operasjonskostnader på 13% i forhold til delen skutt med Nonel. Dette er medberegnet den økte kostnaden enhetsprisen elektroniske tennere har.

Figur 16 - Sammenlikning av fragmentasjon i steinbrudd. Til venstre for rød strek er Orica Exel pyrotekniske tennere brukt, og til høyre Orica I-kon elektroniske tennere Kilde: Miller and Martin, 2017.

2.7.4. Kontur

Konturs prengning foregår både over og under jord, og går i prinsippet ut på det samme i begge tilfeller. Ønsket ved konturs prengning er å la gjenstående berg stå igjen så nært opp mot teoretisk sprengningsprofil som mulig, samt å unngå svekkelse av bergets styrkekapasitet. Oppnås gode resultater med dette kan det oppnås reduserte overmasser, sikringsbehov og rensk (NFF, 2012a). God konturkvalitet kan også minimere behovet for vedlikehold i driftsfasen.

Tennernes viktigste egenskap ved sprengning av kontur er tidsnøyaktighet, ved at det med samtidig detonasjon kan oppnå den svært gunstige effekten med samvirke mellom borhull, og på den måten redusere skadet sone i den gjenstående delen av berget (Zou, 2017). Effekten med samvirke mellom borhull er omtalt kapittel 2.2, med mer detaljert gjennomgang av tennernes nøyaktighet i kapittel 2.6.

2.8. Sammenlikning av ikke-elektriske og elektroniske tenner i tunnel

2.8.1. Tidsbruk

Dette delkapittelet om tidsbruk i tunnel er basert på erfaringene fra rapporten *Driftserfaringer E 18 KBT elektroniske tennere vs. Ikke-elektriske tennere, sikkerhet og tekniske egenskaper i tunnel*, utført av Petter Jensen i Hardrock Consult AS i forbindelse med driving av Kjørholttunnelen, som er en del av KBT. Rapportens hensikt er kort beskrevet i kapittel 1.4.2.

Under drivingen av det nye parallelle løpet i Kjørholttunnelen, en av tunnelene i KBT, ble det blant annet gjort observasjoner av tidsbruk med elektroniske og ikke-elektriske tennere i underjordsarbeider. Dette innebar forskjell i tidsbruk for lading og kobling, utlasting og maskinrensk. Resultatene baserer seg på observasjoner av 25 salver med elektroniske tennere og 34 salver med ikke-elektriske tennere.

I rapporten ble det observert at både tidsbruk for lading, lasting og rensk var mer tidkrevende ved bruk av elektroniske tennere enn med ikke-elektriske tennere. Detaljert resultat er gjengitt i kapittel 5.1.3.

2.8.2. Kontur

Dette avsnittet er basert på *Rapport fra forsøk med elektroniske tennere og detonerende lunte ved driving av Jarlsbergtunnelen* (2010), hvor målet med forsøket og rapporten er beskrevet i kapittel 1.4.2.

Med bruk av elektroniske tennere og 80g detonerende lunte i ytterkontur i hengen, ble det gjort 6 forsøkssalver som grunnlag for denne rapporten. I to av salvene ble det skutt 35 hull med c-c 60cm, og de resterende fire salver ble det skutt med 32 hull med c-c 65cm. Alle elektroniske tennere ble programmert til 6000ms. Resterende hull ble ladet med bulkemulsjon og buntopptenning.

Etter vurdering av de seks forsøkssalvene og sammenliknet med de resterende salver i tunnelen, som ble skutt med bulk emulsjon og ikke-elektriske tennere, ble det påvist en stor forbedring i antall synlige borpiper, og en mer slett kontur. Det ble også sett en liten reduksjon i nødvendig antall bolter for sikring. Det ble derimot ikke gjort noen tydelige tegn på reduksjon av mengde sprøytebetong, og med det ingen stor reduksjon av overmasser. I de seks salvene hvor det ble brukt elektroniske tennere og detonerende lunte, ble det ikke funnet noen lunterester i røysa, og til sammenlikning ble det erfart rester av detonerende lunte i nesten hver eneste salve under driving av Romeriksporten, hvor det ble brukt detonerende lunte, men ikke-elektroniske tennere.

Det ble også gjort målinger av overmasser under drivingen av Kjørholttunnelen, i forbindelse med Hardrock Consults rapport om driftserfaringer fra KBT. Mengde overmasser i denne rapporten er basert på scanning av tverrsnittet for hver halve meter. Det ble i snitt målt 13.9% overmasser etter salver skutt med elektroniske tennere, og 14.5% med ikke-elektriske tennere.

2.9. Utslipp av plastavfall ved deponi i maritimt miljø

Under tunnelarbeidet i forbindelse med Ryfast ble det registrert store mengder plastavfall i det maritime miljøet etter tunneldrivingen (Ecofact, 2015). På strender i hele Ryfylkebassenget ble det funnet store mengder plastfiberarmering og sjokkslangerester etter sprengningsarbeidene. Opphavet til tennslangene var sprengsteinen fra tunneldrivingen, som ble deponert i en sjøfylling på vestsiden av Buøy. Urensket sprengstein fra tunneldriving inneholdt store mengder uomsatt tennslange blandet i røysa, som i sin tur vil flyte opp når steinmassene blir deponert i sjøen. Det ble anlagt lenser rundt deponiet, men det var ikke tilstrekkelig for å fange opp plastslangene.

Problemet med så store mengder plastslanger i røysa kommer av at den mest brukte teknikken for driving av tunnel i Norge skjer med såkalt buntopptenning (Fagerheim and Neby, 2018). Teknikken går ut på at tenneren er plassert innerst i horisontale borhull, med sjokkslangen stikkende ut. Så buntes flere sjokkslanger fra andre tennere sammen på utsiden av borhullet, og blir knytt sammen med detonerende lunte. Det er denne detonerende lunta som setter av tennerne. I ytterste del av borhullene er det også en lengde hvor borhullet ikke er ladet med sprengstoff, som igjen betyr at det ikke vil foregå en opptenning i denne delen. Når salva fyres av vil denne delen av slangen ikke brennes opp, men slenges ut av borhullet, og sammen med all den slangelengde som befinner seg utenfor borhullet vil den bli liggende blandet i røysa. På denne måten vil det til sammen, fra hvert borhull, bli store mengder slangerester som lastes ut sammen med sprengstein. Om det ikke blir foretatt en rensing av utlastet sprengstein, vil det havne i deponiet.

Som resultat av de store funnene av plastslanger etter arbeidet med Ryfast, ble det skjerpede krav for tillatelse til å anlegge sjødeponier for Rogfast-prosjektet (Statens Vegvesen Region vest, Prosjektavdelinga, 2016). I sammenheng med arbeider i Liafjell, gjorde Statens Vegvesen en undersøkelse på mengden plast som flyter opp ved bruk av elektroniske tennere, som viste et resultat som var godt nok til at miljødirektoratet aksepterte påbegynnelse av Rogfast-prosjektet (Fagerheim and Neby, 2018). Resultatene fra forsøket viste at 1.1%-3.7% av total mengde plast ble funnet igjen på overflaten etter dumping av sprengstein med lekter til en dybde på 1000m (Norconsult, 2017a). På Rogfast-entreprise E11 er disse mengdene plast kalkulert til å bli totalt 2.5-8.3kg, med elektroniske tennere og opp mot 315kg dersom det ble benyttet ikke-elektriske tennere. Kobbertråden som ligger i tennerledningen på elektroniske tennere sørger for at denne ikke vil flyte opp og forurense på samme måte, men

vil bli liggende mer eller mindre forseglet i deponi-området. Kravet til valg av tennsystem på dette prosjektet er foreløpig basert på at tennerledningens egenvekt skal være høyere enn vann, som det i dag bare er elektriske og elektroniske tennere som overholder (Fagerheim and Neby, 2018; Norconsult, 2017b).

3. Metode

Dette kapittelet omhandler fremgangsmåten som er benyttet under arbeidet med oppgaven. Det vil kort bli gått gjennom ulike forskningsmetoder med styrker og svakheter, hvordan de er benyttet under arbeidet med oppgaven og en vurdering av metodevalget i ulike tilfeller.

3.1. Metoder

Ved forskningsarbeider er det vanlig å skille mellom kvalitative og kvantitative metoder (Andersen, 2008). De nasjonale forskningsetiske komiteene (2010) beskriver de to metodene slik:

> *«Kvalitative metoder bygger på teorier om fortolkning (hermeneutikk) og menneskelig erfaring (fenomenologi). Metodene omfatter ulike former for systematisk innsamling, bearbeiding og analyse av materiale fra samtale, observasjon eller skriftlig tekst [...].*
>
> *Kvantitative forskningsmetoder forholder seg til kvantifiserbare størrelser som systematiseres ved hjelp av ulike former for statistisk metode. Tall og statistikk er imidlertid ikke selvforklarende, derfor inngår fortolkning som et sentralt element også i kvantitativ forskning.»*

Kvalitative metoder bygger på samtaler, observasjoner eller tekstanalyser, for å gi forståelse og innsikt i et tema, og kan blant annet brukes for å undersøke hvorfor eller hvordan (Hoffmann, 2013). Kvantitative metoder, derimot, baseres på data og mengder i et forsøk på finne sammenhenger og tendenser, eksempelvis hvor mange, hvor mye eller hvor ofte (Johansen et al., 2000).

Bergsprengning er et svært erfaringsbasert fag, hvor teknikker og forhåndsregler varierer ut ifra omstendighetene og arbeidsoppgavene. Det er derfor sjeldent en universell fasit på riktig produkt eller riktig fremgangsmåte. Derfor var kvalitativ metode i form av deling av erfaringer i stor grad brukt i arbeidene med denne oppgaven. Slik kan en bedre forstå sammenhengen mellom tennsystemene og deres egenskaper, hvilke egenskaper som er utslagsgivende ved valg og hvorfor.

Arbeidet med en slik oppgave i et ukjent fagfelt er komplisert og forvirrende, og det ble i stor grad brukt et eksplorerende design. Dette er en underkategori av kvalitativ metode, hvor innsamling av data og informasjon fører til nye spørsmål og strategier, ettersom innsikten gradvis øker (Sander, 2016).

Det er også gjort innsamlinger av kvantitativ data, da ofte i en kombinasjon med en påfølgende kvalitativ undersøkelse. Det kan dreie seg om en type uønsket hendelse, for eksempel opptreden av forsagere. Det ble der innhentet statistisk data for å se etter en trend ut ifra dette. Deretter ble det innhentet erfaringer fra bransjen for å finne bakgrunnen og årsaken til denne trenden. For en sammenlikning blir det så nødvendig å undersøke samme hendelse for det alternative tennsystemet, og se om den samme hendelsen opptrer i større, mindre eller i like stor grad, og eventuelt hvorfor eller hvorfor ikke.

3.2. Datainnsamling

Dette delkapittelet tar grovt for seg strategien ved utarbeidelse av oppgaven, hvilke kilder som er benyttet og hvorfor.

3.2.1. Litteraturstudie

Den første delen av oppgaven bestod i å kartlegge de ulike tennersystemenes tekniske oppbygning, deres egenskaper og prosedyre ved kobling. Dette ble utført i en egen fordypningsoppgave i faget TBA4570 Anleggsteknikk fordypningsprosjekt, høsten 2017, og var i stor grad basert på kvalitativ metode med et eksplorerende design. Videre var målet med fordypningsoppgaven å skape en grunnleggende forståelse av bergsprengningsfaget utover det som inngår i pensum i anleggsteknikkfagene som tilbys ved NTNU. Den skulle også avdekke de viktigste forskjellene ved bruk av hver tennertype, og hvordan de ulike kan påvirke resultat på ulike måter. Dette ble gjort i stor grad basert på tidligere publiserte rapporter, forsøk og undervisningsmateriell, både utarbeidet i Norge og internasjonalt.

3.2.2. Intervju

Intervju er en viktig kvalitativ metode, og store deler av oppgaven er basert på samtaler med personer med ulik bakgrunn, men alle med god erfaring innenfor bergsprengningsfaget. Tidlig i prosessen var hensikten med intervjuene i stor grad å skaffe grunnlag for videre arbeid, avdekke hvilke tema det er gjort undersøkelser på før, og hvilke temaer som krevde større fokus og utarbeide strategier for gjennomføring av videre undersøkelser. Det ble i stor grad benyttet en nokså åpen struktur i intervjuene, med generelle og åpne spørsmål. På denne måten kan intervjuobjektene selv komme inn på områder de selv mener er viktige, og som burde bli tatt i betraktning. Senere i arbeidsprosessen var intervjuene mer strukturert, og spørsmålene var mer spesifikke for å dekke områdene med mangelfull eller ensidig informasjon.

I samtalene ble det også i mange tilfeller spurt om å reflektere rundt de innsamlede kvantitative resultatene som var innhentet, for å avdekke mulige grunner til trender, og hva det kan medføre. Det ble utført samtaler med utførende, både sprengningsarbeidere og de i lederroller, konsulenter og representanter fra byggherrer og leverandører.

3.2.3. Deltagende observasjon

For å skaffe et godt og helhetlig bilde ved bruk av de to ulike tennsystemene er det i denne oppgaven benyttet deltagende observasjon, det vil si observasjoner ute i felt, men også deltagelse i arbeidet. I forbindelse med dette er det også blitt samlet informasjon om arbeidsprosedyrer og teknikker, samt åpnet for muligheten for å forstå systemene på en måte som ikke ville vært like enkelt ut ifra litteratur eller forklaringer. Underveis i feltarbeidet er det også konversert med bergsprengerne, for deres meninger og erfaringer. Spesielt ble dette benyttet under arbeidet med å måle tidsbruk for arbeider, ikke bare fordi en får en total oversikt hva som inngår i de ulike prosessene, men også fordi det er enklere å se hva som forårsaker tidsforsjellen.

3.2.4. Kvantitative data

Det har også blitt samlet inn kvantitative data. Sammenlikning av kostnader for innkjøpskostnader er et eksempel på dette. Innkjøpskalkylen er utarbeidet av Tore Venåsen, fagleder for sprengningsavdelingen i BMHE, og er basert på erfaringer fra reelle prosjekter.

Innsamling av RUH for sammenlikning av hendelser for de aktuelle tennsystemene er et annet eksempel på samling av kvantitativ data. Rapportene er for det meste hentet ut fra BMHEs database over RUH, men det er i tillegg hentet ut et lite antall fra DSBs database. En RUH er en kortfattet rapport fra en uønsket hendelse som opptrer ved arbeider, utført av personen som oppdager eller er vitne til hendelsen. Et eksempel kan være en maskinfører som har gjort funn av uomsatt sprengstoff under utlasting av sprengstein. Disse er i ettertid sortert og analysert for å finne statistiske forskjeller over mengden av rapporter for hvert hendelsesområde, ved benyttelse av de to ulike tennsystemene. Resultatene er også sammenliknet med opplysninger fra intervjuene og litteratursøk, for en undersøkelse om de er i tråd med forventet resultat.

3.3. Vurdering av metoder

Dette delkapittelet reflekterer verdien ved de benyttede metodene, om de gav resultater som ønsket og fordeler og utfordringer ved bruk.

3.3.1. Litteraturstudie

Litteratursøket er i stor grad basert på publiserte forskningsartikler, både nasjonale og internasjonalte. De internasjonale artiklene var i mange tilfeller meget spesifikke i emne, for eksempel vibrasjonsmålinger ved ulike forsinkertider i store dagbrudd. For å vurdere internasjonale forskningsrapporter basert på storskala mineralutvinnings relevans for relativt sett små norske infrastrukturprosjekter, ble det foretatt samtaler med representanter fra ulike statlige etater og private foretak. De kunne bidra med erfaringer fra norske forhold, og fra virkelige produksjonsprosesser. I slike forskningsrapporter er det i mange tilfeller før skyting utført vesentlige forberedelser før skyting, som sondering av borhull og omfattende kartlegging av berget i det aktuelle området. I produksjonsprosesser vil dette bli svært tidkrevende og kostbart, og optimaliseringen baseres i større grad på erfaringer fra tidligere salver på samme prosjekt.

Under arbeid med litteratursøk er det også viktig å være kritisk til kildene. I forbindelse med litteraturstudiet ble det også skrevet en forberedende oppgave om litteratursøk, med formål å reflektere over søkemetoder og kildekritikk. Kildene i litteratursøket er vurdert etter T-O-N-E-prinsippet (NTNU, n.d.). Her vurderes artikkelens troverdighet, objektivitet, nøyaktighet og egnethet, og alle disse vurderingen vil til sammen utgjøre artikkelens totale relevans. Litteratursøket førte også til oppdagelser av forfattere og institusjoner med stor relevans til temaet i oppgaven.

3.3.2. Intervju

Det har vært foretatt relativt mange samtaler med ulike personer, og som nevnt var oppstartsfasen preget av intervjuer med åpne spørsmål, for å beholde muligheten for å komme inn på temaer utenfor de forhåndsdefinerte spørsmålene. På den positive siden var det flere interessante temaområder som dukket opp, men det ble også flere avsporinger som ikke var like relevante for oppgavens tema.

Med representanter med ulik bakgrunn og fra ulike arbeidsområder ble oppgavens tema belyst fra de ulike involverte parters ståsted, for eksempel ble byggherrens syn belyst via samtaler med representanter fra to av Norges største landbaserte byggherre, Statens Vegvesen og Nye Veier. Disse har et stort fokus på HMS og ytre miljø, men har også stor erfaring innenfor faget og bransjen generelt, fra deltagelse i et stort antall prosjekter med ulike involverte entreprenører og prosjekter av alle størrelser. Sprengningsarbeidere og leverandører har gode kjennskaper til bruken av systemene, og spesielt førstnevnte har god erfaring ved daglig bruk.

Fordi ulike personer har ulike oppfatninger og erfaringer er det viktig å huske på at det her kan medføre at subjektive meninger kommer frem. Eksempelvis kan en skytebas med liten erfaring med ett av systemene medføre en ekstra positivitet til systemet de har god kjennskap til. Det er derfor viktig å ha et nyansert forhold til mulige subjektive oppfattelser, og validere dette mot andre kilder for et nøytralt perspektiv. Et annet eksempel er muligheten for at leverandørene har et økonomisk insentiv til å fremme ett system i forhold til et annet, på grunn av høyere fortjenestemargin.

Intervjuene ble med samtykke, og i den grad det lot seg gjøre, dokumentert i form av lydopptak. Det førte til at samtalen flyter bedre, da mindre fokus går med til å notere underveis. Det gav større mulighet til å stille oppfølgingsspørsmål, samt mulighet til å gå tilbake å høre uttalelser om igjen, noe som eliminerer fenomenet med selektiv hukommelse.

3.3.3. Deltagende observasjon

Deltagende observasjon i en slik type oppgave er svært lærerikt, fordi det gir muligheten til å studere systemene nøye, og stille spørsmål underveis ettersom ulike situasjoner dukket opp. Ved å selv delta er det også i mange tilfeller enklere å legge merke til utfordringer og detaljer som ellers ville blitt oversett. En utfordring med deltagende observasjon i langtekkelige prosesser utendørs i støyende omgivelser, er at spørsmål og informasjon gitt underveis er vanskelig å dokumentere. Støy fra anleggsmaskiner, såkalt ytre støy, kan medføre tap av

budskap underveis. Nødvendigheten for rekonstruksjon av informasjon i ettertid kan medføre at deler av utsendt budskap er glemt eller mistolket, kalt indre støy. Informasjonen i disse tilfellene er derfor nødvendig å være kritisk til, og det var viktig å dokumentere viktige funn i form av notater, foto eller film som kan studeres i ettertid. Det var derfor nødvendig å kartlegge hvilke prosesser som var viktige å få dokumentert, da dette ikke lar seg gjenskape i ettertid.

En utfordring som oppstod i forbindelse med å gjøre observasjoner i felt, var at dette ble gjort på eget initiativ uten tilgjengelig utstyr. For undersøkelser rundt elektroniske tennsystemer i dagen var det få problemer, på grunn av den intensive driften og kontakten med BMHE på Rugtvedt-Dørdal. For observasjoner av ikke-elektriske tennere var det derimot litt mer komplisert, fordi BMHE ikke hadde noen prosjekter med ikke-elektriske tennere i området. Det var derfor nødvendig å oppsøke andre prosjekter, noe som var problematisk på eget initiativ. Det ble derfor ikke anledning til å gjøre målinger under samme forhold. Det burde også vært foretatt flere observasjoner for å kunne gi et bedre bilde over gjennomsnitt, men på grunn av vanskelighetene med å finne prosjekter ble dette ikke gjort. Deltagende observasjoner er også tidkrevende, og tilgjengelig tid begrenser dermed muligheten for å samle inn store mengder data med denne typen metode.

3.3.4. Kvantitative data

For sammenlikning av innkjøpskostnader er det fra BMHE mottatt en priskalkyle på et prosjekt med et beregnet uttak av 3 500 000fm3. Denne kalkylen er basert på BMHEs erfaringstall fra liknende prosjekter, og på den måten ansees mengdeberegningene relativt realistiske. Entreprenørene går i forhandling med ulike leverandører hvor de forhandler priser for leveranser til slike prosjekter, og avhengig av avtalene vil dermed prisene kunne variere noe. For å ikke blottlegge BMHEs avtaler med leverandører, er kostnadene for innkjøp av tennmidler basert på listepriser fra Orica. For en sammenlikning av prisdifferanse ansees det likevel som tilstrekkelig.

For å forsøke å finne statistiske forskjeller på de to tennersystemene når det kommer til sikkerhet ved bruk, både med tanke på feilkilde, alvorlighetsgrad og hyppighet på opptreden, ble det samlet inn RUH fra BMHE og DSBs arkiv. Disse rapportene er relativt lite beskrivende, og årsaken til hendelsen er vanskelig å tyde. På grunn av et relativt stort antall ulike hendelser fordelt på et mindre antall rapporter, måtte kategoriene gjøres nokså generelle. De gir heller ikke et fullgodt resultat, da en ekstra hendelse slår kraftig ut på statistikken.

I de senere år har det blitt et større fokus på å rapportere om uønskede hendelser, og antallet RUH var derfor begrenset til kun de siste års aktivitet. DSB hadde kun registrert et lite antall rapporter med elektroniske tennsystemer. I BMHEs arkiv var det kun rapporter fra deres egne prosjekter, og det totale grunnlaget er derfor lite. DSB hadde flere rapporter med ikke-elektriske tennsystemer, men det var for tidkrevende for DSBs representant å eksportere disse rapportene med deres datasystem. Dette medfører en skjev fordeling i rapporter, med et overtall av elektroniske tennere, hvor de fleste er hentet fra BMHEs arkiv. Med et såpass lite antall rapporter kan et lite antall hendelser slå sterkt ut på fremstillingen av funn, og ideelt sett burde det vært gått gjennom et større antall rapporter for et mer pålitelig resultat.

3.4. Oppsummering av metode

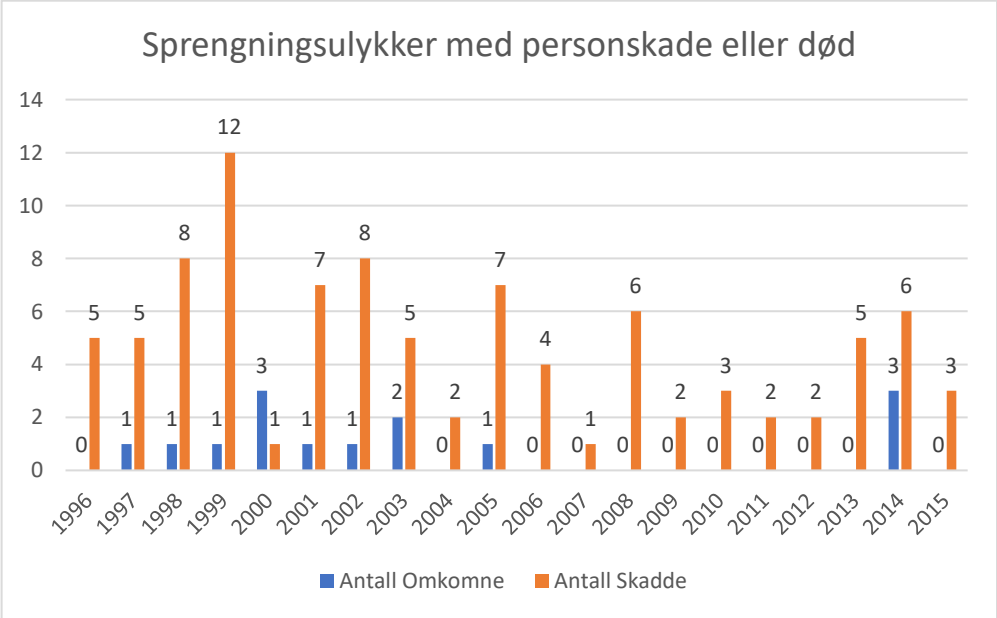
Eksplorerende design er en lærerik metode ved fagområder der man ikke har tilstrekkelig kunnskap fra før, men har en ulempe ved at det i mange tilfeller dukker opp nye spørsmål sent i prosessen, som gjør det nødvendig å gå tilbake å gjøre nye observasjoner eller innhente ny informasjon via intervju.

For omfattende bruk av intervju og samtaler kan farge det totale inntrykket fra holdningen hos flertallet av kilder med forutinntatte preferanser, som gjennomgående kan prege informasjonen i favør av deres foretrukne system. For å validere samtaler kan det være aktuelt å sjekke påstander opp mot kvantitative data, men med vanskelig kvantifiserbare tema og dårlige grunnlagsdata var dette i mange tilfeller ikke enkelt. Eksempel på en slik situasjon var antall forsagere, hvor det ble lagt merke til at de som arbeidet med å forbedre sikkerheten i det hele var mer positive til elektroniske tennsystemer og sikkerhetsfunksjonene de har. Sprengningsarbeiderne var i større grad positive til ikke-elektriske systemer fordi de er enklere å jobbe med, og at forsagere med ikke-elektriske systemer ikke var så stort problem som det er gitt utrykk for. Det ble dermed innhentet kvantitative data for å se på forskjellen i registrerte forsagere, men på grunn av dårlig datagrunnlag ble det stor usikkerhet i resultatene i disse og liknende utførte statistiske sammenlikninger.

Det var en gjennomgående utfordring med innhenting av kvantifiserbare resultater, som kostnader ved forsager og mulige kostnadsbesparelser på grunn av bedre salveresultat. Dette er svært situasjonsavhengig, og derfor vanskelig å sammenlikne fra prosjekt til prosjekt. Dessuten er slike resultater i flere tilfeller noe entreprenørene selv ikke fokuserer på i noen stor grad, og det ble dermed nødvendig å heller basere seg på for eksempel sprengningsarbeidernes erfaringer fra tidligere arbeider. Dette gir en indikasjon på forskjeller, men gjør det ikke mulig å for eksempel gi et svar på i hvilken grad det påvirker produktiviteten eller økonomien.

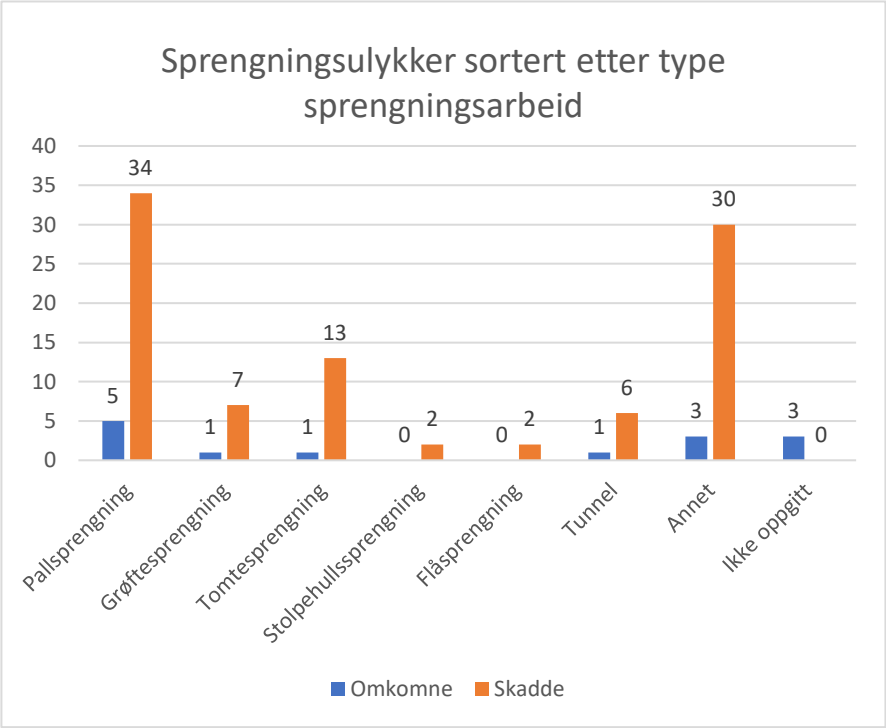
4. Sikkerhet

Arbeid og håndtering av sprengstoff er risikabelt, og det stilles derfor strenge krav til dette. Blant annet inneholder eksplosivforskriften viktige regler for sivil håndtering av eksplosjonsfarlige stoffer. Eksplosivforskriften er utarbeidet av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, DSB. Eksempelvis er det ved sprengningsarbeider krav til at utførende skal utarbeide en skriftlig sprengningsplan, som blant annet beskriver hvordan risikomomenter skal behandles for å ivareta sikkerheten. I tillegg definerer eksplosivforskriften involverte parters ansvarsområder.



Figur 17 - Diagram viser oversikt over skadde og omkomne som følger av sprengningsulykker fra 1996-2015 Kilde:DSB, n.d.

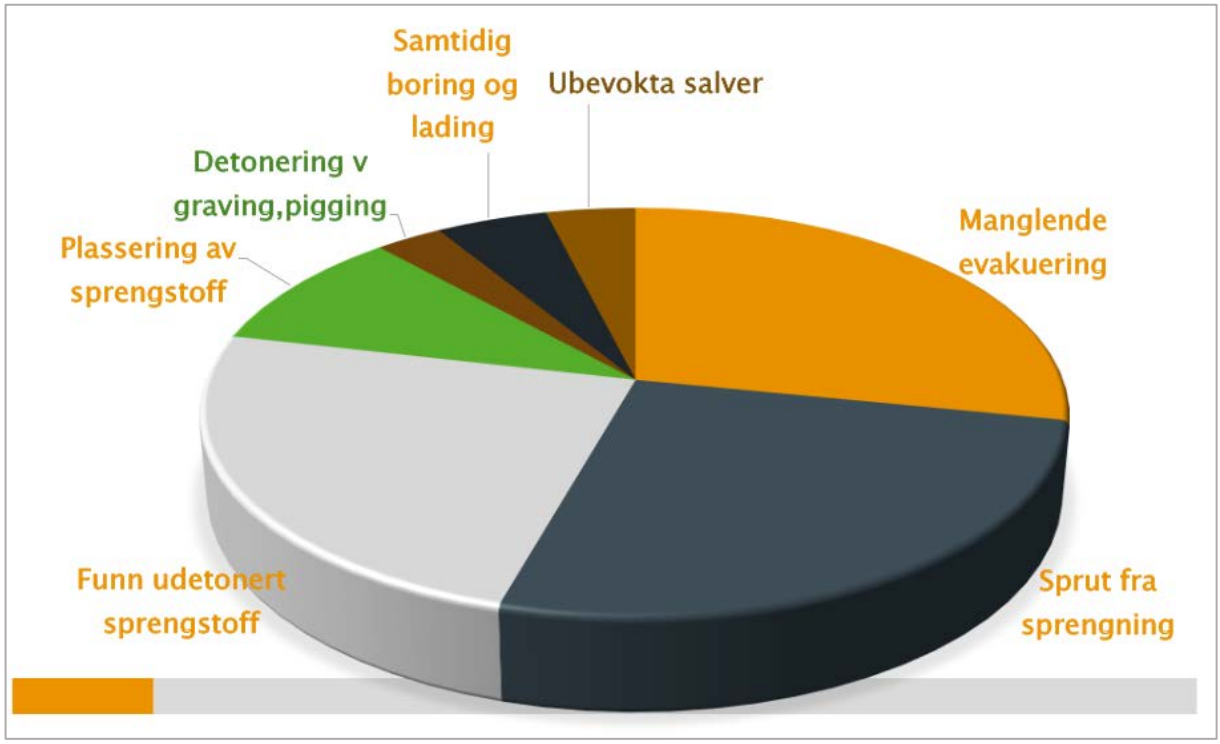
I Figur 17 vises registrerte skadde og omkomne i DSBs register, som følge av sprengningsulykker i Norge. DSB påpeker også at de fleste sprengstoffulykker skjer i sammenheng med pallsprengning, som vist i Figur 18. Som følge av mer tilregnelig utstyr, men også det store fokuset på arbeidssikkerhet, har det i senere år vært en nedgående trend i antall ulykker med personskader (DSB, n.d.). Likevel er ikke nullvisjonen oppfylt.



Figur 18 - Fremstilling av DSBs registrerte sprengningsulykker med personskader etter type sprengningsarbeid, i perioden 1996-2015.Kilde: DSB.no

En av årsakene til flere uhell er udetonert sprengstoff som blir liggende i røysa eller som står igjen i for eksempel en forskjæring etter tidligere salver. Her er det fortrinnsvis patronert sprengstoff eller detonerende lunte som ofte er kritisk, da disse er sensitive for slagenergi, og kan detonere ukontrollert for eksempel under lasting eller pigging (BfF, 2017). I februar 2016 omkom en gravemaskinfører i en sprengstoffulykke på arbeidet med en tunnel på E16-prosjektet i Bagn. Det ble konkludert med at graveren var i gang med å renske tunnelveggen etter en salve, og kom borti gjenstående sprengstoff i tunnelveggen med slaghammeren (Statens Vegvesen, 2016a). Sprengstoffet detonerte, og føreren av graveren ble truffet av steinsprut.

4.1. Gjenstående sprengstoff



Figur 19 - Uønskede hendelser under sprengning med potensiell dødsulykke som utfall. Totalt 103 registrerte hendelser i 2015 Kilde: Fagerheim, 2016

Forsagere er et av de mest omtalte fareaspektene ved sprengningsarbeider, og de er i mange tilfeller vanskelig å oppdage før det blir gjort funn av intakt sprengstoff. Ulykkene med uomsatt sprengstoff skyldes derfor i stor grad at det bores, pigges eller graves borti uomsatt sprengstoff, og at dette detonerer uten at området er evakuert.

Sprengstoff har høy eksplosjonsenergi, og avgir mye energi over en veldig begrenset tidsperiode, og kan gjøre stor skade på omgivelsene. Lufttrykket fra detonasjonen vil kunne gjøre store skader i seg selv, men det vil også kunne gi i sprut av løse gjenstander, da spesielt bergfragmenter, slik som i ulykken i Bagn.

Tennerens påvirkning på uomsatt sprengstoff er i de fleste tilfeller grunnet enten produktfeil eller brukerfeil (Fagerheim and Neby, 2018). Med brukerfeil menes ikke direkte forsømmelse av utførende, men feil som kunne vært unngått ved å utføre prosessen annerledes.

4.1.1. Produktfeil

Tennerne som er riktig koblet og plassert, men som ikke detonerer ved avfyring kan ha produktfeil. Dette er produsentens feil, og kan opptre i større eller mindre grad. Eksempelvis leverte en produsent et parti elektroniske tennere med for stor avstand mellom tennhodet og tennsatsen, slik at tenneren virket som vanlig, bortsett fra at tennsatsen ikke lot seg initiere (Isdahl, 2018a). Slike produktfeil kan skje med alle typer tennersystemer, men det er relativt sjeldent det påvises produktfeil på tennere som blir sendt til analyse ved feil (Morstad, 2018). Det er heller ikke påvist noen tydelig indikasjon på at ett produkt har flere tilfeller av produksjonsfeil enn andre. På Rugtvedt-Dørdal har det vært brukt over 70 000 elektroniske tennere, og det er kjent ett eller to tilfeller av tennere med sannsynlig produktfeil (Kvilten, 2018).

4.1.2. Brukerfeil

De aller fleste tilfellene der sprengstoff står igjen etter avfyring skyldes brukerfeil og slurvearbeid, og vil kunne forekomme uavhengig av type tennsystem (Fagerheim and Neby, 2018). Det kan enten være snakk om feil plassering av tenneren i ladestrengen, feil forsinkertid eller dårlig eller slurvete koblingsarbeid.

For å sikre best mulig opptenning av hele ladestrengen er det mest optimalt å plassere tenneren nederst i borhullet (Fagerheim and Neby, 2018). Likevel blir det sett flere avvik som skyldes at tenneren plasseres høyt i borhullet. I mange tilfeller er grunnen sannsynligvis at det er enklere og billigere med kortere tennere, men også at det er en snarvei dersom borhullene er lengre enn ventet, og at tenneren plasseres høyere i borhullet istedenfor å skaffe tennere med riktig lengde. Dette kan gi i brudd i propageringen av detonasjonen nedover fra tennerens plassering, og vil på denne måten resultere i uomsatt sprengstoff. I Vegvesenets prosjekter er dette problemet større på prosjekter med lav enhetspris på sprengningsarbeider, enn om entreprenøren får godt betalt (Fagerheim and Neby, 2018). Dette er et problem som gjelder alle de ulike tennsystemene.

Også tidspress er av flere nevnt som en av de største årsakene til forsagere. Det kan gå utover konsentrasjonen og strukturen under kobling og nødvendig kontroll før skyting. Ett sannsynlig scenario er feil under kobling av koblingblokker, og som kan resultere i at ett eller flere hull ikke er koblet til resten av salva.

4.1.3. Brudd på ladestreng

Ved avfyring av større salver, både i tunnel og i dagen, er det vanlig å spre tennernes detonasjonstidspunkt, for eksempel for å minske enhetsladningen og dermed vibrasjoner, eller ved rastvis detonasjon av pallsprengning. På grunn av variansen fra nominell forsinkertid ved bruk av pyrotekniske eller elektriske tennere, må forsinkertiden mellom intervallene være lange. Eksempelvis kan en tunnelsalve bestå av 150 hull som detonerer med en varighet på 6-10 sekunder (Fagerheim and Neby, 2018). Problemet oppstår når noe berg har begynt å flytte seg, mens noe fortsatt står stille. Her vil man kunne risikere at en detonasjon i et borhull river løs deler av et hull på et senere intervall, og ladestrengen på et borhull ved siden av som enda ikke har detonert. Sprengstoffet utenfor bruddet har da ikke kontakt med tenneren. Elektroniske tennere har ikke den samme variansen på lengre forsinkertider, og på salver med mange intervaller kan de seneste intervallene kortes ned, uten at en risikerer overlapp av detonasjoner. Dermed vil det ta kortere tid å detonere alle hullene, og det blir mindre tid til store bevegelser av blokker. Dermed blir risikoen for å skape totalt brudd ladestrengen mindre, og vil kunne resultere i færre tilfeller av uomsatt sprengstoff.

4.1.4. Brudd på skyteledning, tennebrudd

En annen vanlig årsak til gjenstående sprengstoff er brudd på skyteledningen eller sjokkslangen, eller tennebrudd. Dette kan gi brudd på en eller flere tennere, og er spesielt aktuelt dersom det brukes ikke-målbart tennersystem ved tung overdekking (Fagerheim and Neby, 2018). Mattene kan påføre stor mekanisk påkjenning på slanger og ledninger, og kan resultere i at ledningen eller slangens evne til å overføre impuls svekkes delvis eller totalt. Ved bruk av målbare systemer kan det etter overdekking kontrolleres om koblingskretsen fortsatt er intakt, men for ikke-målbare systemer er dette ikke mulig.

Ved tennebrudd og mange gjenstående hull, er det ofte at gjenstående hull blir koblet på nytt og skutt. I februar 2003 ble det skutt en pilsalve i Namsos i forbindelse med et tunnelpåhugg, med ikke-elektriske tennere og overdekking, hvor en person omkom og tre personer skadet på grunn av sprut (Neby, 2005). Under opprydningsarbeidet to uker senere ble gjenstående hull

koblet på og skutt på nytt, og resulterte i store mengder sprut. Det er antatt at sprengstoffmengde i gjenstående hull var for stor i forhold til mengde gjenstående berg, og viser at det også innebærer risiko å måtte koble på og skyte pilsalver om igjen.

4.1.5. Tennsystemenes sikkerhet mot forsagere

Ikke-elektriske tennsystemers største ulempe i forhold til elektriske og elektroniske systemer, er at det ikke kan måles. Foruten visuell kontroll av koblet salve er det ingen måte en kan oppdage feil på systemet. Dersom det skulle bli brudd på sjokkslanger etter dekking eller nede i borhullet, for eksempel ved at en bevegelse av berget har forårsaket en skade på ledningen, vil dette ikke være lett å oppdage for å gjøre tiltak. Etter salven er skutt er det ikke i alle tilfeller lett å oppdage forsagere før det blir gjort funn av sprengstoff, intakte tennere eller koblingsblokker. Det er flere eksempler på funn av udetonert sprengstoff under utlasting, og som potensielt kan utgjøre en fare for arbeiderene i området. I BMHEs database er det seks rapporter der fjellborer eller gravemaskinfører har oppdaget gjenstående sprengstoff der ikke-elektrisk tennsystem er benyttet.

Ved bruk av målbare systemer vil det være mulighet til å på forhånd finne ut av om en tenner er skadet eller mangler fra koblet krets. Elektroniske tennere har et meget godt system for å sikre kontakt med alle tennere. En tenner må bli oversett i to påfølgende arbeidsprosesser for at systemet ikke gi en feilmelding om en manglende tenner (Morstad, 2018). Den første prosessen er der alle tennerne blir scannet og tildelt en forsinkertid samt lagret i en liste over alle scannede tennere i denne salven, hvor det under testingen sjekkes kontakt med alle tennere på listen. Den andre prosessen er koblingsarbeidet, hvor en det vil bli gitt feilmelding ved tilkobling av en tenner som ikke er scannet og tildelt forsinkertid. Dersom det bare brukes en tenner i hvert borhull vil det også være mulig å fange opp manglende tennere ved å sammenlikne antall registrerte tennere med borplanen, som angir antall borhull i salven (Venåsen, 2018).

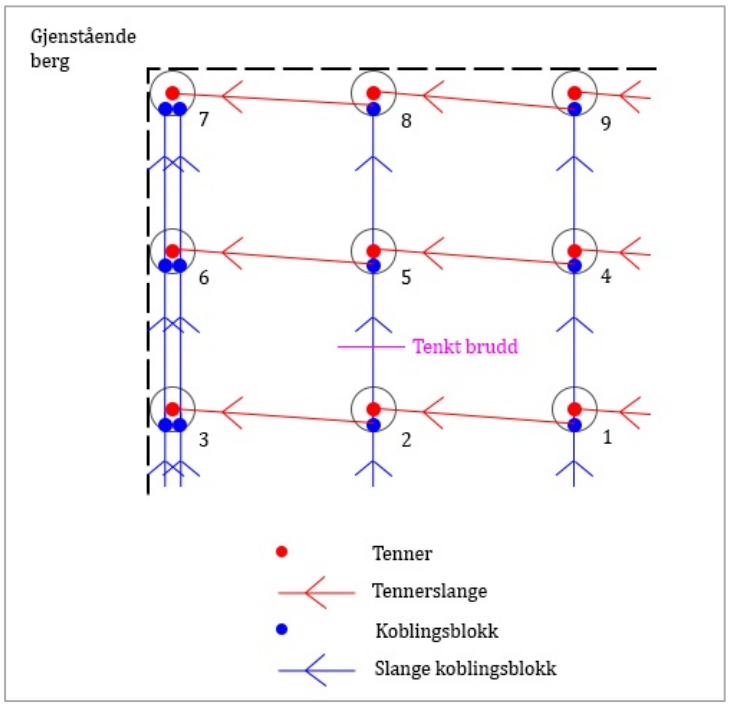
Dersom en elektronisk tenner blir skadet etter den er plassert i borhull, vil også dette gi feilmelding under testing, og hullet kan blåses opp og tenner byttes. I noen tilfeller lar det seg ikke gjøre å få opp tenneren, og tenneren kan da bli koblet fra slik at salven blir skutt med visshet om at dette hullet ikke vil gå av. Koordinatfesting av dette hullet før skyting gjør at det under utlastingsarbeidet kan vises ekstra forsiktighet i området hvor dette hullet var. Dette gjør opprydningen tryggere og enklere, og plassering av gjenstående tenner og bunnladning

kan graves forsiktig ut (Kvilten, 2018). Uten koordinatfestet posisjon er det vanskeligere å finne igjen bunnladning og tenner.

4.1.6. Tiltak mot brudd med ikke-elektrisk tennsystem

Fordi ikke-elektriske tennsystemer ikke lar seg måle, er det i visse tilfeller ønskelig å gjøre ekstra tiltak for å sikre seg mot et brudd på tennslangen. Dette kan være spesielt dersom det arbeides nært vei eller bebyggelse, eller ved spesielt vanskelige salver der det er viktig med full opptenning (Brekke, 2017; Fagerheim and Neby, 2018). Det kan i disse tilfellene kobles doble, eller i noen tilfelle triple kretser for å sikre full opptenning. Eksempelvis er det ved utslagssalver under vann meget viktig at alle hullene går av, da det er vanskelig å gjøre utbedringer etter utslaget først er åpnet (Fagerheim and Neby, 2018). På slike arbeider er det i flere tilfeller koblet triple kretser for å sikre opptenning i alle hull.

Figur 20 viser en skisse av koblingsmåten på en del av pallsalven som i denne oppgaven ble observert for måling av tidsbruk for kobling av ikke-elektrisk tennsystem. I tidligere salver var det erfart at området bestod av lagdelt fjell med store slepper i retning nord-sør, med helling mot øst. På anleggsområdets vestre side ligger E6, og på grunn av sleppenes hellingsretning var sprut i retning av E6 et faremoment. For å forhindre dette var det derfor viktig å sørge for full opptenning for å unngå at det stod igjen berg som hindret utslag for raster lenger inn i salva. Det ble også dekket langs hele salvens bakkant.



Figur 20 – Skissert utsnitt av salve med doble kobingsblokker og sikring sidelengs. Pilene viser sjokkbølgens propageringsretning i slangene.

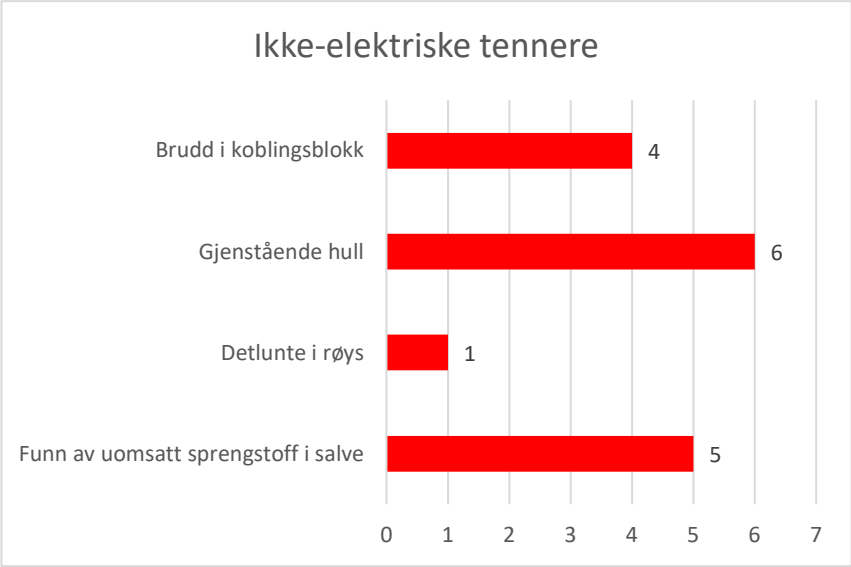
For å sikre for brudd grunnet overdekking ble det brukt doble koblingsblokker i områdene som skulle dekkes, noe som ikke er uvanlig (Brekke, 2017).

I tillegg ble det, på grunn av faren for sprut ved hindring av fritt utslag, sikret sidelengs. Dette er skissert med røde piler i Figur 20, og innebærer at tennslangen fra borhull i tillegg til å være koblet til koblingsblokken ved sitt borhull også ble dratt bort til og koblet til koblingsblokken i borhullet i raden nærmere salvens midtlinje. Dette medfører i praksis at dersom en koblingsblokk ikke detonerer, vil en annen koblingsblokk likevel sørge for opptenning. Dersom det bare kobles bakover, vil et brudd i koblingsblokken til hull 5 i Figur 20 gjøre at hull 5 og 8 blir stående igjen, og det vil være større risiko for sprut fra hull 7 på grunn av større innspenning og eventuelle slepper. Ved å sikre sidelengs vil et brudd i koblingsblokken til hull 5 føre til at tenneren i hull 5 likevel får opptenning via hull 4. Denne metoden er ikke vanlig praksis, og vil komplisere koblingsprosessen, men kan være et siste ekstra tiltak for å unngå brudd.

4.2. Hendelser fra RUH

4.2.1. Ikke-elektriske tennere, fra BMHE

Fra samme database er det hentet ut rapporter fra BMHEs prosjekter der det benyttes ikke-elektriske tennere. Rapportene er hentet fra arbeidene med E6 Helgeland sør og Helgeland Nord.



Figur 21 - Fremstilling av BMHEs registrerte RUH med bruk av ikke-elektriske tennsystemer, sortert etter hendelsesområde

På prosjekter der det benyttes ikke-elektriske tennere er det gjenstående hull som har resultert I flest rapporter om uønskede hendelser. Rapportene er samlet inn fra to store og to mindre prosjekter. Det er:

- 6 rapporter om hull som står igjen med tenner og sprengstoff etter skyting, og løsningen har vært å enten koble på og skyte disse hullene om igjen eller blåse opp og fjerne sprengstoff.
- 5 rapporter om funn av uomsatt sprengstoff etter skyting, uten videre utdyping av årsak. I en av disse tilfellene gikk det en liten detonasjon under pigging.
- 4 rapporter om brudd i koblingsblokker, 3 tilfeller av 67ms koblingsblokk som ikke er detonert. I ett av tilfellene er det påpekt at koblingen er kontrollert fire ganger før skyting. Det fjerde tilfellet har tilleggskommentar «Vær nøye med renhold og rene kutt ved kapping».
- 1 rapport om funn av detonerende lunte i røys

På Helgeland-prosjektene, hvor rapportene er hentet fra, er det sprengt ut 1 653 400fm3, totalt 312 960 tennere fordelt på omtrent 1200 salver, på tidspunktet rapportene er hentet ut. Tabell 1 viser de ulike hendelsene fordelt på forbruket av tennere.

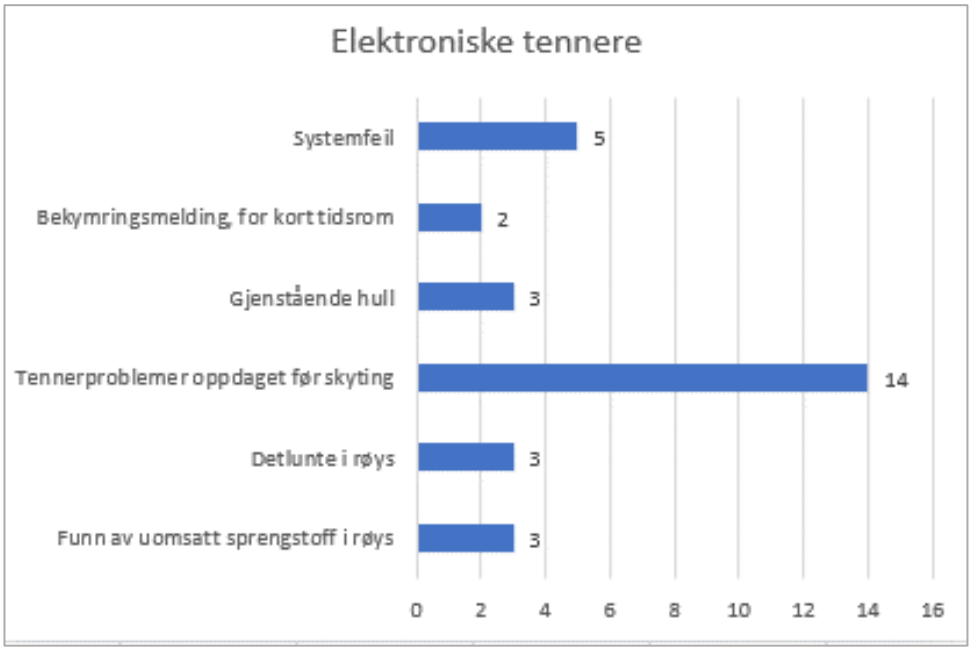
Tabell 1 - Antall hendelser sett i forhold til tennerforbruk, basert på RUH fra BMHE i prosjekter med ikke-elektriske tennere.

Hendelse	Antall hendelser	Antall pr. 10 000 tenner
Brudd i koblingsblokk	4	0,13
Gjenstående hull	7	0,22
Detlunte i røys	1	0,03
Funn av uomsatt sprengstoff i røys	5	0,16

En viktig merknad til dette datagrunnlaget er at totalt antall tennere også inkluderer tenneren i koblingsblokka (Venåsen, 2018). Det vil si at et borhull med en koblingsblokk og en tenner, vil telles som et forbruk av to tennere i denne statistikken. Det medfører at forbruket av tennere blir dobbelt så stort som antall borhull.

4.2.2. Elektroniske tennere, fra BMHE

I BMHEs interne database over RUH blir alle innrapporterte hendelser lagret etter hendelsesområde. På prosjektet Rugtvedt-Dørdal er det registrert 49 RUH innenfor hendelsesområdet boring og sprengning, hvor 16 av disse enten omhandler funn av udetonert sprengstoff eller problemer med tennsystemet. I tillegg er det registret 100 hendelser med boring sprengning fordelt på 9 av BMHEs andre prosjekter, hvor 36 av disse er kan ha sammenheng med tennsystemet.



Figur 22 – Fremstilling av BMHEs registrerte RUH med bruk av elektroniske tennere, sortert etter hendelsesområde

Det var tilsammen 31 rapporter fra prosjekter der det brukes elektroniske tennere fra to prosjekter, Rugtvedt-Dørdal og tunnelprosjektet KBT. For elektroniske tennere var den mest rapporterte hendelsen tennerfeil som ble oppdaget ved måling av koblet salve, før skyting. Spesielt i prosjektet Kjørholt-Bamble tunneler, KBT, var det et stort antall rapporter om feil ved tennere ved måling av koblet salve. I Figur 22 vises en fremstilling av disse, sortert etter hendelsesområde.

- 14 rapporter om feilmeldinger på tennere, hvor 8 av disse var i jordfeil og tre er beskrevet som feil eller brudd på skytterledning uten spesifisering av feilmelding. Det er i tillegg to rapporter om feil oppdaget under dekking og en feil på tenner. I kun ett av disse tilfellene lot feilen seg ikke rette før skyting, fordi hullet ikke lot seg blåse

opp. Hullet ble isteden koordinatfestet på forhånd, slik at opprydning av uomsatt sprengstoff er enklere i ettertid.

- 5 rapporter om systemfeil, som innebærer tekniske problemer på avfyringsmodulen, hvor det har vært nødvendig å enten bytte denne eller resette og laste inn tennere på nytt.
- 3 tilfeller av gjenstående hull, der den ene lot seg skyte på nytt, mens i de tre siste måtte sprengstoffet graves ut og fjernes kontrollert. En av disse gjelder KBT
- 3 tilfeller med funn av uomsatt sprengstoff i røysa etter skyting, hvor det i to av tilfellene er etter skyting av kontur.
- 3 tilfeller med funn av detonerende lunte, som også brukes i konturskyting.
- 2 bekymringsmeldinger om bruk av elektroniske tennere ved skyting langs trafikkert vei, fordi tidsrommet det er lov å stenge veien er for kort og fører til uforsvarlig tidspress.

På Rugtvedt – Dørdal, hvor de fleste rapportene er hentet fra, er det sprengt ut 2 269 932fm3, med et forbruk på 72 644 tennere, fordelt på 852 salver, på tidspunktet rapportene er hentet ut. I KBT ble det tatt ut ca 170 000fm3, med et forbruk på ca 60 000 elektroniske tennere.

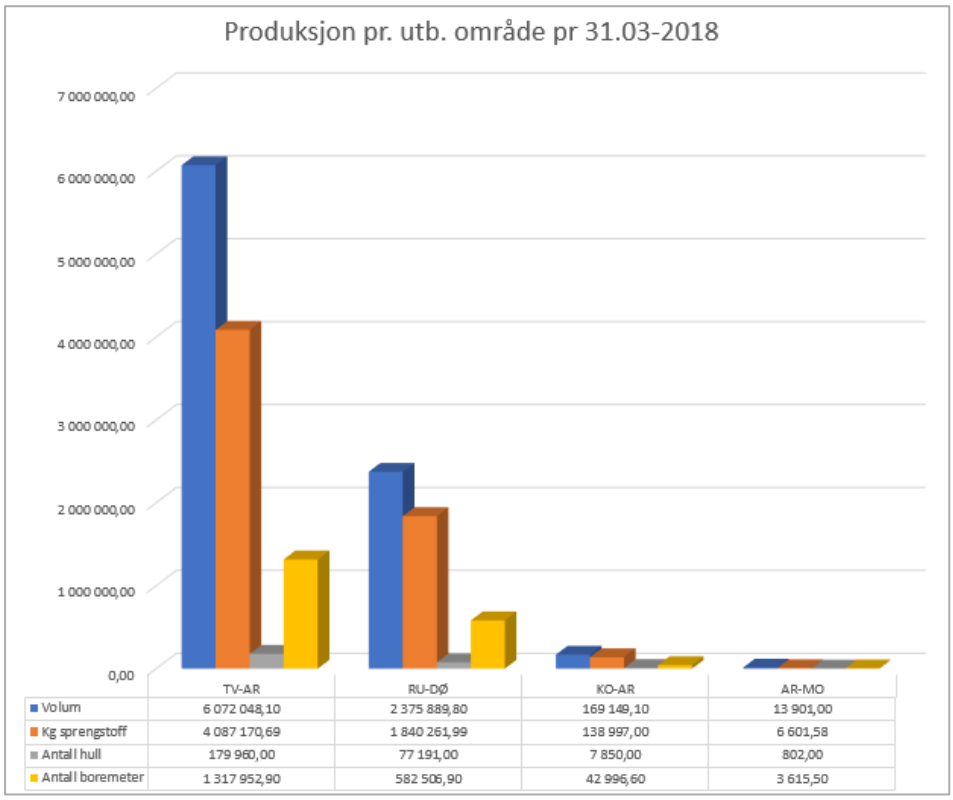
Fremstillingen av hendelser Figur 22 er basert på RUH fra Rugtvedt-Dørdal. Forsagere i tunnel er ikke registrert på samme måte, og i figur 21 er det beregnet slik at tennerforbruket på KBT ikke teller inn på statistikken for forsagere og gjenstående hull, og feltene i Tabell 2, markert med *, gjelder hendelser kun fordelt på forbruket av tennere på Rugtvedt-Dørdal.

Tabell 2 - Antall hendelser sett i forhold til tennerforbruk, basert på RUH fra BMHE i prosjekter med elektroniske tennere.

Hendelse	Antall hendelser	Antall i pr 10 000 tenner
Systemfeil	5	0,38
Gjenstående hull*	3	0,41
Tennerproblemer oppdaget før skyting	14	1,06
Detlunte i røys*	3	0,41
Funn av uomsatt sprengstoff i røys*	3	0,41

4.3. Nye Veiers statistikk over forsagere med elektroniske tennere

I forbindelse med Nye Veiers krav om elektriske tennere har byggherren også lagt inn krav om innrapportering av forsagere for føring av statistikk opp mot aktivitet. Nye Veiers første prosjekt er E18 Tvedestrand-Arendal, som ble påbegynt av AF Gruppen i mars 2017, og statistikken er derfor svært begrenset i tid. De tre andre prosjektene som er medberegnet i denne statistikken er E18 Rugtvedt-Dørdal, E6 Kolomoen-Arnkvern og E6 Arnkvern-Moelven. De nevnte E6-prosjektene hadde oppstart i henholdsvis august og november 2017, og har pr 31. mars 2018 hatt vesentlig mindre sprengningsaktivitet sammenliknet med prosjektene på E18 gjennom Telemark. Produksjonsvolum, sprengstofforbruk, bormeter og antall hull ved de fire prosjektene er presentert i Figur 24.



Figur 23 - Nye Veiers statistikk over forsagere og produksjonsmengde Kilde: Thor Kristian Hustveit, Nye Veier

Pr. 31. mars 2018 er det, på de fire prosjektene, tatt ut 8,63 millioner fm3, fordelt på 2 907 salver og 265 803 hull (Hustveit, 2018). Nøyaktige tall følger i Tabell 3.

Tabell 3 - Tall fra sprengningsaktivitet i Nye Veier. Kilde: Thor Kristian Hustveit, Nye Veier 2018

Beskrivelse	Totalproduksjon NV pr 31/03/2018
Volum tfm3	8 630 988
Bruk av sprengstoff i kg	6 073 031
Sprengstoff kg / tfm	0,70
Antall salver	2 907
Antall hull	265 803
Sum boremeter	1 947 072
Antall forsagere	54

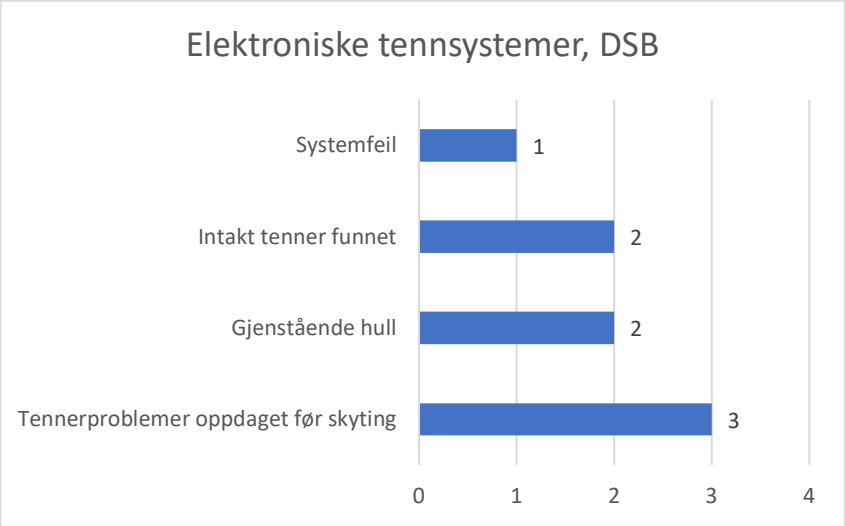
Av de 54 registrerte forsagerne, var flere av disse tilfeller der det ble målt feil på forhånd, og salven er skutt med visshet om at det vil bli forsager. Dermed kan det gjøres tiltak som posisjonsmerking av hull og forsiktig utgraving for å finne tilbake tenner og bunnlading. Tallet inkluderer også funn av detonerende lunte.

Som følger av statistikken mottatt av Nye Veier, er det, inkludert tilfellene der det var kjent på forhånd at det vil forekomme en forsager samt funn av detonerende lunte, registrert i snitt 2 forsagere pr. 10 000 tenner.

$$Forsagere = \frac{Antall\ forsagere}{Antall\ tennere} = \frac{54}{265803} * 10\ 000 = 2.03$$

4.4. DSBs rapporter over uønskede hendelser

I DSBs database over rapporter med uhell eller uønskede hendelser som følge av arbeid med sprengstoff, var det i 2016 og 2017 registrert åtte hendelser med elektroniske tennere. Rapportene DSB mottar er, i motsetning til entreprenørenes interne rapportsystem, i hovedsak bestående av de litt mer alvorlige hendelsene, som har eller kunne ført til person- eller materialskader (dsb.no, 2018). Den største delen av registrerte rapporter handlet om funn av udetonert sprengstoff fra tidligere entrepriser og anlegg (Isdahl, 2018b). Rapportene som omhandler bruk av elektroniske tennere er vist i Figur 23.



Figur 24 - Fremstilling av BMHEs registrerte RUH med bruk av elektroniske tennere, sortert etter hendelsesområde

Følgende 8 rapporter over uønskede hendelse med spesifisert bruk av elektroniske tennere er registrert:

- 3 rapporter om tennerproblemer oppdaget før skyting. En var feil på tenner i hull, som ble blåst opp og byttet. En var strømlekkasje, og den siste var feil/kortslutning på tenner. De to sistnevnte ble koblet av salva og innmålt før skyting, og det ble foretatt forsiktig utgraving.
- 2 om gjenstående hull etter skyting. Det ene tilfellet var en krets med 37 hull som stod igjen, uten kjent årsak. Det andre tilfellet var gravemaskinfører som fant gjenstående hull med tennerledning som stakk opp av hullet.

- 2 rapport om funn av patronert emulsjon under lasting. Tenneren viste fabrikkinnstillinger, og var derfor hverken scannet eller koblet med.
- 1 rapport om registrert forsager i salve, hvor intakt tenner uten ID ble funnet og sendt til produsent for analyse. Produsenten mener tenneren kan ha blitt skadet av detonasjon av nabohull.

Av rapportene i DSBs database over feil med elektroniske tennere er fem av åtte rapporter der feilene enten er oppdaget på forhånd, eller brukerfeil der tenner ikke er koblet inn. I de tre siste rapportene er det ukjent årsak til hendelsene.

4.5. Byggherres krav til elektroniske tennere

Det er ulike holdninger fra to av landets store byggherrer innen vegprosjekter, Statens Vegvesen og Nye Veier, når det kommer til krav om hvilken tennertype som kan anvendes. Nye Veier har satt krav om bruk av elektroniske tennere i alle deres prosjekter, blant annet Rugtvedt-Dørdal og Tvedestrand-Arendal, foruten tunnelarbeider i sistnevnte. Statens Vegvesen har på sin side tatt et standpunkt om at det er opp til entreprenøren å selv velge best egnet system.

Statens Vegvesen har, som følger av en evaluering i regi av Bransjeråd for Fjellsprengning, BfF og rapporten *Nullvisjonen, gjenstående sprengstoff-forsagere* (2017), valgt å ikke innføre kontraktfestet krav om bruk av elektroniske tennere. Bakgrunnen for rapporten utarbeidet av BfF var «*Hvordan unngå gjenstående sprengstoff og på den måten gjøre bransjen sikrere»*. Komiteen var sammensatt av representanter for vegdirektoratet, regionalt verneombud, flere entreprenører og Orica som representant for sprengstoffleverandørene. I korte trekk ble det konkludert med at elektroniske tennere vil kunne redusere omfanget av gjenstående sprengstoff, på grunn av at systemet lar seg måle, men det utelukkes ikke at både elektriske og ikke-elektriske systemer kan være riktig valg i mange tilfeller.

I et rundskriv fra Statens Vegvesens byggherreseksjon (2017) begrunnes videre deres beslutning om fritt valg av tennersystem i eksplosivforskriften. Nøyaktig henvisning til bestemmelser i forskriften er ikke spesifisert, men det antas at §83 (3) er essensiell, og lyder som følger: «Dersom virksomheten som får utført sprengningsarbeidet gir føringer for hvordan arbeidet skal utføres, skal den dokumentere at den har tilstrekkelig kompetanse til å gi føringer som ivaretar kravene til en sikkerhetsmessig forsvarlig gjennomføring av sprengningsarbeidet.» (lovdata.no, 2018, para. 84 (3)). Denne er tolket slik at det er bergsprenger og bergsprengningsleders ansvar å velge riktig produkt for oppgaven (Fagerheim and Neby, 2018). I rundskrivet påpekes det at det i eksplosivforskriften er tydelig beskrevet at føringer for produktvalg kreves dokumentert kompetanse for å sørge for at sikkerheten blir ivaretatt under gjennomføring av arbeidet. Valg av tennertype inngår i utarbeidelse av sprengningsplanen, og det påpekes at Statens Vegvesen ikke i alle tilfeller kan oppfylle det kompetansekravet som kreves i utarbeidelse av denne, og derfor heller ikke kan pålegge krav: «Dersom Statens Vegvesen lager bestemmelser eller mekanismer i kontrakten som legger føringer i valg av tennertype, tar byggherren dermed over ansvar for arbeider som

bergsprenger og bergsprengningsleder skal gjøre, men uten å ha kompetanse til dette på det aktuelle nivået.» (Sandvin, 2017, pt. 3).

Istedenfor å ilegge utførende krav om tennertype, legger Statens Vegvesen føringer som kanskje vil gjøre det enklere for entreprenøren selv å velge elektroniske tennere fremfor de to andre typene. I pågående arbeid med revidering av Prosesskode 1 er det eksempelvis lagt til et nytt punkt under hovedprosess 2, prosess 22, som omhandler sprengning i dagen. I utkastet til den reviderte versjonen er det lagt til i prosess 22 b): «Der det brukes ikke-målbart tennsystem, skal salveplanens dekningsplan angi spesifikke tiltak for å unngå brudd i koblinger.». Denne dekningsplanen er relativt tidkrevende å utarbeide, og målet med endringen av prosessen er å redusere risikoen for koblingsbrudd enten ved at entreprenøren velger målbare tennere eller viser til spesifikke tiltak ved bruk av ikke-elektriske systemer (Fagerheim and Neby, 2018).

Nye Veier derimot satt krav til bruk av elektroniske tennere på alle sine prosjekter, delvis foruten deres første prosjekt, Tvedestrand-Arendal, hvor bestemmelsen ikke var tatt med fra begynnelsen av for arbeid under jord (Hustveit, 2018). Begrunnelsen for kravet om bruk av elektroniske tennere er at det pr. i dag ikke tilbys alternative tennmidler med tilsvarende eller bedre tekniske egenskaper og sikkerhetsfunksjoner. Dette kravet er et virkemiddel for å oppnå målet om null skadde i deres prosjekter.

4.6. Utilsiktet detonasjon og sivile funn av tennere

Det finnes eksempler på episoder der sprengstoff og tennere ligger gjenglemt etter anleggsarbeider, spesielt fra tidligere da det ikke var like strenge rutiner og oppfølging på entreprenørenes behandling av eksplosive varer. Teknisk ukeblad (2013) rapporterer eksempelvis om et funn av elektriske klasse 1-tennere og dynamitt funnet nedgravd etter arbeidet med en trafo-stasjon i 1974. Etter disse funnene ble arbeidet i området øyeblikkelig stanset, og det ble søk med hunder og utgraving med fjernstyrte gravemaskiner for å klarere området. I dette tilfellet var det risiko for uhell på grunn av gruppe 1-tennernes sensitivitet mot elektriske forstyrrelser, og nærheten til en stor trafostasjon.

Koblingsblokker i ikke-elektriske tennsystemer er utstyrt med en liten tenner, og ligger eksponert utenfor borhullene. Disse er sensitive for slag og støt, og kan i teorien detonere om de blir overkjørt eller utsatt for andre store mekaniske påkjenninger, for eksempel ved arbeid med overdekking eller når det graves i en salve med forsager (Brekke, 2017). I praksis er det ikke funnet eksempler der koblingsblokker har detonert ukontrollert før skyting.

Elektriske og ikke-elektriske tennere er relativt enkle å starte på improviserte måter. Elektriske tennere kan for eksempel startes ved å koble til batterier og kondensator med tilstrekkelig spenning og strømmengde (Morstad, 2018). For ikke-elektriske tennere kan det tenkes at energien i for eksempel kraftige kinaputter eller fyrverkeri kan være kraftig nok til å starte en detonasjon i sjokktubeslangen.

Elektroniske tennere krever på sin side elektrisitet for å lade den innebygde kondensatoren, i tillegg til beskjed fra avfyringsmodulen i form av digitale signaler, for å detonere (Morstad, 2018).

4.7. Sprengningsarbeidernes meninger

Noen av de som har mest erfaring med bruken av tennsystemene er sprengningsarbeiderne, da spesielt skytebaser som har ansvaret for den praktiske gjennomføringen av sprengningen. Det generelle inntrykket gitt av skytebasene var at ikke-elektriske tennsystemer i de fleste tilfeller gjør jobben på en effektiv og enkel måte. Det elektroniske systemet er noe mer plundrete, og at det i enkle salver med få faremomenter, som ute i linja på Rugtvedt-Dørdal, kunne vært brukt ikke-elektriske tennere.

Den største grunnen til ønsket overgang fra ikke-elektriske tennere begrunnes i at systemet ikke lar seg måle, og at opplevelser med pilsalver kan oppleves ubehagelig, og i noen tilfeller kan føre til etterforskning av årsak og mulig skyldspørsmål. Som ansvarlig for at sikkerheten ivaretas ved skyting, er det ubehagelig å arbeide med systemer en ikke kan føle seg helt trygg på, og i mange tilfeller blir det gjort ekstra tiltak som doble koblingsblokker for å sikre seg mot brudd. At elektroniske tennere kan måles før skyting er derfor sett på som en svært positiv egenskap som savnes ved ikke-elektriske systemer, spesielt ved litt utfordrende forhold og ved dekking.

Det er også observert en skepsis til elektroniske tennere blant sprengningsarbeidere med liten eller ingen erfaring med systemet, spesielt er det en oppfattelse om at systemet er komplisert å lære seg og bruke. På Rugtvedt-Dørdal-prosjektet var det også en viss skepsis blant arbeiderne før overgangen fra ikke-elektriske til det elektroniske systemet, men etter at de lærte systemet å kjenne og fikk inn arbeidsrutinene, ble overgangen likevel godt mottatt av flere av arbeiderne. Dersom de selv fikk velge fritt mellom de to systemene, var det flere som nå helst ville valgt elektronikk, på grunn av sikkerheten om at alle tennerne er med når det trykkes av.

Arbeiderne på prosjektet Rugtvedt-Dørdal, som nå har jobbet med elektroniske tennere i omkring et år, har likevel opplevd at det står igjen tennere, men ved å på forhånd ha målt kontakt med tennerne påpekes det at produktfeil kan være mulig årsak i disse tilfellene (Kvilten, 2018).

Under drivingen av KBT ble det erfart problemer med isolasjonsbrudd på elektroniske tennere, og det er gitt flere meldinger om at det var et ønske fra arbeidere om å gå tilbake til ikke-elektriske tennere ved tunnelarbeider.

5. Tidsbruk

For å opprettholde produksjonen på høyest mulig nivå og utnytte tilgjengelig ressurser er det entreprenørens ønske at syklusen med boring, sprengning og lasting er så kontinuerlig som mulig. Dette kapittelet tar for seg tidsbruk for de ulike prosessene fra ferdig boring til salven er klar for skyting.

5.1. Tidsbruk for kobling av salve

En av de positive egenskapene med ikke-elektriske tennsystemer er at det er veldig enkelt å koble, noe som gjør tidsbruk for koblingsarbeid til en rask prosess. For å gi en indikasjon på forskjellen på de to systemene når det kommer til bruk av tid for å koble klar salven til skyting, er det gjort målinger av koblingsarbeidet ved med begge systemene.

5.1.1. Tidsbruk med ikke-elektrisk tennsystem

Salven der målingen for ikke-elektrisk tennsystem ble utført var en pallsalve på et tomtearbeid for Politiets Nasjonale Beredskapssenter. Salven var innspent på begge sider, med rastvis detonasjon mot fri flate og plogmønster, og i underkant av 4 000fm3. Bormønsteret var 2m*3m med 76mm borhulldiameter. Det var til sammen 106 hull, med dybde fra 3m i front til omkring 10m i bakkant, og områder med delvis vannfylte hull. Det ble benyttet Orica Exel-tennere, patronert bunnlading og slurry som pipelading. På 68 av de dypeste hullene ble det også benyttet topplading, på grunn av store slepper i området. Toppladning ble klargjort samtidig som bunnladningen. Klargjøring av toppladning innebar å plassere tenner i dynamittpølsa og slå knute. Arbeidet ble utført av en bergsprenger med en hjelpemann.

For å anslå hvor mye tid som gikk med til klargjøring av toppladning ble det gjort målinger av 10 hull med klargjøring av toppladning og 10 hull uten klargjøring av topplading. Det ble så observert at hullene med topplading er dypere, 8-10m, og til dels vannfylte. Hullene uten topplading var grunnere, 3-6m, og tørre, og at ladingen av vannfylte hull var vesentlig tregere. Det ble derfor gjort observasjoner av prosessen med kun å klargjøre toppladingen, som viste at dette tok omtrent 10 sekunder. Dette ble vurdert som et mer realistisk resultat, da det ikke inkluderte forskjellen i prosessen med å bunnlade vannfylte hull mot tørre hull. Med dette som utgangspunkt, er det regnet ut at klargjøring av topplading tok 11min og 20 sek. For de 68 hullene der det ble brukt topplading. Dette ble trukket fra den totale tiden for

koblingsarbeidet, for en bedre sammenlikning med salven med elektroniske tennere der det kun ble benyttet bunnlading.

Det ble også benyttet doble koblingsblokker i områdene der det skulle dekkes, i tillegg til sideveis sikring av tennere, som beskrevet i kapittel 4.1.6. Dette forbedrer sikkerheten for full opptenning, men kompliserte koblingsarbeidet.

Til slutt ble det foretatt visuell kontroll av bergsprenger. Visuell kontroll samt fordeling av koblingsblokker ble utført av bergsprenger alene, og hjelpemann var ikke med på denne delen. Tiden det tar vil derfor ikke forkortes med ekstra mannskap, og snitt-tiden vil derfor ikke bli regnet ut fordelt på mannskapsantallet. Resultatet er presentert i Tabell 4:

Tabell 4 - Tidsbruk for kobling av salve med ikke-elektriske tennere

Prosess	Tid totalt	Tid pr. hull	Arbeidsminutter pr. hull
Bunnlading	56m	31,7s	1m 3s
Fordele koblingsblokker	15m	8,5s	-
Koble salve	75m	42,5s	1m 25s
Visuell kontroll	15m	8,5s	-
Totall medgått arbeidstid			2m 45s

Tid pr. hull representerer tiden to arbeidere i snitt brukte for hvert borhull. Arbeidsminutter pr. hull er omregnet til arbeidsminutter pr. arbeider pr. hull, som vil si at der det tok to arbeidere 31,7 sekunder å koble ett hull, er det medgått ett minutt og 3 sekunder i arbeidstid pr hull, da arbeidet er målt tid for to arbeidere. Resultatet av tidsbruket, som kommer frem fra Tabell 4, viser at det for hvert borhull krevdes 2 minutter og 45 sekunders arbeidstid pr. borhull i denne salven.

Fordi den første salva med ikke-elektriske tennere var uvanlig omstendig koblet, ble det gjort målinger av en ny salve med ikke-elektriske tennere. Dette var en stor pallsalve på en industritomt på Nebbenes i Eidsvoll kommune. Det var 480 borhull i saksemønster, 8-10m dybde, og det ble koblet plogmønster med salvestart midt på stuff, som var anslagsvis 100m bred. Det ble kun målt tidsbruk for arbeidet med koblingsblokker, og det var skytebas og en hjelpemann som arbeidet med koblingsarbeidet. Salven ble for det meste koblet med to borhull til hver koblingsblokk, som vist i Figur 25. Dette gir en halvering av antall koblingsblokker, noe som gir spart tid ved kobling, men det kompliserte koblingsmønsteret der bormønsteret ikke var helt systematisk. Noe ekstra tid ble derfor brukt for å rette opp i detonasjonsmønsteret. Det anslås at dette omgjøringsarbeidet vil gi ekstra tidsbruk nært opp mot innspart tid på å koble to hull i samme blokk. Resultatene er presentert i Tabell 5, med samme metode som målinger av den forrige salva.

Tabell 5 - Tidsbruk for kobling av koblingsblokker på stor salve

Prosess	Tid totalt	Tid pr. hull	Arbeidsminutter pr. hull
Fordele koblingsblokker	30m	3,7s	3,7s
Koble salve	2t 30min	18,7s	37,5s
Visuell kontroll	20m	2,5s	-
Totall medgått arbeidstid			41s

Figur 25 - Ikke-elektrisk salve med to hull i hver koblingsblokk, Nebbenes 03/05/18

Denne målingen viser, antatt at bunnlading er tilsvarende som for den tidligere målingen, et snittbruk på 1 minutt og 44 sekunder pr. borhull i effektiv arbeidstid.

5.1.2. Tidsbruk med elektronisk tennsystem

Målingen ved bruk av elektroniske tennere ble utført på BHMEs prosjekt E18 Rugtvedt-Dørdal, og var en pallsalve i full bredde på 23m. Bormønsteret var 2*2m, med hulldybde mellom 15-20m. Det var tidligere blitt sprengt en pallhøyde, som gjorde overflaten ruglete med mye småstein i fordypinger etter utlasting av forrige pall og sprekkdannelser i salvens forkant. Totalt ble det målt tiden på klargjøring av 92 hull. Hullene hadde noe vann i bunn, anslagsvis en meter. Det ble ladet med bunnlading og slurry. Det var tilsammen fire personer med på arbeidet med bunnlading. Det var i tillegg arbeid med lading av kontur, men dette ble gjort av en egen mann, og er derfor ikke medregnet i tidsbruket. Målingen ble foretatt på samme måte som for ikke-elektriske tennere, hvor det hver for seg ble målt total tidsbruk for bunnlading, scanning, kobling, testing og overføring av data samt armering. Resultatene er presentert i Tabell 6.

Tabell 6 - Tidsbruk for kobling av salve med elektroniske tennere

Prosess	Tid totalt	Tid pr. hull	Arbeidstid pr. hull
Bunnlading (5 pers)	30m	20s	1m 40s
Scanne tennere	19m30s	12.7s	-
Koble salve	27m	17s	-
Testing	2m	1,3s	-
Overføring fra skanner	15s	-	-
Armering	1m 22s	0,9s	
Total medgått arbeidstid			2m 12s

I ettertid ble det koblet med fire ekstra hull, som på tidspunktet da målingene ble tatt ikke var ferdig boret. Skutt salve inneholdt derfor 96 hull, og tiden for overføring av scannerdata var 15 sekunder, og armering tok 1 minutt og 22 sekunder. Det er i tillegg noe arbeid med å koble sammen logger og avfyringsmodul før overføring, kobling av skytekabel og liknende, men dette ansees som lite tidkrevende i forhold til resten av prosessen, samtidig som det også vil være tilsvarende småarbeid med å koble lead-in line ved ikke-elektriske systemer.

På samme måte som fordeling av koblingsblokker og kontroll av ferdig koblet salve for det ikke-elektriske systemet, var scanning, testing, overføring av scannede tennere og armering oppgaver som ble gjort av en enkelt person, og ville ikke gått raskere ved flere arbeidere på en salve av denne størrelsen. Kobling av salven ble gjort av en person parallelt med at resten av laget ladet slurry.

Resultatene fra målingen viste at medgått tid pr. borhull totalt var 1 minutt og 52 sekunder.

Det ble observert at tennere over 9m lengde, som leveres på rull, gav større utfordringer enn tennere under 9m, som kommer buntet. Årsaken til dette var at plastrullen ikke går gjennom hullet i pluggen, og i borhull der det var mye løs stein og grus omkring pluggen, ble det nødvendig å bunnlade gjennom pluggen for å unngå småstein ned i borhullet. For å få vekk pluggen i disse tilfellene måtte enten hele tennerledningen rulles av for å fjerne plastrullen, som i mange tilfeller resulterte i ledningskluss der det var mye igjen på rullen. Et annet alternativ var å kappe ledningen og klipse to tennere med en koblingsblokk. Siste alternativ var å la pluggen bli stående under skyting. I sistnevnte alternativ opplevdes også at småstein tettet pluggens åpning under arbeidet med fordemming, som gjorde at fordemmingen ble mindre enn ønsket.

5.1.3. Tidsbruk i tunnel

Bruk av elektroniske tennere i tunnel vil gi mer tidkrevende koblingsprosedyre enn ved bruk av ikke-elektriske tennere med buntopptenning. I tunnel har man små tverrsnitt, korte salvelengder og mange borhull. Samtidig er tunneldrift lite fleksibelt, og det ønskes gjerne sykluser med korte opphold i lasting for å utnytte kapasiteten i lasteutstyret.

I kapittel 2.8.1 er det beskrevet en rapport som blant annet tok for seg tidsbruk av lading, utlasting og rensk under drivingen av Kjørholttunnelen. Med samtykke fra Petter Jensen i Hardrock Consult AS, som utformet rapporten, og Nye Veier som oppdragsgiver, er resultatene gjengitt i Tabell 7.

Tabell 7 - Resultater for observasjoner av tidsbruk for lading, utlasting og maskinrensk for elektroniske og ikke-elektriske tennere i tunnel Kilde: Hardrock Consult AS

Uke	Ladetid, min	Tid utlasting, min	Tid maskinrensk, min
Uke 45	110	100	72
Uke 46	136	119	94
Snitt elektroniske	123	109	83
Uke 47	76	92	57
Uke 48	75	91	71
Snitt ikke-elektriske	76	92	64
Differanse	63%	19%	30%

Med ikke-elektriske tennere som referansetid, tok det 63% ekstra tid å lade en salve med elektroniske tennere. Utlastingen hadde et ekstra tidsforbruk på 19%, og maskinrensk 30%. Altså var alle prosessene mer tidkrevende med elektroniske tennere.

Totalt sett ble inndriften pr. uke med elektroniske tennere i snitt 33.6m på en stuff, med 12,5 salver pr. uke. Etter overgangen til ikke-elektriske tennere ble inndriften 41.6m, og en økning til 17 salver i uken i snitt.

5.2. Armering av elektroniske tennere

Armering er prosessen der kretsen med tennere kobles til avfyringsmodulen, klokken i tennerne synkroniseres og kondensatorene i tennerne lades opp og gjøres klar til skyting. Tidsbruket på denne prosessen er avhengig av antall tennere i salven, og tar omkring 1-5 minutter. Under og etter armering er det ikke gitt garanti for sikkerheten, og området må derfor evakueres og stenges av før armeringen begynner (Kvilten, 2018). I salven der det ble målt tidsbruk for elektroniske tennere tok prosessen med armering 1 minutt og 22 sekunder, med 96 tennere. I tillegg går det noe tid med til å forberede armeringen.

5.3. Arbeid langs trafikkert vei

Ved arbeider langs trafikkert vei er det ofte en begrenset tidsperiode hvor det tillates at veien kan stenges for trafikk. I denne tidsperioden må området evakueres, salven armeres, avfyres samt at veien må ryddes for steinsprut før den igjen kan åpnes. På prosjektet Rugtvedt-Dørdal er denne tidsperioden litt varierende, men var i en periode satt til 12 minutter. Dette er allerede relativt intensivt selv ved bruk av ikke-elektriske tennere. Ved bruk av elektroniske tennere vil prosessen med armering av tennerne ta verdifull tid, og gi mindre tilgjengelig tid til resten av arbeidet som må utføres i den korte tidsperioden hvor trafikken kan holdes stoppet.

6. Kostnader

Temaet om kostnader er den mest avgjørende faktoren for valg av tennsystem. Bransjen er hardt konkurranseutsatt, og fortjenestemarginene er små. Entreprenørene er nødt til å prise jobben billig ved anbudsbesvarelse, hvis ikke vinner de ikke anbudsrunden. Utfordringen med elektroniske tennere er at systemene er vesentlig dyrere enn ved bruk av ikke-elektriske systemer, og det er vanskelig å konkurrere på pris dersom en entreprenør ønsker å bruke elektroniske tennere, dersom en konkurrent priser med billigere systemer. Tennsystemenes innkjøpskostnader i seg selv er enkelt å sammenlikne. Tidligere studier og lovnader fra produsentene viser at det kan være mulig å oppnå produksjonsmessige forbedringer ved bruk av elektroniske tennere. Dette er hovedsakelig på grunn av muligheten elektroniske tennere gir med valgfrihet og nøyaktighet på detonasjonstidspunkt. Dette er kort fortalt i del 2, og faktorer som bedre fragmentering av røys, konturkvalitet og rystelsesbegrensninger kan bidra til økt produktivitet og lavere kostnader i nedstrøms prosesser, for eksempel enklere lasting og mindre slitasje på knuseverk.

6.1. Innkjøpskostnader

Tabell 8 viser en reell mengdeoppstilling av tennmidler for ett av BMHEs store veiprosjekter, med et estimert uttak av 3 500 000fm3. Behovet for tennmidler er regnet ut av erfaringstall fra tilsvarende prosjekter. Under beregning av kostnader er det benyttet listepris fra Orica.

Tabell 8 - Kostnader for tennmidler ved et stort veiprosjekt. Kilde: Tore Venåsen

Orica UniTronic600				Orica Nonel Exel			
Produkt	Enh.	Stipulert mengde	Enh.pris	Produkt	Enh	Stipulert mengde	Enh.pris
Tenner, 3 m	stk.	650	114,60	Koblingsblokk 4,8 m	stk.	85 000	29,76
Tenner, 6 m	stk.	30 100	120,70	4,8 m	stk.	21 250	24,83
Tenner, 9 m	stk.	29 000	128,80	7,8 m	stk.	18 000	29,76
Tenner, 15 m	stk.	34 300	143,35	12 m	stk.	18 000	45,28
Tenner, 20 m	stk.	7 500	155,90	15 m	stk.	34 300	52,73
Tenner, 25 m	stk.	1 400	170,50	18 m	stk.	7 500	65,78
Tenner, 30 m	stk.	-	180,20	21 m	stk.	2 500	71,75
Koblingstråd	m	150000	1,78	24 m	stk.	1 400	79,58
Logger + Blastbox, software, 5 sett	mnd	18	11 900,00	Dynoline	m	100 000	1,65
Fraktkostnader	stk	102950	0,44	Fraktkostnader	stk	187950	0,44
Totalkostnad	kr		14294113		kr		7248431,50
Kostnad, kr/fm3			4,08	Kostnad, kr/fm3			2,07

Det er beregnet et forbruk på 102 950 tennere ved bruk av begge systemer. Kostnadsberegningen Oricas UniTronic elektroniske tennere inkluderer skyteledning og leie av 5 komplette sett med logger og avfyringsmodul. Kostnadsberegningen ved bruk av Nonel Exel omfatter også koblingsblokker og dynoline. Estimatet viser at kostnaden for koblingsblokker er 35% av den totale kostnaden for Exel-tennsystemet. Tabell 8 viser at enhetsprisen for elektroniske tennere er omtrent 100kr høyere enn for Exel-tennerne. Kalkulert kostnad for UniTronic-systemet er 14 294 113kr, eller 4,08kr/fm3, mens det for Exel-systemet er beregnet en total innkjøpskostnad på 7 148 431,50kr, som tilsvarer 2,05kr/fm3. Beregningen viser at bruk av UniTronic-tennsystemet vil utgjøre en innkjøpskostnad som er tilnærmet dobbelt så stor som for Exel-systemet.

6.2. Arbeidskostnader

6.2.1. Konsekvenser ved forsager og pilsalve

Ved forsagere vil produksjonen påvirkes i større eller mindre grad, og kostnadene for opprydning varierer svært ut ifra alvorlighetsgrad. I de fleste tilfeller dreier det seg om mindre funn, for eksempel små biter av detonerende lunte. I disse tilfellene er opprydningsarbeidet enkelt, ved at bergsprenger tilkalles og rydder opp uten at det hemmer produksjonen i noen stor grad (Venåsen and Stensvik, 2018). I andre, mer omfattende tilfeller, kan det bli snakk om svært tidkrevende opprydningsarbeid, og potensielt dagevis med produksjonsstans og beslaglagte ressurser i form av maskiner og mannskap. Disse tilfellene kan anslagsvis gi en ekstra kostnad på 150-200 000kr (Venåsen and Stensvik, 2018). I tillegg kan det påbeløpe indirekte kostnadstap ved at arbeidet holder igjen produksjonen, dersom videre arbeid og ventende ressurser påvirkes av opprydningsarbeidet. Det kan for eksempel være arbeid inn mot et tunnelpåhugg hvor tunnelarbeiderne og utstyr er hentet inn og er klare for å begynne sitt arbeid, eller hvis konstruksjonsarbeidere står klare til å påbegynne en bro- eller kulvertkonstruksjon.

Den største konsekvensen er likevel dersom gjenstående sprengstoff detonerer ukontrollert, og på den måten resultere i personskader eller dødsulykke, slik som de nevnte ulykkene i Valdres, hvor en maskinfører omkom etter å ha pigget på gjenstående sprengstoff i en tunnelvegg, og i Namsos der samme salve resulterte i to separate ulykker. Foruten de sosiale påkjennelsene for pårørende har Finansdepartementet beregnet den samfunnsøkonomiske verdien til et statistisk liv, VSL, til 30 millioner 2012-kroner for alle sektorer (Longva and Tverstøl, 2014). VSL representerer samfunnets betalingsvillighet for å spare et liv.

Som direkte konsekvenser for entreprenørene kan alvorlige ulykker føre til produksjonsstans for granskning av ulykkesårsak, gjennomgang av arbeidsrutiner og sikkerhetsprosedyrer og økonomisk kompensasjon til de involverte. Etter ulykken i Valdres, som inntraff 29. februar 2016, ble arbeidet ikke gjenopptatt før slutten av mai (Statens Vegvesen, 2016b).

Ved alvorlige eller gjentagende hendelser med forsagere kan også entreprenørens omdømme hos byggherren svekkes i fremtidige oppdrag, eller byggherren kan utestenge entreprenøren fra videre arbeider i prosjektet frem til det er vist at det er gjort tilstrekkelig tiltak for å fortsette driften på en trygg måte. Slike tiltak kan dreie seg om utskifting av mannskap, eller tettere oppfølging av arbeidet i form av økt krav av dokumentasjon av planlegging og utføring

av arbeidet (Venåsen and Stensvik, 2018). Direkte kostnader for slike tiltak er vanskelig å beregne, da de avhenger av omfang og konsekvenser.

6.3. Oppnådde arbeidsreduserende effekter

Under arbeidet med forstudiet nevnt i kapittel 3.2.1, ble det kartlagt flere mulige økonomisk gunstige effekter som kan oppnås med bruk av elektroniske tennere. Via observasjoner og samtaler ble det forsøkt å avdekke om disse mulighetene blir utnyttet.

6.3.1. Korreksjon av boravvik

Under observasjoner av arbeider med programmering av salve, ble det observert flere tilfeller der denne teknikken med små justeringer av forsinkertid i enkelttennere ble benyttet. Dersom ett hull hadde større eller mindre forsetning enn resterende hull i samme rast, ble det trukket fra eller lagt til 1-2ms på dette hullets forsinkertid. Dette skulle forbedre utslaget og sekundærfragmentering, men det var ikke mulig å observere om dette er et tiltak som utgjør noen reell forskjell i resultatet. Også i salvens ytterkanter ble dette benyttet, for å gi mindre innspenninger, og på den måten gi mindre sprekkdannelser i gjenstående berg.

6.3.2. Økning av salvestørrelse ved vibrasjonsbegrensninger

Ved BMHEs anlegg Rugtvedt-Dørdal påpekes det at salvene i områdene med vibrasjonskrav er langt fra å overstige maksimumkravene, men at det er andre faktorer som også hindrer økning av størrelse (Kvilten, 2018). I dette tilfellet er det den nærliggende eksisterende E18, hvor det er et svært kort tidsrom veien kan stenges for trafikk, som medfører begrensninger i salvestørrelse på grunn av tidspresset med opprydningsarbeidet etter skyting for å åpne for trafikk igjen.

6.3.3. Optimalisering av salve

Det er på Rugtvedt-Dørdal ikke gjort noen funn som tilsier at fragmenteringen ved bruk av elektroniske tennere er forbedret i nevneverdig grad i forhold til bruk av ikke-elektriske systemer i tilsvarende prosjekter. Den ene årsaken er den begrensede erfaringen med elektroniske systemer, og at dette prosjektet blir en innkjøringsfase for sprengningsarbeiderne for å lære seg dette systemet (Venåsen, 2018). Den andre årsaken er at fokuset på optimal fragmentering ikke er så stort ved slike arbeider, som for eksempel i steinbruddsdrift. I steinbrudd vil uttak av masse bearbeides i knuseverk, og på denne måten kan en jevnere fragmentering gi økt kapasitet og mindre slitasje på knuseverk. På Rugtvedt-Dørdal er det

mye skjæringer og lite behov for fyllinger, og store mengder steinmasser blir plassert i permanente deponier langs linja, og disse massenes fragmentering vil derfor gi minimal økonomisk gevinst, foruten redusert behov for pigging av blokker før lasting (Kvilten, 2018).

6.3.4. Kontur

På Rugtvedt-Dørdal sprenges konturen med detonerende lunte i alle hull, med kun en tenner som starter flere konturhull (Kvilten, 2018). Dette innebærer at tennerens nøyaktighet blir irrelevant, da denne er plassert over borhullene, og påvirker derfor ikke resultatet.

7. Diskusjon

I dette kapittelet blir innhentede resultater blir drøftet opp mot tidligere kjent kunnskap, og inneholder også en diskusjon rundt resultatenes relevans samt mulige feilkilder.

7.1. Sikkerhet

7.1.1. Variasjon i detonasjonstidspunkt

Sammenlikningen av nøyaktighet på detonasjonstidpunkt omtalt i kapittel 2.6 illustrerer nøyaktigheten til elektroniske tennere dersom det eksempelvis sprenges med begrensningskrav av vibrasjoner, og riktig rekkefølge på detonasjonen er viktig. Det viser også grunnen til at den ikke-elektriske serien utviklet for bruk i underjordsarbeider øker drastisk i forsinkertid på de lange intervallene, som igjen fører til at en stor salve trenger lang tid for å hindre overlapping. Med elektroniske tennere kan man med fordel korte ned på forsinkertidene mellom hvert intervall, og likevel ikke overstige enhetsladningene på grunn av overlapp. Dette gjør at tidsforskjellen mellom detonasjon i omkringliggende hull vil bli mindre, og omkringliggende berg vil ha kortere tid på å flytte seg, og eventuelt rive løs og lage brudd på en ladestreng som enda ikke har detonert (Fagerheim and Neby, 2018). På denne måten vil elektroniske tennere kunne gi mindre uomsatt sprengstoff, ved at sannsynligheten for brudd på ladestreng minskes. Dette ble gjort under drivingen av Kjørholttunnelen, hvor siste tenner gikk på rett over 3000ms. Det er ikke skaffet informasjon på om dette påvirket omfang av udetonert sprengstoff.

Ikke-elektriske tennsystemer er bygget opp som en kjedereaksjon, hvor detonasjonen av en koblingsblokk setter i gang støtbølgen i slangen til den neste tilkoblede koblingsblokken. Fordi koblingsblokkene er bygget opp på samme måte som en tenner, med en pyroteknisk forsinkersats, vil disse også ha en viss varians fra nominelt detonasjonstidspunkt. Dersom det ved rastvis detonasjon på eksempelvis 10 raster med koblingsmønster rett innover fra stuff tenkes at hver koblingsblokk har en varians på ±10%, og variansen fra de foregående koblingsblokkene forplanter seg innover, vil dette kunne gi relativt store utslag på bakerste rast. Elektroniske tennere er derimot uavhengige av alle tidligere intervaller, og detonasjonen av en tenner vil derfor ikke påvirke de andre.

7.1.2. RUH

Ser man på trenden i antall rapporter for de ulike hendelsene av registrerte uønskede hendelser, er det for elektroniske et stort antall rapporter om feilmeldinger som resulterer i merarbeid, men under kontrollerte forhold før skyting. I flere av tilfellene er det nevnt at feilsøkingen utsetter skytinga av salven fra mellom 30 minutter til to timer, enten ved at hull må blåses for å skifte tenner, eller ved tekniske- programmvareproblemer med avfyringsmodulen gjør at det må oppdrives en tilgjengelig reserveenhet for å fullføre skytingen. En rapport er også begrunnet i mulig overledning i kobling grunnet intens nedbør.

Spesielt fra KBT er det mange rapporter om jordfeil, som skyldes brudd på tennerledningens isolasjon forårsaket av måten det lades på i tunnel. Området rundt KBT har ekstra utfordrende geologi, ved at det skifrete fjellet skaper svært spisse kanter. Det ble på grunn av dette innvilget et fritak fra bruk av elektroniske tennere i dette arbeidet. Problemene med isolasjonsbrudd ved tunnelsalver stemmer overens med tidligere erfaringen om at det elektroniske tennsystemet er noe skjørt for mekaniske påkjenninger. Orica opplyser om at de er klar over problemet, og er for tiden i gang med å teste elektroniske tennere med ekstra solid isolering som skal tåle påkjenningene som lading av tunnelsalver medfører (Morstad, 2018).

Antall registrerte RUH for vurdering av trender er meget begrenset, både i BMHE og DSBs database. I begge arkivene er det til sammen 37 rapporter med elektroniske tennere, mens det for ikke-elektriske-tennere fantes 20 rapporter i BMHEs database, fordelt på 4 ulike prosjekter. I DSBs database var det et større antall registrerte RUH for ikke-elektriske-systemer, men på grunn av begrensninger i deres arkivsystem og mangel på ressurser for manuell sortering er ikke disse bearbeidet på noen god måte, og heller ingen automatisert måte å eksportere data basert på nøkkelord.

At det bare fantes 8 rapporter i DSBs database om hendelser med elektroniske tennere, tyder på en stor underrapportering. Det vises også til at de fleste rapportene kommer fra et lite antall entreprenører, hvor rapportering av uønskede hendelser er godt systematisert i bedriftens rutiner (Isdahl, 2018b). Hendelsene DSB har fått inn rapporter på er også mottatt fra prosjekter det ikke er innhentet videre informasjon om, og prosjektets størrelse, arbeidsmetoder og liknende er ikke kjent. Dermed kan ikke disse RUHene gi noe statistisk bilde på hvor ofte en hendelse opptrer. De kan derimot vise hvilke hendelser som er innrapportert, og gi et lite innsyn i hvilke typer hendelser som opptrer. Det observeres at rapportene mottatt av DSB har fellestrekk med rapportene i BMHEs database, og består av

systemfeil, gjenstående hull, forsagere og tenner i røysa. Det rapporteres blant annet om elektronisk tenner med fabrikkinnstilling funnet i røysa, som betyr at tenneren hverken er scannet eller koblet med. Det viser at selv om systemet har funksjoner som skal fange opp manglende tennere, er det fortsatt nødvendig å gjøre visuell kontroll for å sikre at tennere ikke blir utelatt.

Dersom man ser på antall RUH uten å sette dette opp mot tennerforbruk, kan det sees at hendelsen det rapporteres mest om med elektroniske tennsystemer, er tennerproblemer som er oppdaget under testing av salva, og som på den måten enten hindrer en forsager eller gjør at tenneren kan posisjonmåles for en tryggere utgraving av tenner og bunnlading i ettertid. Med ikke-elektriske tennere er det ingen registrerte rapporter der det på forhånd er oppdaget feil med tennere slik at hullet kan posisjonmerkes. Prosessen med å lete etter uomsatt sprengstoff blir dermed mer omfattende enn om hullets nøyaktige posisjon hadde vært kjent (Kvilten, 2018). Hendelsen med flest RUH fra bruk av ikke-elektriske tennere er gjenstående hull som kommer av tennebrudd.

7.1.3. Forsagere

Samlet for alle Nye Veiers prosjekter er det registrert 2 forsagere pr. 10 000 tenner. Dette tallet inkludert funn av uomsatt sprengstoff, forsagere som resultat av skutt salve med defekt tenner, samt funn av detonerende lunte. Det er også informert fra Nye Veier om at 8 av 54 forsagere er fra Rugtvedt-Dørdal, mens resterende 46 er fra andre prosjekter.

Sammenliknet er det fra BMHEs RUH-database registrert 3 forsagere, 3 funn av detonerende lunte, samt en hendelse der salver ble skutt med tennerproblemer som resulterte i forsager. Dette utgjør 0,89 forsager pr. 10 000 tenner. Dette er ikke nøyaktig det samme tall som fra Nye Veier, og det kan tenkes at forskjellen kommer av hvilke hendelser som regnes som forsager. Om det også inkluderes hendelser med gjenstående hull, blir tallet 1,31 pr 10 000 tenner.

Basert på registrerte RUH fra BMHEs to store prosjekter på E6 Helgeland, hvor det brukes ikke-elektriske tennere, er det til sammenlikning registret 0,19 forsagere pr. 10 000 tenner, etter samme regnemetode som for elektroniske tennere. Det er også 4 hendelser med brudd i koblingsblokker som førte til gjenstående hull. Om disse tas med, i tillegg til de resterende 7

hendelsene med gjenstående hull, blir det 0,54 hendelse pr. 10 000 tenner. Disse tallene er fremstilt i Tabell 9.

Tabell 9 - Sammenlikning av antall hendelser med elektroniske og ikke-elektriske systemer

Tennsystem	Hendelser	Antall pr. 10 000 tenner
Elektroniske tennere	Detlunte i røys + salve skutt med defekt tenner + uomsatt sprengstoff i røys	0,89
	Detlunte + salve med defekt tenner + uomsatt sprengstoff i røys + gjenstående hull	1,31
	Rugtvedt-Dørdal fra Nye Veier, 8 hendelser	1,1
	Total på alle Nye Veiers prosjekt, 54 hendelser	2,03
Ikke-elektriske tennere	Detlunte i røys + uomsatt sprengstoff	0,19
	Detlunte i røys + uomsatt sprengstoff + gjenstående hull + brudd i koblingsblokk	0,54

Det totale forbruket av tennere med ikke-elektriske systemer er basert på at koblingsblokker også telles som en tenner, som i denne sammenheng betyr at det vil være et forbruk på to tennere pr. borhull, og 0,54 hendelser pr. tenner vil da tilsvare 1,1 hendelser pr. 10 000 borhull.

Tallet for hendelser med ikke-elektriske systemer er likevel lavere enn for elektroniske, motsatt av forventet resultat. Noe av forskjellen kan forklares i at innrapportering av RUH til BMHEs database har blitt forbedret i nyere tid, og at det kan være mangelfull rapportering fra Helgeland-prosjektene fra før det ble fokus på rapportering av alle hendelser. En underrapportering fra disse prosjektene på omkring 20% kan være sannsynlig (Venåsen, 2018).

Videre kan man se at det på Rugtvedt-Dørdal er 3 hendelser med funn av detonerende lunte, mot bare en på Helgeland-prosjektene, og funn av detonerende lunte drar dermed opp antall forsagere på førstnevnte prosjekt. Det er ingen informasjon om årsaken til rester av lunte, men funn av kortere lengder detonerende lunte er relativt vanlig i områder med vannfylte hull, da våt lunte ikke tenner. På Rugtvedt-Dørdal blir konturen skutt med detonerende lunte som tennes opp utenfor borhullet, og det kan derfor være at nedre del av lunta har trukket vann om

denne enden ikke er tilstrekkelig forseglet. Dersom dette er årsaken til at all lunte ikke tenner, vil tennsystemet ikke være den påvirkende årsak for rester av lunte.

Dersom det er problemer med en tenner som er plassert i borhull, og som ikke lar seg bytte, vil det elektroniske systemet ha den fordelen at man i vil bli varslet før skyting. Det er da mulig å koordinatfeste den defekte tennerens posisjon, og peile denne inn igjen etter avfyring for en kontrollert utgraving av gjenstående sprengstoff. Dette er gjort på Rugtvedt-Dørdal.

Selv om det finnes eksempler på produktfeil, er blir det i stor grad påpekt at den største årsaken til pilsalver og forsagere er brukerfeil. Dette kan være knyttet til slurv, feilvurderinger, rutine- eller kommunikasjonssvikt, og feilen kunne derfor vært unngått. Det er mulig å tenke seg at en koblingsblokk på en stor salve lett kan bli feilkoblet eller glemt ved arbeider under tidspress, eller at en tenner i et hull blir oversett i områder med mye løsmasser eller ved snøvær.

Funksjonene for å oppdage brudd før skyting blir av de fleste nevnt som elektroniske tennsystemets styrke sammenliknet med ikke-elektriske systemer. Nye Veier nevner dette som en viktig årsak for at de har valgt å kreve elektroniske tennere i sine prosjekter. Elektriske tennere kan måles for å sikre kontakt med tennere i borhullet, men sammenliknet med det elektroniske systemet er denne metoden relativt primitiv og i mange tilfeller tidkrevende ved feilsøking. Der kontroll av ikke-elektriske systemer kun baseres på en visuell kontroll av at koblingen er gjort riktig, har man med elektronikken flere ledd hvor eventuelle feil kan oppdages og rettes.

Selv om elektroniske systemer gir større mulighet for å oppdage brudd, er det likevel registrert tilfeller der enkelthull er oversett og har resultert i forsager med intakt tenner. Dette viser at dette systemet heller ikke gir noen garanti for å fange opp slurv. Dersom en tenner for eksempel ligger gjemt under vann ved scanning, vil den kanskje heller ikke oppdages ved kobling. Da vil det ikke bli varslet om feil. Med elektroniske tennere har man også mulighet til å se en liste over alle tilkoblede tennere ved måling, som kan sammenliknes med antall hull i borplanen.

Det er ikke gjort noen funn som tilsier at konsekvensen ved forsagere og gjenstående hull vil være større eller mindre ved de to systemene, foruten muligheten man har til å koordinatfeste hullets posisjon på forhånd dersom det oppdages en feil med en tenner som ikke lar seg bytte.

7.2. Tidsbruk

7.2.1. Tidsbruk i dagen

Fra samtaler med ulike aktører innenfor bergsprengningsbransjen og utførte rapporter, var en av ankepunktene for bruk av elektroniske systemer at de var mer tidskrevende å arbeide med. Det ble derfor gjort en undersøkelse på to salver, der det ble brukt ikke-elektriske tennere i den ene og elektroniske tennere i den andre. Målingene som ble gjort, og presentert i delkapittel 5.1, viste at det tok 2 minutter og 45 sekunder for arbeid med ikke-elektriske systemer for hvert borhull, mens det med elektronikk tok 2 minutter og 12 sekunder. Resultatene viser derfor noe annet enn hypotesen og antagelsene som ble gjort på forhånd.

Det er likevel en vesentlig forskjell i omstendighetene som kan forklare hvorfor resultatet ble motsatt av forventet. I den første observerte salven med ikke-elektriske tennere ble det utført flere sikringstiltak for å hindre tennebrudd, og koblingsarbeidet ble vesentlig mer omfattende enn om det hadde vært koblet med enkle kretser uten sideveis sikring. Det kan også tenkes at koblingsarbeidet kunne bli gjort parallelt med slurry-lading. Se delkapittel 4.1.6 for beskrivelse av denne salven.

I salven der det ble brukt elektroniske tennere, var forholdene enklere, og kobling av tennere gikk rett innover til borhullene i rasten bak. Ser man på forskjellene i tid for de to systemene vises det at det er brukt vesentlig kortere tid for kobling av elektroniske tennere, i snitt 17 sekunder pr. borhull, mens det i den ikke-elektriske salven tok 1 minutt og 25 sekunder, selv om arbeidet med selve koblingen av tennere er relativt likt. Dersom salven med ikke-elektriske tennere hadde blitt utført under samme forhold som salven med elektroniske tennere, er det sannsynlig at arbeidet med ikke-elektriske tennere kunne blitt redusert betraktelig.

Det ble derfor gjort observasjoner av en ny salve med ikke-elektriske tennere, for å se på tidsbruket under mindre krevende forhold. Resultatet fra denne målingen viste at det i snitt gikk med 37,5 sekunder arbeidstid pr. hull, i motsetning til 1 minutt og 25 sekunder som den første ikke-elektriske salven. Det var her områder med usystematisk boring i saksemønster, og kobling i plogmønster. Det er antatt at tidsbruket ville blitt redusert ytterligere ved mer systematisk bormønster. Resultatene fra denne ekstra målingen, som er vurdert som et brukbart estimat for tidsbruk med ikke-elektriske tennere, viser at medgått tid pr. borhull er

omkring 1 minutt og 44 sekunder mot 2min og 12 sek mot elektroniske, som med dette gir en ekstra tidsbruk på 27%.

Disse observasjonen viser svakheter med bruk av ikke-elektriske systemers i utfordrende forhold. Der bergsprenger anså det som ønskelig å gjøre ekstra tiltak, i form av doble koblingsblokker ved overdekking og sikring sideveis, ville det ved bruk av elektroniske tennere kunne testet kretsen før skyting. Det ville da ikke vært nødvendig å gjøre ekstra tiltak for å hindre tenningsbrudd.

Samtidig ble det observert en fordel med ikke-elektroniske tennere der detonasjonsmønsteret må improviseres. På grunn av de fargekodede koblingsblokkene er det enklere å visualisere utslagsretning og hullenes rekkefølge ved usystematisk bormønster, i forhold til å lese av tennerens ID og forsinkertid fra en liste.

Ved observasjoner av arbeidet med elektroniske tenner ble det oppdaget at systemet var nokså effektivt ved god struktur i arbeidet og tilstrekkelig mannskap, slik at ingen ble gående å vente. Slurry-ladingen startet i salvens ytterkant lengst borte fra slurry-bilen, og det ble jobbet systematisk nærmere bilen, og en ledig person kunne ta seg av scanning og koblings mens resten arbeidet med slurry. I dette tilfellet var det fire personer til stede. To jobbet med lading av slurry, der en jobbet med slangen og den andre styrte pumpekontrollen og satte sperrefjærer for fordemming, en arbeidet med fordemming, og en tok seg av scanning og kobling i de delene av salven som var ferdig ladet og fordemmet. Ved denne arbeidsfordelingen gikk arbeidet raskt, og det var ingen som hadde lengre periode med dødtid. Tilsvarende er det tenkelig at ved arbeid med ikke-elektriske tennere, kunne personen som styrte pumpen og satte fjærer også få tid til å koble tennere og koblingsblokker, om disse var lagt ut på forhånd. På den måten stemmer anslaget om at det kreves en ekstra mann for å koble elektroniske tennere på samme tid som ikke-elektriske tennere. Ved utfordrende salver, der det gjøres ekstra tiltak ved bruk av ikke-elektriske tennere, som i situasjonen beskrevet i 4.1.6, tyder det derimot på at arbeid med elektroniske systemer kan være like effektivt.

7.2.2. Arbeid langs trafikkert vei

Ved arbeid langs sterkt trafikkerte veier med kort stengetid, som for Rugtvedt-Dørdal har variert mellom 10 og 15 minutter, er det mye arbeid som skal gjøres på svært kort tid. Innenfor dette tidsrommet må området sperres av og tømmes, sirene startes, salven armeres, skytes og veien må ryddes for stein før arbeidet med å åpne sperringer kan startes. Dette er

mye arbeid som skal gjøres på svært kort tid, og ved bruk av elektroniske systemer vil armeringen kreve litt av denne tiden. Ved armering av 96 tennere ble det målt at prosessen med armering tok 1min og 22sek. Dette er kort tid, men det utgjør 1/8 av det totale tidsrommet veien kan holdes stengt dersom dette er satt til 12 minutter. Det er derfor gitt flere tilbakemeldinger fra arbeiderne på prosjektet om at dette i flere tilfeller har vært svært intensivt, og at det øker stressnivået rett før og under avfyring. Det er tidligere i oppgaven diskutert rundt hvordan uønskede hendelser kan øke ved stort tidspress. Det har også på prosjektet vært tilfeller der det digitale avfyringsapparatet har hengt seg opp rett før skyting, og det har vært nødvendig å bytte ut dette med et nytt apparat, og overføre og armere tennere på nytt. Det har også vært tilfeller der det oppdages jordingsfeil som testfunksjonen i loggeren ikke har klart å fange opp. Dette har i noen tilfeller ført til at skytingen må avbrytes, og salven må stå ferdig ladet til neste tillatte tidsrom hvor veien kan stenges.

7.2.3. Tidsbruk i tunnel

Som vist i Tabell 7, kapittel 2.8.1 om tidsbruk med ulike tennsystemer i tunnel, kommer det frem at både kobling, lasting og rensk var mer tidkrevende der det brukes elektroniske tennere, enn i salvene skutt med ikke-elektriske tennere. Ut i fra tidligere publiserte rapporter som er brukt blant annet i den forberedende litteraturstudien, var det forventet at elektroniske tennere burde føre til økt tidsbruk for koblingsarbeider, men en reduksjon i tidsbruk for lasting og rensk.

En mulig forklaring for ekstra tidsbruk for lasting er at hele tunnelens tverrsnitt ble skutt på veldig kort tid med elektroniske tennere, hvor siste tenner gikk på 3165ms. Dette fører til at store mengder sprengstoff omdannes på svært kort tid fra mange hull, og det ble observert at salven ble kastet svert langt ut fra stuff, og at oppryddingen derfor er mer tidkrevende. Til sammenlikning gikk siste ikke-elektriske tenner på 6000ms.

Når det gjelder tidsbruk for rensk er det ingen kjent årsak til hvorfor resultatet er motsatt av forventet. En påvirkende faktor kan være at sprengningsarbeidernes ønske om å gå tilbake til ikke-elektriske tennere kan forårsake at de ubevisst gjør en bedre innsats med systemet de

foretrekker. Større erfaring med ikke-elektriske systemer kan også tenkes å gi utslag på resultatet.

Det ble også vist at den totale inndriften i Kjørholttunnelen økte med 24% i snitt etter overgangen fra elektroniske til ikke-elektriske tennere, grunnet kortere syklustider, slik at det ble skutt flere salver over samme tidsrom. Inndrift pr. salve var relativt lik.

Det er en stor forskjell i økt tidsbruk ved kobling av elektroniske tennere fra arbeider i dagen, hvor det er funnet et ekstra tidsbruk på 27%, til arbeid under jord hvor det er ekstra tidsbruk på 63%. Dette kan skyldes at det i tunnel er et svært konsentrert område å jobbe på, med mange tennere på et lite areal. Slik går det mindre tid til for arbeidere å flytte seg mellom hullene, og selve tidsbruken på bare koblingsarbeidet kommer tydeligere frem. Det kan også tenkes at metoden med buntopptenning av ikke-elektriske tennere er enda mer effektivt enn arbeid med koblingsblokker. Det er ikke kjent om utbedring av feil med elektroniske tennere i de tilfellene de får isolasjonsbrudd er inkludert i tidsbruket for elektroniske tennere i tunnel.

7.3. Kostnader

Innkjøpskostnadene er for elektroniske tennere nært det dobbelte av ikke-elektriske tennere. Det er ingen tydelige indikasjoner på at elektroniske tennere vil synke ned til et prisnivå slik at det kan konkurrere mot ikke-elektriske systemer i innkjøp.

I kapittel 5.1 ble det estimert at det ved koblingsarbeider grovt sett kreves en ekstra arbeider for å koble elektriske tennere like raskt som ikke-elektriske ved pallsprengningsarbeider. Inkludert tilleggskostnader er arbeidsgivers utgifter for en erfaren bergsprenger omtrent 750kr/t (Venåsen, 2018).

7.3.1. Arbeidsreduserende effekter

I kapittel 2.7 ble det presentert en rekke effekter hvor elektroniske tenneres fleksibilitet ved frie valg av forsinkertider og presise detonasjonstidspunkt kan øke produktiviteten eller minske kostnadene.

Reduksjon av vibrasjoner, økning av salvestørrelse
På grunn av god kontroll over tennintervallene ved bruk av elektroniske tennere, er det trolig at salvestørrelsene ved arbeider tett på konstruksjoner og bebyggelse kunne vært større med elektroniske tennere enn ved bruk av mindre presise tennere med pyrotekniske forsinkersatser. Basert på utplasserte rystelsesmålere er det på Rugtvedt-Dørdal gode marginer til tillatte grenseverdier for vibrasjoner. Sprengningslederenes erfaring med begge de aktuelle tennsystemene tilsier at det kunne vært skutt større salver i disse områdene med elektroniske tennere i forhold til ved bruk av ikke-elektriske tennere. Dette lar seg ikke etterprøves på grunn av kravet om bruk av elektroniske tennere. I tillegg er de reelle begrensningene i dette prosjektet det tillatte tidsrommet for sperring av E18. Det er altså opprydningsarbeidene som begrenser salvestørrelsene, ikke vibrasjonsbegrensninger.

Optimalisering av salve

I steinbrudd- og gruvedrift skytes mange salver i nokså like forhold, samtidig som fremdriften er ikke like kritisk dersom det alltid er en buffer klar til prosessering eller levering (Morstad, 2018). I disse tilfellene har man bedre tid til å optimalisere salven, i tillegg til at insentivet for optimalisering av sprengstofforbruk og fragmentering er stort. Ved infrastrukturprosjekter er det derimot ofte større variasjon i geologien langs hele veilinja. Det er også et stort fokus på fremdrift, som i stor grad avhenger av boring og utlastingstempoet, og det er viktig å ikke la store lastelag bli stående å vente. Samtidig er det negativt for fremkastet og pakking av røysa å skyte en salve før forrige salve er lastet ut. Kostnadsmessig vil det også være mindre å spare på optimalisering, for eksempel vil ikke 10% økning av sprengstofforbruk være avgjørende for økonomien i et slikt prosjekt (Morstad, 2018).

Kontur

Ved bruk av nøyaktig opptenning av konturhull kan det oppnås samvirke mellom borhullene, som kan gi et bedre konturresultat med mindre skadesone i gjenstående berg. På Rugtvedt-Dørdal, der elektroniske tennere er observert, er det derimot benyttet detonerende lunte, hvor lunta til flere hull er festet til en og samme tenner. Tennerens nøyaktighet gir derfor ingen utslag på detonasjonen i borhullene. Detonerende lunte har svært høy detonasjonshastighet, omkring 6500m/s, og ved opptenning av flere hull med samme tenner vil detonasjonstidspunktet i hullene bli relativt nøyaktig med denne teknikken. Dette har gitt flere fine skjæringer, som denne vist i Figur 26.

Figur 26 - Skjæring på Rugtvedt - Dørdal, Rugtvedt 17/07/2017

7.3.2. Kontur og overmasser i tunnel

I *Rapport fra forsøk med elektroniske tennere og detonerende lunte ved driving av Jarlsbergtunnelen* (2010) er det utført forsøk med detonerende lunte og elektroniske tennere i tunnel, som viste gode resultater. Dette forsøket er omtalt i kapittel 2.7.4. Dette forsøket påviste store forbedringer i antall synlige borpiper, som er et tegn på mindre knust sone. Dette kan ha mye å gjøre med egenskapene ved bruk av detonerende lunte istedenfor strengladning, da man enklere oppnår korrekt lademengde, og kan på den måten ikke bare skyldes tennmiddelet. Det var derimot tidligere erfart store problemer med lunterester i røysa, som førte til et forbud av bruk av detonerende lunte i arbeider under jord. I de seks salvene som ble utført med elektroniske tennere og detonerende lunte i dette forsøket, ble det ikke gjort noen funn av rester etter detonerende lunte. Det kan derfor tyde på at mindre spredning av detonasjonstidspunkt, som kan oppnås med elektroniske tennere, reduserer omfanget av uomsatt sprengstoff. I samme rapport blir det også påpekt at det ble erfart at elektroniske tennere reduserte omfang av udetonerte rørladninger i røysa under arbeidet med Gjøvik fjellhall. Det var denne observasjonen som førte til teorien om at rester av detonerende lunte kunne begrenses.

Rapporten *Driftserfaringer E 18 KBT - elektroniske tennere vs. ikke elektriske tennere, Sikkerhet og tekniske egenskaper i tunnel* påviser derimot ingen nevneverdig forskjell i overmasser med de to ulike systemene, hvor det ble foretatt målinger under normale produksjonsforhold. Det ble her brukt strenglading i konturen.

Oppsummering arbeidsreduserende effekter

Totalt sett ble det ikke gjort nevneverdige observasjoner av arbeidsreduserende effekter på dette Rugtvedt-Dørdal, der elektroniske tennere er brukt. Dette er vanskelig å observere uten gode målemetoder og målinger over lang tid, samt at geologiske forhold kan variere i så stor grad at resultat mellom ulike prosjekter er problematisk. Fordi det ikke var anledning til å gjøre testsalver med ikke-elektriske tennere ved dette prosjektet, var det også vanskelig å gjøre gode sammenlikninger av resultat.

Det er også tidligere påpekt at bransjen generelt har lite erfaring med elektroniske tennere i forhold til ikke-elektriske tennere. Det kan dermed antas at det ved senere prosjekter, hvor erfaringen med elektronikk er større, kan legges større innsats i å utforske mulighetene for optimalisering med elektroniske tennere.

7.4. Sprengningsarbeidernes meninger

Etter mange tiår der ikke-elektriske tennere har vært det aller mest benyttede tennsystemet, er det en viss skepsis blant arbeidere om å ta i bruk elektroniske tennere i større grad. Blant arbeidere uten erfaring med elektroniske systemer ble det gitt et inntrykk av at det virket komplisert å lære seg og tungvint å bruke til daglig. Det ble også observert en mulig trend der eldre arbeidere var generelt mer skeptiske enn de yngre, og det kan tenkes at skepsisen kan komme av at eldre arbeideres kunnskap og interesse for data- og teknologi generelt er mindre enn hos de yngre. Mange år i yrket og lang erfaring med bruk av kun ikke-elektriske og eventuelt elektriske systemer, kan også resultere i skepsis til det nye, hvor mange også syntes ikke-elektriske systemer fungerer godt nok.

Blant de yngre var det likevel ikke full enighet om at elektroniske systemer alltid er bedre, selv om det har flere ønskelige egenskaper. Det var flere ytringer om at også ikke-elektriske systemer kan være riktig til mange typer arbeider, og at et konsekvent krav om elektroniske tennere ikke var nødvendig. For eksempel ved arbeider på avsidesliggende områder med enkle salver kunne det godt vært brukt ikke-elektriske tennere, da det er raskere å arbeide med.

Når det kommer til arbeid med utfordrende salver og ved overdekking, er det større enighet om at elektroniske systemer har store fordeler fremfor ikke-elektriske. Den generelle oppfattelsen fra tilbakemeldinger fra sprengningsarbeidere var at de enten foretrekker elektroniske systemer, eller at de syntes begge systemene er gode, og at det foretrukne valget avhenger av arbeidsoppgaven.

Ut ifra kommentarer på RUH fra tunnelarbeidene med KBT var det et ønske om å gå vekk fra bruken av elektroniske tennere, grunnet mye problemer med avisolering av tennerledninger. Det ble senere innvilget et unntak fra kravet om elektroniske tennere nettopp i disse tunnelene, grunnet de spesielle geologiske som påfører spesielt stor påkjenning for isolasjonen på elektroniske tennere.

7.5. Utslipp av plastavfall ved deponi i maritimt miljø

I Rogfast-prosjektet vil plastavfall etter sprengning begrense valgfriheten, ved at det er innført strenge krav for å unngå at plastavfall flyter opp ved deponering av sprengstein i det maritime miljø. Ikke-elektriske sjokkslanger som ikke brenner opp under avfyring vil skape et stort problem med plastforurensing, på grunn av slangenes flyteevne. I praksis vil dette medføre at sprengsteinen må renskes for rester av plastslanger ved benyttelse av dagens ikke-elektriske system. Innføring av dette kravet vil derfor gjøre det økonomisk mindre gunstig å bruke ikke-elektriske tennere, og elektriske tennere gir store begrensninger i tunneltverrsnitt og dermed krever oppdeling av tverrsnittet. I tillegg vil utfordringer med vibrasjoner gi begrensninger ved bruk av elektriske tennere. Dermed antas det at entreprenørene vil anse elektroniske tennere som det beste valget i dette prosjektet.

8. Oppsummering og konklusjon

Dette kapittelet vil bestå av en kort oppsummering av oppgavens hovedinnhold og resultater, en konklusjon og en anbefaling for videre studier innenfor samme tema.

8.1. Oppsummering

Elektroniske tennere er fortsatt lite brukt i Norge, men det er flere klare tegn fra forskjellige aktører i bransjen om at det er et ønske om økt bruk. Tennsystemets avanserte sikkerhetsfunksjoner blir i stor grad utpekt som systemets største fordel i forhold til de andre systemene, men høye kostnader og begrenset erfaring har ført til at bruken hittil har vært begrenset.
For temaene som er omfattet i oppgaven, sikkerhet, tidsbruk og kostnader, er det likevel ikke noen klare tegn på at det ene systemet er bedre enn det andre, ut ifra de undersøkelsene og den empiri som har latt seg innhente.

8.1.1. Sikkerhet

Variasjon i detonasjonstidspunkt. Ved stor spredning på tennere må forsinkertiden økes, og kan gi risiko for brudd på ladestreng i hull på senere intervaller. Elektroniske tennere har svært liten spredning fra nominell forsinkertid, og erfaringen fra Jarlsbergtunnelen og fjellhallen i Gjøvik tyder på at elektroniske tennere minsker dette problemet.

Feilkilder er et vanskelig tema, da årsak til feil på en skutt salve er vanskelig å kartlegge. Det er registrert tilfeller av feil med tennere, men erfaringen innad i bransjen påpeker at brukerfeil er den største kilden til avvik. Som brukerfeil regnes alle forhold som med annen utførelse kunne vært unngått. Det er ikke påvist at valg av tennsystem vil påvirke dette i noen stor grad.

Forsagere og gjenstående hull er svært aktuell for tiden. Resultatene viser at heller ikke elektroniske systemer eliminerer problemet med uomsatt sprengstoff. Datagrunnlaget som har latt seg innhente er heller ikke godt nok til å vise klare forskjeller i det totale funn av forsagere. Et så lite datagrunnlag kan forårsake at enkelthendelser gjør store utslag.

Ut ifra de innsamlede data for uønskede hendelser, er det ikke påvist at det opptrer færre forsagere og hendelser med uomsatt sprengstoff med elektroniske tennere enn ved ikke-elektriske tennere. Innsamlet data over antall tennere brukt i forhold til antall forsagere registrert er det pr 10 000 tenner registrert 0,89 hendelser med funn av uomsatt sprengstoff på Rugtvedt-Dørdal. Inkluderes gjenstående hull, er tallet 1,31. På alle Nye Veiers prosjekter,

som er kilden som omfatter størst aktivitet, er tilsvarende tall 2,03. Tilsvarende er det 0,54 tilfeller av uomsatt sprengstoff og gjenstående hull fra prosjektene på Helgeland med ikke-elektriske tennere. Korrigeres dette mot at også koblingsblokker regnes som en tenner, blir dette tallet doblet. Med en mistanke om opptil 20% underrapportering vil antall hendelser være 1,3, nærmest det samme som Rugtvedt-Dørdal. Disse resultatene er basert på et lite antall enkeltprosjekter, og gir på den måten et dårlig statistisk grunnlag for å trekke konklusjoner.

RUH og erfaringer fra sprengningsarbeidere viser først og fremst at elektroniske tennere har svært små markedsandeler, og det er blant mange en viss skepsis mot å ta i bruk ny teknologi. Dette er dels grunnet i at det elektroniske tennsystemet for mange virker komplisert å sette seg inn i, og dels at mange er fornøyd med ikke-elektriske systemer. Blant de som nå har jobbet over lengere tid med elektroniske tennere, og har opparbeidet en viss erfaring med bruken, trekker det spesielt frem det avanserte systemet for å måle kontakt med tenner som en positiv egenskap ved dekking.

Plastavfall som havner i sjøen ble et omdiskutert tema etter problemene med sjokktubeslanger funnet på strendene etter arbeidet med Ryfast-forbindelsen. Det har siden vært gjort undersøkelser som viser at utslipp av plast med elektroniske tennere er mindre i mengde, men tenneledningen har også høyere total massetetthet enn vann, og vil ikke flyte opp på samme måte som sjokktubeslangene. Begrensning av flytende plastavfall har vært en forutsetning for at miljødirektoratet har godkjent påbegynnelse av Rogfast, hvor det også skal deponeres store mengder sprengstein i strandlinjen.

8.1.2. Tidsbruk

Elektroniske tennere er mer arbeidstidkrevende å arbeide med. Selv med et godt strukturert arbeidslag tar det lenger tid å klargjøre en salve med elektroniske tennere enn med ikke-elektriske tennere. Målinger utført ved normale produksjonsforhold viser at bunnlading og kobling av elektroniske tennere tar omkring 25-30% lenger tid enn ved bruk av ikke-elektriske systemer. For å fullføre arbeidet på samme tid, kreves en ekstra arbeider. I tunnel er det vist at tidsbruk for lading med elektroniske tennere er 63% ekstra enn for ikke-elektriske tennsystemer med bruk buntopptenning, som er en svært rask koblingsmetode.

Det ble observert at ved vanskeligere forhold, der det ble gjort ekstra tiltak for å sikre full opptenning av alle hull, tok koblingsarbeidet lenger tid med ikke-elektriske tennere. I andre

tilfeller, der koblingsarbeidet er relativt rett frem, vil det elektroniske systemet kreve ekstra ressurser. Estimatet som ble gjort, der det ble sagt at det med elektroniske tennere kreves en ekstra arbeider for å fullføre arbeidet på samme tid som med ikke-elektriske tennere stemmer godt overens med resultatene fra observasjonene.

8.1.3. Kostnader

Kostnadsberegningene på et prosjekt av tilsvarende størrelse som E18 – Rugtvedt-Dørdal, med estimert bruk av 102 950 tennere og uttak av 3 500 000fm3, viser at kostnadene for tennmidler vil bli dobbelt så store ved bruk av elektroniske tennere, enn med ikke-elektriske tennere. Kostnadene pr. fm3 er 2.07kr for ikke-elektriske og 4.08kr for elektroniske, ut ifra Oricas listepriser på tennere og nødvendig tilbehør.

En ekstra arbeider til omkring 750kr/time for klargjøringa av en salve med elektroniske tennere, vil for hvert sprengningsteam bli en stor ekstra kostnad i løpet av et langvarig prosjekt.

I prosjektet og arbeidsmåten som er observert, er det ikke gjort funn av direkte kostnadsreduserende effekter med elektroniske tennere som gjør opp for den ekstra kostnaden bruken medfører.

Forsagere og pilsalver har store variasjoner i omfang og alvorlighetsgrad, og det derfor vanskelig å anslå i hvilken grade dette påvirker merkostnadene. I de fleste tilfeller dreier forsagere seg om små funn av sprengstoff, som resulterer i en enkel jobb der bergsprenger blir tilkalt og tar med seg en sprengstoffpatron eller en bit detonerende lunte. I de alvorlige tilfellene, som opptrer sjeldent, men som kan resultere i person- og/eller materielle skader, ukesvis produksjonsstans og granskning av ulykkesårsak og omfattende opprydningsarbeider, vil de økonomiske konsekvensene kunne bli store. Det er dermed vanskelig å fastslå en kostnad på dette. Det er i tidligere forsøk vist gode resultater for å minske uomsatt sprengstoff med elektroniske tennere, men det er ikke gjort funn i denne oppgaven som støtter dette.

8.2. Konklusjon

Formålet med denne oppgaven er å se på ulike egenskaper med elektroniske og ikke-elektriske tennsystemer for utføring av sprengningsarbeider ved infrastrukturprosjekter i Norge. En kartlegging av ulike egenskaper kan være til god hjelp for å avgjøre hvilke tennsystemer som egner seg best for ulike typer arbeid.

Det foreligger grunn til å tro at elektroniske tennere gir målbare sikkerhetsgevinster fremfor bruk av ikke-elektriske tennere. Med elektronikk oppnås det bedre kontroll over detonasjons-rekkefølge og -nøyaktighet, som reduserer brudd i ladestrengen. Det avanserte målesystemet for å teste kontakt med alle tennere er også en positiv egenskap, spesielt ved overdekking. Bruken av elektroniske tennere har hittil vært begrenset, samtidig som en systematisk dokumentasjon av avvik inntil nylig har vært mangelfull. Dette gjør at datagrunnlaget, uavhengig av tennsystem, er svært begrenset, og gjør det vanskelig å trekke en entydig konklusjon ut fra det statistiske materialet.

Basert på grunnlaget som har vært tilgjengelig i denne oppgaven, tyder undersøkelsene på følgende:

Sikkerhet:

- Det er ikke påvist noen stor forskjell i antall forsagere satt opp mot forbruk av tennere. Basert på tidligere utførte forsøk tyder det på at elektroniske tennere vil redusere uomsatt sprengstoff, men av mottatt datagrunnlag kan dette ikke verifiseres.
- Det er ikke påvist at valg av tennsystemer kan redusere alvorlige tilfeller av forsagere eller gjenstående hull, eller om alvorlighetsgrad kan begrenses.
- Det er observert at det ved utfordrende forhold kan sees som nødvendig å gjøre ekstra tiltak med ikke-elektriske systemer, som å koble doble kretser for å sikre full opptenning.
- Det elektroniske systemet er målbart, og gjør det mulig å bytte skadde eller defekte tennere før skyting, eller koordinatfeste posisjonen til defekte tennere som ikke lar seg bytte. Dette oppleves som en trygghet for sprengningsarbeiderne.

Tidsbruk:

- Under normale omstendigheter og arbeider i dagen er det vist at det er mer tidkrevende å klargjøre en salve med elektroniske systemer: I observasjonene foretatt for denne oppgaven, ble det sett at arbeidet med elektroniske tennere tok 27% lenger tid enn ved bruk av ikke-elektriske systemer.
- Ved arbeider der det er ekstra viktig med full opptenning, hvor det blir gjort ekstra tiltak med kobling av doble kretser med ikke-elektriske tennere, kan elektroniske systemer være like effektivt å koble.
- En svakhet med elektroniske systemer slik de er i dag, er tilfeller av programvare-feil på avfyringsapparat, som skaper frustrasjon og merarbeid.

Kostnader:

- Kostnader ved innkjøp av elektroniske tennere utgjør det dobbelte av kostnadene med ikke-elektriske systemer. På et anlegg tilsvarende Rugtvedt-Dørdal, med beregnet uttak av 3,5 millioner bergmasser, er kostnadene beregnet til 14,3MNok med Oricas Unitronic600, mot 7,25MNok ved bruk av Orica Nonel Exel.
- Det er ikke gjort observasjoner som kan påvise at bruken av elektronikk i dag gir kostnadsbesparende resultater i arbeider over jord. Det er derimot observert at dette pr. i dag ikke står høyt i fokus på prosjektet som er observert, og at det kan gjøres større innsats med optimalisering når erfaringen med tennsystemet er større.

Andre forhold:

- Elektroniske tennere har hittil vært lite brukt, og det er derfor lite erfaring med dette sammenliknet med ikke-elektriske tennere. Det kan derfor tenkes at det kan gjøres større grad av optimaliseringer når erfaringen økes, og det utvikles bedre metodikk på bruken av elektroniske tennere.
- Ved deponering av sprengstein fra tunneldrift i strandsonen, er det erfart problemer med at sjokkslangerester flyter opp og skaper plastavfall i maritime miljøer. Elektroniske tennere inneholder mindre plast, samtidig som de har egenvekt som gjør at de ikke flyter opp.

- Det er erfart en viss skepsis blant sprengningsarbeiderne mot en overgang til elektronikk, og det kan tenkes at økt erfaring og videre utvikling av systemet vil kunne gi positive gevinster.

Analysen av resultatene gir ingen klare svar på når det vil være hensiktsmessig for entreprenøren å bruke elektroniske systemer istedenfor ikke-elektriske, da datagrunnlaget er for mangelfullt. Basert på forventet resultater fra tidligere utførte forsøk og observasjoner, er det også tvilsomt at resultatene som er innhentet er representative for generelle anbefalinger av tennsystem, grunnet de store variasjonene i arbeidsoppgaver og forhold fra prosjekt til prosjekt.

Det tyder likevel på at elektroniske tennere har sikkerhetsfunksjoner og sprengningstekniske egenskaper, som med mer erfaring og større fokus på å utnytte mulighetene for optimalisering, kan gjøre det mer attraktivt å benytte dette systemet. Det tyder også på at bransjen i stor grad ønsker større bruk av elektroniske tennere, men at systemene slik de er i dag fortsatt er noe ustabile og skjøre til at de er det «vidunderproduktet» som det i flere tilfeller blir fremstilt som.

8.3. Videre arbeider

Under arbeidene med å se på antall forsagere og gjenstående hull med de ulike tennsystemene ble det oppdaget at det i liten grad gjøres en skikkelig dokumentering av hendelser som kan brukes til å forklare årsak og mulige tiltak. Av DSB ble det påpekt at dataen de mottar i forbindelse med en RUH ofte mangler viktige opplysninger for å finne en årsakssammenheng. Dette ble begrunnet både i en dårlig mal på rapportene, men også fordi det i mange tilfeller legges lite arbeid utfyllelse av rapporten. Mangelfull og vanskelig tilgjengelig data har medført stor usikkerhet i oppgavens resultater, og ved videre arbeider med temaet bør det legges vekt på å forbedre kvaliteten på, og øke mengden av grunnlagsdata, spesielt for ikke-elektriske systemer. Nye Veier fører statistikk fra alle sine prosjekter, og er på den måten i gang med dette for elektroniske systemer.

Det ble også observert at elektroniske tennere ble brukt omtrent på samme måte som ikke-elektriske tennere, og at det pr. i dag ikke blir lagt store ressurser i å optimalisere bruken av elektronikk. Dette er delvis begrunnet i lite tidligere erfaring med systemet, og delvis nødvendig intensiv fremdrift på prosjektet for å overholde tidsfrister. Det er vist til relativt gode resultater ved optimalisering i steinbrudd, men ut ifra observasjonene i utførte oppgave er det ikke klart i hvilken grad optimalisering vil kunne være lønnsomt både for økonomien og fremdriften. Det kan derfor være aktuelt å se mer på mulig optimalisering av salve, for å se om det går an å dra ned kosten av arbeidet som følger en salve. Et aktuelt tema er optimalisering av bormønster, for å se på muligheten for å redusere sprengstofforbruk eller forbedre fragmentering.

Referanser

Das Sharma, P., 2009. Advanced Techniques in Drilling and Blasting [WWW Document]. Issuu. URL https://issuu.com/sharmapd1/docs/advanced_techniques_in_drilling_blasting (accessed 6.7.18).

Andersen, G., 2008. Metode og forskningsdesign [WWW Document]. Holbergprisen. URL https://www.holbergprisen.no/holbergprisen-i-skolen/metode-og-forskningsdesign.html (accessed 5.7.18).

Austin Norge, n.d. Rockstar II - Austin Norge [WWW Document]. URL http://www.austin.no/produkter/tennsystem/elektrisk/rockstar-ii.html (accessed 6.6.18).

BfF, 2017. Nullvisjonen, gjenstående sprengstoff-forsagere. Bransjeråd Fjellsprengning. URL http://nff.no/wp-content/uploads/2017/09/Forsagere-Notat-fra-BfF-etter-møtet-20170126.pdf

Brekke, M., 2017. Personlig samtale med Martin Brekke, skytebas i Vestfold Fjellboring.

Cardu, M., Giraudi, A., Oreste, P., 2013. A review of the benefits of electronic detonators. Rem Rev. Esc. Minas 66, 375–382. https://doi.org/10.1590/S0370-44672013000300016

Cooper, P.W., 1996. Explosives Engineering. Scribd. ISBN 978-0-471-18636-6, URL https://www.scribd.com/doc/83494596/Explosives-Engineering-Paul-W-Cooper-1996

DSB, n.d. Uhell med farlig stoff [WWW Document]. Dir. Samfunnssikkerhet Og Beredsk. URL https://www.dsb.no/menyartikler/statistikk/uhell-med-farlig-stoff/ (accessed 2.20.18).

dsb.no, 2018. Uhell med eksplosiv vare [WWW Document]. URL https://innmelding.dsb.no/rapportering/?locale=nb_NO&schema=uhelleksplosivvare#Innledning (accessed 5.23.18).

Dyno Nobel, 2015. Dyno Nobel Electronic Detonators - YouTube [WWW Document]. URL https://www.youtube.com/watch?v=vMgbBJSQ6Xw (accessed 11.30.17).

Ecofact, 2015. Ryfast utslipp - Kartlegging av omfang i Ryfylkebassenget. URL https://www.fylkesmannen.no/Documents/Dokument%20FMRO/Miljø/Soknad%20og%20Loyve/Ryfast%20utslipp%20-%20Kartlegging%20av%20omfang%20i%20Ryfylkebassenget%20(Ecofact%2004.05.2015).pdf

Fagerheim, H., Neby, A., 2018. Intervju med Harald Fagerheim og Arild Neby.

Hoffmann, T., 2013. Hva kan vi bruke kvalitativ forskning til? [WWW Document]. forskning.no. URL https://forskning.no/sosiologi/2013/09/hva-kan-vi-bruke-kvalitativ-forskning-til (accessed 5.7.18).

Homleid, Å., 2018. AF har satt norgesrekord ved Nye Veier-prosjekt [WWW Document]. Byggno - Byggeindustrien. URL http://www.bygg.no/article/1341528 (accessed 5.2.18).

Hustveit, T.K., 2018. Telefonintervju Thor Kristian Hustveit, Rådgiver sprenging, NyeVeier.

Isdahl, P., 2018a. Intervju Per Isdahl, DSB.

Isdahl, P., 2018b. DSBs rapporter om uønskede hendelser med sprengstoff.

Jensen, P., 2018. Teknisk veiledningssamtale med Petter Jensen.

Jensen, P., Hansen, T.F., 2010. Rapport fra forsøk med elektroniske tennere og detonerende lunte ved driving av Jarlsbergtunnelen. URL http://www.austin.no/media/11/rapport-elektroniske-tennere-i-kontur.pdf

Johansen, F., Giæver, H., Opdahl, T., 2000. Kvalitataiv metode [WWW Document]. URL http://www.giaever.com/sosiologi/KM.htm (accessed 5.7.18).

Kvilten, M., 2018. Samtale med Morgan Kvilten, skiftleder sprenging Rugtvedt-Dørdal.

Lie, Ø., 2013. Hunder fant over fem kilo dynamitt ved Statnetts trafostasjon [WWW Document]. Tu.no. URL https://www.tu.no/artikler/hunder-fant-over-fem-kilo-dynamitt-ved-statnetts-trafostasjon/233192 (accessed 5.11.18).

Longva, P., Tverstøl, A., 2014. Finansdepartementets Rundskriv (R-109/14). URL https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/fin/vedlegg/okstyring/rundskriv/faste/r_109_2014.pdf

lovdata.no, 2018. Forskrift om sivil håndtering av eksplosjonsfarlige stoffer (eksplosivforskriften) - Lovdata [WWW Document]. URL https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-15-844#KAPITTEL_10 (accessed 5.30.18).

Lusk, B., Silva, J., Eltschlager, K., 2013. Field Testing and Analysis of Blasts Utilizing Short Delays with Electronic Detonators. URL https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/OSMREReports/2013ElectronicDetonatorsFinalLusk092413.pdf

Miller, D., Martin, D., 2017. A review of the benefits being delivered using electronic delay detonators in the quarry industry. URL https://www.researchgate.net/publication/242116559_A_review_of_the_benefits_being_delivered_using_electronic_delay_detonators_in_the_quarry_industry

Morstad, K., 2018. Intervju med Kjetil Morstad, Regionalsjef Orica Norge.

Neby, A., 2005. NA-rundskriv 2005/16 - Tiltak for å unngå sprengningsulykker. URL https://www.vegvesen.no/_attachment/219516/binary/417916

Neby, A., Kristiansen, J., Hauknes, I., Bruland, A., 2011. Leksjon 3 - Bergmekanikk. URL http://docplayer.me/22418701-Leksjon-3-bergmekanikk.html

Nederskår, A., 2017. Feltbesøk på Hæhres prosjekt E18 Rudtvedt-Dørdal, med skytebas Andreas Nederskår.

NFF, 2017. Tunnelstatistikken fra NFF 2017. URL http://nff.no/wp-content/uploads/2014/02/Tunnelstatistikken-2017.pdf

NFF, 2012. Konturkvalitet i sprengte tunneler. URL http://nff.no/wp-content/uploads/2014/01/Teknisk_rapport_12.pdf

Norconsult, 2017a. Testforsøk - spredning av plast i sjø fra utfylte tunnelmasser skutt med elektroniske tennere. URL https://www.fylkesmannen.no/Documents/Dokument%20FMRO/Miljø/Høyringsdokument/E39%20Rogfast/Utfyllingssoknad%20Kvitsoy%20E02%20Rogfast%20-%20vedlegg.pdf

Norconsult, 2017b. Utfyllingssøknad Kvitsøy - entreprise E02. URL https://www.fylkesmannen.no/Documents/Dokument%20FMRO/Miljø/Høyringsdokument/E39%20Rogfast/Utfyllingssoknad%20Kvitsoy%20E02%20Rogfast.pdf

NTNU, n.d. Finne kilder - Wiki (Insida NTNU) [WWW Document]. URL https://innsida.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/Finne+kilder (accessed 10.1.17).

Olsen, V., 2002a. Kompendium i anleggsteknikk Fjellsprengningsteknik, Generell sprengningsteori.

Olsen, V., 2002b. Kompendium i anleggsteknikk Fjellsprengningsteknik, Tennmidler.

Orica, 2017. TEKNISK INFORMASJON - Exel™ LP. URL http://www.oricaminingservices.com/download/file_id_21596/

Orica, 2014. Orica Produktkatalog. URL https://issuu.com/proprint/docs/v4__prod_kat_final_flip_pdf

Orica, 2007a. NONEL Systemet. URL https://www.oger.is/static/files/Sprengiefni/Upplysingar/Exel/Nonel_Systemet_juni_2007.pdf

Orica, 2007b. Teknisk informasjon - Tennapparat for NONEL. URL https://www.oger.is/static/files/Sprengiefni/Upplysingar/Fylgihlutir/DynoStart2/DynoStart-juni_2007.pdf

Sander, K., 2016. Eksplorerende design. eStudie.no. URL https://estudie.no/eksplorerende-design/

Sandvin, B., 2017. Kontraktskrav om bruk av elektroniske tennere for sprengningsarbeider. URL http://5oe3r39nnidohaa2uiso8xpy.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2017/11/svv_rundskriv_tennere.pdf

Smirnov, V.V., 1968. A method of measuring the crack propagation velocity in a rock specimen under impact load. Sov. Min. 4, 260–263. https://doi.org/10.1007/BF02501548

Solum, J.I., 2016. Elektriske tennere - fordeler og ulemper. URL http://nff.no/wp-content/uploads/2016/04/12-Solum-Elektriske-Tennere.pdf

Statens Vegvesen, 2016a. Sprengningsulykke på E16-prosjekt [WWW Document]. URL https://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/Lokalt/Region+%C3%98st/sprengningsulykke-p%C3%A5-e16-prosjekt (accessed 2.21.18).

Statens Vegvesen, 2016b. Arbeidet på E16 ved Klosbøle startet igjen [WWW Document]. Statens Vegv. URL https://www.vegvesen.no/Europaveg/E16valdres/Nyhetsarkiv/arbeidet-p%C3%A5-e16-ved-klosb%C3%B8le-startet-igjen (accessed 4.17.18).

Statens Vegvesen, 2013. E18 Rugtvedt - Dørdal, Bamble Reguleringsplan med konsekvensutredning. URL https://www.nyeveier.no/media/1682/e18-planhefte_1_rugtvedt-doerdal_15februar2013.pdf

Statens Vegvesen, 2012. Rystelser fra sprenging [WWW Document]. Statens Vegv. URL https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/ringvegvest/Naboinformasjon/Rystelser+fra+sprenging (accessed 4.4.18).

Statens Vegvesen Region vest, Prosjektavdelinga, 2016. Reguleringsplan, Prosjekt: E39 Rogfast, Parsell: Veg i dagen på Kvitsøy, plan 1144_2016002. URL https://www.vegvesen.no/_attachment/1560823/binary/1137518?fast_title=Planbeskrivelse.pdf

Tekst: De nasjonale forskningsetiske komiteene Sist oppdatert: 15, 2010. Kvalitative og kvantitative forskningsmetoder – likheter og forskjeller [WWW Document]. Etikkom. URL http://www.etikkom.no/forskningsetiske-retningslinjer/Medisin-og-helse/Kvalitativ-forskning/1-Kvalitative-og-kvantitative-forskningsmetoder--likheter-og-forskjeller/ (accessed 5.7.18).

Venåsen, T., 2018. Teknisk veiledningssamtale.

Venåsen, T., Stensvik, D., 2018. Samtale med Tore Venåsen og Dan Stensvik, BetonmastHæhre.

Zou, D., 2017. Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering. Springer Singapore, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1989-0