

Edvard Dahl Furunes
Sigurd Strype

Vekseldrift i tunnelbygging

Byggetid og usikkerhet

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Amund Bruland
Juni 2022

Edvard Dahl Furunes
Sigurd Strype

Vekseldrift i tunnelbygging

Byggetid og usikkerhet

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Amund Bruland
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Sammendrag

Bakgrunnen for masteroppgaven er forankret i et uttalt behov fra bygge- og anleggsbransjen for en bransjeomforent tunnelbyggetidsmodell for mer korrekt beregning av tunnelbyggetid. Feil tunnelbyggetid er grobunn til konflikter. *Tunnelbyggetid 2021* er en slik modell, og inneholder en funksjonalitet som beskriver effektiviteten til vekseldrift kontra enstuffsdrift i form av en vekseldriftfaktor. Denne vekseldriftfaktoren beregnes uten å hensynta usikkerhet.

Masteroppgavens hensikt er å avdekke om inkludering av usikkerhet i beregningen av vekseldriftfaktoren har innvirkning på korrektheten til byggetiden. Det er også ønskelig å undersøke om endrede forhold og mengder påvirker vekseldriftfaktoren og dermed tunnelbyggetiden. Forskningsspørsmålene som legges til grunn for masteroppgaven er: (1) *Hvilke kontraktuelle elementer er særlig utfordrende i forbindelse med vekseldrift og tunnelbyggetid?*; (2) *Hvordan kan vekseldriftfaktoren bestemmes under usikkerhet, og har denne usikkerheten eventuelt noen betydning?*; og (3) *Hva påvirker vekseldriftfaktoren, og hvordan påvirkes størrelsen på den?*

Forskningsspørsmålene er løst med metodene litteraturstudie, intervju og simuleringsstudie.

(1) Risiko i tunnelkontrakter kan tilknyttes grunnforhold og tunnelbyggetid, og kan være særlig høy ved vekseldrift. Uenigheter mellom kontraktspartene kan oppstå når de ikke enes om hvem som er ansvarlig for økte mengder, og i kontrakter med komprimert byggetid.

(2) Vekseldriftfaktor under usikkerhet kan bestemmes ved diskret hendelsessimulering. Dette gjøres gjennom *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* og *Simuleringsmodell – Vekseldrift* med *Rammeverk – Vekseldriftfaktor*. Inkluderes usikkerhet øker byggetiden og vekseldriftfaktoren, og fremtidige beregninger av vekseldriftfaktor bør inkludere usikkerhet.

(3) Vekseldriftfaktoren avhenger av forholdet mellom varigheten til boreriggsløyfen og varigheten til aktivitetene utenfor boreriggsløyfen. Økt tunneltverrsnitt reduserer vekseldriftfaktoren, gitt at det er forinjeksjon. Økte bolte- og sprøytebetongmengder påvirker vekseldriftfaktoren på en motstridende måte og nuller i stor grad ut hverandre. Økte mengder forinjeksjon gir økende vekseldriftfaktor. Vekseldriftfaktoren er mest følsom for endrede mengder forinjeksjon.

Videre arbeid med simuleringsmodellene bør omfatte: innhenting av data, slik at usikkerhet og sannsynlighetsfordeling kan tilordnes med større presisjon; tung sikring; begrensninger som skytetider og skiftordninger; og andre vekseldriftvarianter.

Abstract

The master's thesis' basis rests on a stated need by the construction industry for an industry united model for calculating tunnel construction time more correct. Wrong construction time is a cause of conflict. *Tunnelbyggetid 2021* is such a model and holds a functionality that describes the efficiency of alternating excavation contra one face excavation as an alternating excavation factor. This alternating excavation factor is not calculated under uncertainty.

The master's thesis' purpose is to deduce whether including uncertainty in calculations of the alternating excavation factor affects the correctness of tunnel construction time. It is also desirable to investigate whether changes in conditions and quantities affect the alternating excavation factor and thus tunnel construction time. The research questions that the master's thesis is based on are: (1) *What contractual elements are particularly challenging regarding alternating excavation and tunnel construction time?*; (2) *How to decide the alternating excavation factor under uncertainty, and does this uncertainty have any significance?*; and (3) *What affects the alternating excavation factor, and how is its magnitude affected?*

The research questions are solved by a literature study, an interview, and a simulation study.

(1) Risk in tunnel contracts can be assigned to ground conditions and tunnel construction time and may be especially high in alternating excavation. Discords among contract parties may arise when they differ on who is liable for increased quantities and in tight schedule contracts.

(2) The alternating excavation factor under uncertainty can be decided by discrete event simulation. This is done through *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* and *Simuleringsmodell – Vekseldrift* with *Rammeverk – Vekseldriftfaktor*. Including uncertainty increases construction time and the alternating excavation factor, and future calculations should include uncertainty.

(3) The alternating excavation factor depends on the relationship between the duration of the drilling jumbo-loop and the duration of activities outside the drilling jumbo-loop. Increased tunnel cross-section reduces the alternating excavation factor, assuming grouting. Increased bolt and shotcrete quantities has a conflicting effect on the alternating excavation factor and may null each other out. Increased grouting quantities give a higher alternating excavation factor. The alternating excavation factor is most sensitive to altered grouting quantities.

Further work with the simulation models should include: data collection, so uncertainty and probability distributions can be assigned with more precision; heavy rock support; restrictions such as times for blasting and shift arrangements; and other alternating excavation variants.

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på studiet Bygg- og miljøteknikk ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim, og er skrevet våren 2022. Oppgaven er et samarbeid mellom studentene Edvard Dahl Furunes og Sigurd Strype, og den utgjør 30 studiepoeng for hver av oss.

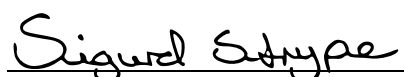
Edvard har faginteressen sin innenfor prosjektledelse, mens Sigurd sin faginteresse ligger innenfor anleggsteknikk. Vi ønsket å samarbeide med masteroppgaven til tross for forskjellen i faginteresse, og ble derfor forelagt problemstillingen som ligger til grunn i oppgaven. Derfor ble masteroppgaven en kombinasjon av disse fagområdene, og den overordnede tematikken ble «vekseldrift i tunnel» og «tidsplanlegging under usikkerhet». Tidlig viste det seg at forskjellen i faginteresse ikke var en utfordring, men snarere en styrke. Det faktiske behovet fra bransjen som er bakgrunnen for masteroppgaven medførte også at arbeidet føltes ekstra givende.

Det må først og fremst rettes en særskilt takk til vår eminente veileder, professor Amund Bruland. Han har bidratt med kyndig veiledning i arbeidet, samt innholdsrike samtaler, og ikke minst digresjoner, om alt fra tunnelprosjekter over hele vårt langstrakte land til meitemark og bier ved en kirkegård i Stavanger. Meitemark og bier altså, ikke blomster og bier. Førsteamanuensis Frode Drevland må også takkes, da han bidro med forløsende kunnskap om modellering og simulering, som masteroppgaven tross alt er tuftet på. Intervjuobjektene har i tillegg bidratt med essensielle svar til bruk i arbeidet med masteroppgaven. Skulle gjerne takket dere med navn, men vi må nøye oss med å takke dere samlet og anonymt. Hjertelig mange takk til alle dere.

Avslutningsvis må nære og kjære, både venner og familie, takkes for å ha holdt ut med to til tider stressede studenter gjennom fem år på NTNU, især i den avsluttende fasen med masteroppgaven. Flere av disse har tatt seg tid til å bidra med korrekturlesing av oppgaven. Denne hjelpen settes det veldig pris på.

Trondheim, juni 2022


Edvard Dahl Furunes


Sigurd Strype

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	i
Abstract.....	iii
Forord	v
Figurliste	xi
Tabelliste.....	xiii
Begrepsforklaring	xv
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål og forskningsspørsmål	2
1.3 Avgrensninger	3
1.4 Struktur	4
2. Teori	5
2.1 Kontrakt.....	5
2.1.1 Praksis og risikofordeling.....	5
2.1.2 Karakteristika ved norske enhetspriskontrakter	7
2.1.3 Håndtere varierende mengder – «100 % regelen» og «ekvivalenttidsregnskap».....	9
2.2 Vekseldrift i tunnel	10
2.3 Vekseldriftfaktor og enhetstider for tunneldrift.....	12
2.3.1 Generelt om teoretisk grunnlag for beregning av vekseldriftfaktor	12
2.3.2 Tilrettelegging for tunneldrift.....	14
2.3.3 Enhetstider for tunneldriving og justeringsfaktor for vekseldrift.....	14
2.3.4 Enhetstider for rigg, boring, lading, ventilasjon, rensk og utlasting	16
2.3.5 Enhetstider for sikring	28
2.4 Salvesyklus	35
2.4.1 Generelt om salvesyklus.....	35
2.4.2 Forinjeksjon.....	35
2.4.3 Boring.....	36
2.4.4 Lading	36
2.4.5 Sprengning	36
2.4.6 Ventilering.....	37
2.4.7 Utlasting	38
2.4.8 Rensk.....	38
2.4.9 Sikring	38
2.4.10 Bakstuff	39
2.5 Nedbrytning og planlegging av prosjekter og aktiviteter	40
2.5.1 Prosjektplanlegging.....	40
2.5.2 Prosjektnedbrytningsstruktur	40
2.5.3 Nettverksplanlegging	42

2.6 Tidsplanlegging under usikkerhet.....	43
2.6.1 Håndtering av usikkerhet	43
2.6.2 System, modellering og simulering.....	44
2.6.3 Beregningsmetoder i bygg og anlegg.....	48
2.6.4 Statistikk.....	53
3. Metode.....	59
3.1 Litteraturstudie.....	59
3.1.1 Metoden.....	59
3.1.2 Gjenbruk av litteraturstudien fra prosjektoppgaven	60
3.1.3 Evaluering av metoden.....	61
3.2 Intervju	61
3.2.1 Metoden.....	62
3.2.2 Gjenbruk av intervjuene fra prosjektoppgaven	63
3.2.3 Evaluering av metoden.....	63
3.3 Simuleringsstudie	64
3.3.1 Definere problemet.....	64
3.3.2 Definere en konseptuell modell.....	65
3.3.3 Validering av konseptuell modell.....	71
3.3.4 Bygge en simuleringsmodell.....	71
3.3.5 Gjennomføre testsimuleringer	88
3.3.6 Validering av simuleringsmodell	89
3.3.7 Design av eksperimentene.....	90
3.3.8 Gjenbruk av simuleringsmodellen fra prosjektoppgaven.....	92
3.3.9 Evaluering av metoden.....	92
3.4 Gjenbruk av materiale fra prosjektoppgaven.....	93
4. Resultat	95
4.1 Intervju	95
4.1.1 Kontrakt.....	95
4.1.2 Vekseldrift.....	101
4.1.3 Salvesyklus.....	108
4.2 Simuleringsmodellene	111
4.3 Vekseldriftfaktorer.....	112
4.3.1 Deterministisk versus stokastisk	114
4.3.2 Tripplestimat.....	115
4.3.3 Variasjon i betingelsene	116
4.3.4 Variasjon i både tunnallengde og injeksjonsmengde	123

5. Diskusjon	127
5.1 Kontraktuelle elementer	127
5.1.1 Generelt	127
5.1.2 Risiko	127
5.1.3 Håndtering av mengder og tunnelbyggetid	129
5.1.4 Uenigheter og konflikter	131
5.1.5 Potensielle løsninger	132
5.2 Vekseldrift og usikkerhet.....	133
5.2.1 Definisjon av vekseldrift	134
5.2.2 Fremdrift og kostnader	135
5.2.3 Hensiktsmessighet og fordeler	136
5.2.4 Simuleringsmodellen.....	138
5.2.5 Deterministisk eller stokastisk.....	140
5.2.6 Tripplestimat.....	142
5.3 Vekseldriftfaktoren	143
5.3.1 Påvirkning av vekseldriftfaktoren	143
5.3.2 Variasjon i betingelsene	144
5.3.3 Sammenligning av vekseldriftfaktorer	155
6. Konklusjon.....	159
7. Videre arbeid.....	161
Litteraturliste	163
Vedlegg.....	169

Figurliste

Figur 2.1: Risikofordelingsprinsipper	7
Figur 2.2: Vekseldrift via tverrslag	11
Figur 2.3: Vekseldrift i to parallelle tunneler langs tidsakse	12
Figur 2.4: Illustrasjon av tidsbestemmende faktor	13
Figur 2.5: Tid til tunneldriving	15
Figur 2.6: Vekseldriftfaktorer	16
Figur 2.7: Tid til rigg	17
Figur 2.8: Netto borsynk som funksjon av DRI	18
Figur 2.9: Netto borsynk som funksjon av borhulldiameter	19
Figur 2.10: Tid til flytt per hull	19
Figur 2.11: Frekvens på borkronebytter	20
Figur 2.12: Faktor for mangel på samtidighet	21
Figur 2.13: Tidsbestemmende ladetid og korreksjonsfaktor boret lengde	24
Figur 2.14: Tidsbestemmende ventilasjonspause	25
Figur 2.15: Tid til rensk	25
Figur 2.16: Netto syklustid for hjullaster	26
Figur 2.17: Skuffestørrelse for hjullaster	27
Figur 2.18: Tid til boltemontering	29
Figur 2.19: Tid til sprøytebetong	30
Figur 2.20: Tid til forbolting	31
Figur 2.21: Tid til sonderboring	32
Figur 2.22: Tid til injeksjon	33
Figur 2.23: Korreksjon for injeksjon parallelt med skjermboring	34
Figur 2.24: Korreksjon for injeksjon etter skjermboring	34
Figur 2.25: Salvesyklus, modifisert etter Heiniö	39
Figur 2.26: Eksempel på WBS	41
Figur 2.27: To parallelle, usikre veger	44
Figur 2.28: Måter å studere et system	45
Figur 2.29: Simuleringsmodeller langs tre dimensjoner	46
Figur 2.30: Steg i en simuleringsstudie	48
Figur 2.31: Eksempel på et standard aktivitetssyklusnettverk	51
Figur 2.32: Eksempel på aktivitetssyklusnettverk fra EZStrobe	51
Figur 2.33: Eksempel på gammafordeling	55
Figur 3.1: Konseptuell modell – Enstuffsdrift	67
Figur 3.2: Konseptuell modell – Vekseldrift	69

Figur 3.3: Konseptuelt rammeverk – Vekseldriftfaktor	70
Figur 3.4: Vegvalg for måter å studere et system på, modifisert etter Law	71
Figur 3.5: Klassifisering av simuleringsmodell, modifisert etter Babulak og Wang	73
Figur 3.6: Oversiktsbilde Simuleringsmodell – Enstuffsdrift	74
Figur 3.7: Skjerm bilde av input-parameter Simuleringsmodell – Enstuffsdrift.....	75
Figur 3.8: Skjerm bilde av resultater Simuleringsmodell – Enstuffsdrift	76
Figur 3.9: Skjerm bilde av utskrift av resultatene etter simulering	76
Figur 3.10: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 1.....	78
Figur 3.11: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 2.....	79
Figur 3.12: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 3.....	81
Figur 3.13: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 4.....	82
Figur 3.14: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 5.....	83
Figur 3.15: Oversiktsbilde Simuleringsmodell – Vekseldrift	84
Figur 3.16: Skjerm bilde av input-parameter Simuleringsmodell – Vekseldrift.....	85
Figur 3.17: Skjerm bilde av resultater Simuleringsmodell – Vekseldrift	85
Figur 3.18: Simuleringsmodell – Vekseldrift, borerigg	86
Figur 3.19: Simuleringsmodell – Vekseldrift, lastesystem	87
Figur 3.20: Rammeverk – Vekseldriftfaktor.....	88
Figur 4.1: Standardtilfellet i simuleringsmodellene.....	114
Figur 4.2: Vekseldriftfaktor med varierende tunnallengde og injeksjon	125
Figur 5.1: Vekseldriftfaktorer ved variasjon i både tunnallengde og injeksjonsmengde.....	153
Figur 5.2: Sammenheng mellom vekseldriftfaktor og varighet i og utenfor boreriggsløyfen	154
Figur 5.3: Eksisterende vekseldriftfaktorer.....	156

Tabelliste

Tabell 1.1: Oppgavens struktur.....	4
Tabell 2.1: Beregning av tider relatert til boring.....	22
Tabell 2.2: Skuffefyllingsfaktor for hjullaster	27
Tabell 2.3: Fikserte tider per bil for hjullaster	28
Tabell 2.4: Fikserte tider på deponi	28
Tabell 2.5: Omregningsfaktorer for ulike masser	28
Tabell 2.6: De grunnleggende modelleringselementene i EZStrobe.....	52
Tabell 3.1: TONE-prinsippet	60
Tabell 3.2: Sammenligning Simuleringsmodell – Enstuffsdrift og Tunnelbyggetid 2021	90
Tabell 3.3: Skalering av beregnet varighet	92
Tabell 4.1: Intervjuobjektene	95
Tabell 4.2: Intervjuobjekt 3 – anslag på realistisk varighet til aktiviteter i salvesyklusen.....	109
Tabell 4.3: Intervjuobjekt 5 – anslag på varigheter til aktivitetene i salvesyklusen	110
Tabell 4.4: Forutsetningene i standardtilfellet	113
Tabell 4.5: Deterministiske versus stokastiske varigheter	115
Tabell 4.6: Resultater fra deterministisk versus stokastisk	115
Tabell 4.7: Varigheter fra tripplestimat.....	116
Tabell 4.8: Resultater fra tripplestimat.....	116
Tabell 4.9: Ulike situasjoner	117
Tabell 4.10: Varigheter til aktivitetene for ulike tunnallengder.....	118
Tabell 4.11: Resultater fra varierende tunnallengde	118
Tabell 4.12: Endret tverrsnitt - parameterendringer.....	119
Tabell 4.13: Varigheter til aktivitetene for ulike tverrsnitt	119
Tabell 4.14: Resultater fra varierende tverrsnitt	120
Tabell 4.15: Endret bolte- og sprøytebetongmengde - parameterendringer.....	120
Tabell 4.16: Varigheter til aktivitetene for ulike bolte- og sprøytebetongmengder.....	121
Tabell 4.17: Resultater fra varierende bolte- og sprøytebetongmengder	121
Tabell 4.18: Endret injeksjonsmengde - parameterendring	122
Tabell 4.19: Varigheter til aktivitetene for ulike injeksjonsmengder.....	122
Tabell 4.20: Resultater fra varierende injeksjonsmengder.....	123
Tabell 4.21: Resultater fra varierende injeksjonsmengde og tunnallengde	123
Tabell 4.22: Resultater fra 2 000 meter tunnallengde med varierende injeksjonsmengde.....	124
Tabell 4.23: Resultater fra 4 000 meter tunnallengde med varierende injeksjonsmengde.....	124
Tabell 4.24: Resultater fra 6 000 meter tunnallengde med varierende injeksjonsmengde.....	125
Tabell 5.1: Utnyttelsesgrad - Vekseldrift ved varierende tunnallengde.....	146

Tabell 5.2: Byggetid for ulike tunnallengder og antall lastebiler.....	146
Tabell 5.3: Endring i mest sannsynlige varighet for boreriggsløyfen	148
Tabell 5.4: Vekseldriftfaktorer for ulike mengder	155
Tabell 5.5: Eksisterende vekseldriftfaktorer og beregnede fra simuleringsmodell.....	156
Tabell 5.6: Vekseldriftfaktorer for andel med injeksjon.....	157

Begrepsforklaring

Vekseldrift – Vekselvis drift på to stuffer med én utstyrspakke (Statkraft, 2010).

Stuff – Arbeidsfront i tunnel der det foregår boring, sprengning og utlasting (SVV & Bane NOR, 2020).

Maskin-/utstyrspakke – Et sett maskiner/utstyr.

Kutt – Åpning i stuffen som resten av salven kan sprengre mot (Bruland, 2013d).

Sonderboring – Borer lengre hull for å kartlegge bergmasse og potensiell vanninnlekkasje (Bruland et al., 1999).

Tverrslog – Ekstra tunnel for driving av hovedtunnel (SVV & Bane NOR, 2020), eventuelt forbindelse mellom to parallelle tunneler.

Borsynk – Netto inndrift ved boring (Bruland, 2013a).

Sprengbarhet – Mengde sprengstoff som må brukes for å oppnå en gitt fragmentering (Neby et al., u.å.).

Drivelag – Arbeidslag/skift, et sett mennesker som arbeider sammen på stoff.

Bas – Leder for et arbeid og arbeidslag (Nilstun, 2021), her: leder for drivelaget og arbeidet på stoff.

Bakstoffbil – Bil med påmontert arbeidsplattform til innredning i tunnel (AMV, u.å.).

Vederlag – Overgangen mellom tunnelveggen og tunnelhengen («tunneltaket»).

Stokastisk – En størrelse som varierer tilfeldig innenfor utfallsrommet (Drevland et al., 2005).

Deterministisk – Blir brukt om faste verdier (Klakegg, 1993).

Sannsynlighetsfordeling – Sannsynligheter den stokastiske variabelen tar for ulike verdier (Tjelmeland, 2017).

1. Innledning

Denne delen presenterer bakgrunnen for masteroppgaven, forskningsspørsmålene, avgrensninger og strukturen.

1.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for masteroppgaven er forankret i et uttalt behov fra bygge- og anleggsbransjen for en bransjeomforent tunnelbyggetidsmodell for beregning av tunnelbyggetid.

Entreprenørforeningen for bygg- og anlegg (EBA) og Statens vegvesen (SVV) utformet et mandat for utvikling av en slik modell etter et kontaktmøte mellom partene. Denne tunnelbyggetidsmodellen har til hensikt å beregne tunnelbyggetiden på en mer korrekt måte, og har potensial til å forebygge konflikter mellom involverte aktører i tunnelprosjekter (Homleid, 2021). Tunnelbyggetidsmodellen som ble lansert i 2021 er blitt akseptert av Statens vegvesen og er allerede blitt tatt i bruk, blant annet ved Rogfast (Strand, 2022). Videre omtales denne modellen som *Tunnelbyggetid 2021*.

I forlengelsen av aspektet med konflikter i tunnelbransjen, spiller kontraktuelle utfordringer tilknyttet vekseldrift og tunnelbyggetid en sentral rolle, blant annet risiko og ekvivalenttidsregnskapet og dets bruk. Dermed er det nødvendig å utrede dette for å kunne plassere behovet for mer korrekt beregning av tunnelbyggetid i kontekst. Generelt er det en oppfatning i bransjen om at bruken av ekvivalenttidsregnskapet ikke medfører en realistisk byggetid dersom endrede forhold som påvirker mengdene skulle oppstå (Homleid, 2021). Byggetidsfristen samsvarer da ikke med den ekstra tiden de endrede mengdene medfører. Dette er grobunn til konflikter som kan eskalere, og er en motivasjon for den bransjeomforente *Tunnelbyggetid 2021*.

Tunnelbyggetid 2021 har en innebygget funksjonalitet for vekseldrift, der vekseldrift angis som mertiden per stuff som drives med vekseldrift sammenlignet med enstuffsdrift (Haugan & Bruland, 2021). Denne mertiden angis som en faktor, og beregnes ut ifra forholdet mellom summen av tid til sikring og forinjeksjon og tid til sprengning. Denne vekseldriftfaktoren beregnes uten usikkerhet. Det er ønskelig å se nærmere på hvordan usikkerhet spiller inn på vekseldriftfaktoren for å avdekke om dette har innvirkning på korrektheten til byggetiden. I tillegg er det ønskelig å undersøke om, og eventuelt hvordan, endrede forhold og mengder påvirker vekseldriftfaktoren og dermed tunnelbyggetiden.

Arbeidet i masteroppgaven bygger videre på forfatterens egen prosjektoppgave, skrevet høsten 2021, med tittelen «Vekseldrift i tunnel og tidsplanlegging under usikkerhet i tunnelbygging». Prosjektoppgaven konkluderte med at bruken av asymmetriske, og spesielt høyreskjeve, sannsynlighetsfordelinger indikerer en effekt på vekseldriftfaktoren. Det ble også konkludert med at det var ønskelig å utvide simuleringsmodellen til å inneha muligheten for tripplestimat og bruken av flere sannsynlighetsfordelinger. I tillegg ble det konkludert med at det var nødvendig å slå fast hvilke forhold som påvirker vekseldriftfaktoren, samt hvilke faktorer som kan medvirke til konflikter i tunnelprosjekter.

1.2 Formål og forskningsspørsmål

Med utgangspunkt i utfordringene tilknyttet vekseldrift og tunnelbyggetid, samt prosjektoppgavens ønskede videre arbeid, har denne masteroppgaven sitt formål blitt formulert til:

Utrede hvordan vekseldriftfaktoren påvirkes av å bestemmes under usikkerhet, samt hvordan vekseldriftfaktoren påvirkes av endrede forhold og mengder, med den overordnede tematikken «vekseldrift i tunnel» og «tidsplanlegging under usikkerhet».

Usikkerheten i aktivitetene i salvesyklusen skal hensyntas, og det skal undersøkes hvorvidt dette har betydning for vekseldriftfaktoren, og eventuelt hvordan den påvirkes. For å besvare dette, har det blitt utviklet tre forskningsspørsmål, som presenteres i det følgende:

- (1) Hvilke kontraktuelle elementer er særlig utfordrende i forbindelse med vekseldrift og tunnelbyggetid?*
- (2) Hvordan kan vekseldriftfaktoren bestemmes under usikkerhet, og har denne usikkerheten eventuelt noen betydning?*
- (3) Hva påvirker vekseldriftfaktoren, og hvordan påvirkes størrelsen på den?*

Forskingsspørsmål (1) har til hensikt å ta for seg kontraktuelle elementer som har betydning for vekseldrift og tunnelbyggetid, slik at masteroppgavens relevans knyttes opp mot behovet. Her er målet å utrede blant annet kontraktpraksis, risiko i tunnelprosjekter og grunner til konflikter relatert til tunnelbyggetid.

Forskingsspørsmål (2) skal først settes i kontekst, der vekseldrift og aspekter ved vekseldrift utredes. Deretter har spørsmålet intensjonen å utrede hvordan vekseldriftfaktoren kan bestemmes under usikkerhet, og om denne usikkerheten faktisk har noen betydning for

vekseldriftfaktoren. Det er også ønskelig å tilrettelegge for at usikkerheten kan hensyntas i form av tripplestimat.

Forsknings spørsmål (3) har til hensikt å avdekke hvilke forhold som eventuelt påvirker vekseldriftfaktoren, og hvordan dens størrelse påvirkes av disse forholdene. Avslutningsvis er målet å sammenligne potensielt nye vekseldriftfaktorer med eksisterende vekseldriftfaktorer, og hvilken betydning dette kan ha for tunnelbyggetiden.

1.3 Avgrensninger

Arbeidet med masteroppgaven avgrenses av tidsrammen, da denne er satt til omtrent 20 uker. Som en konsekvens av dette har det vært nødvendig å avgrense omfanget til oppgaven, som hovedsakelig dreier seg om fire større begrensninger:

- (1) Ikke inkludering av tyngre sikring, som forbolting og sprøytebetongbuer.
- (2) Ikke innsamling og bruk av reelle prosjektspesifikke data.
- (3) Begrenset til kun én variant av vekseldrift.
- (4) Begrenset til å kun omhandle tunneldriving på normalt driftsnivå.

Første begrensning innebærer at aktivitetene forbolting og sprøytebetongbuer ikke er tatt til følge i simuleringmodellene. Dette skyldes at tyngre sikring, som forbolting og sprøytebetongbuer, krever reduserte salvelengder som hadde komplisert simuleringmodellene.

Andre begrensning omfatter at tiden ikke var tilstrekkelig til å samle inn nok data for alle prosjektspesifikke forhold for deretter å analysere disse, samtidig som det skulle utvikles simuleringmodeller. Denne innsamlingen og analysen av data er en forutsetning for nøyaktig bestemmelse av usikkerheten som bør tilordnes hver enkelt aktivitet i salvesyklusen, gjennom blant annet valg av sannsynlighetsfordelinger.

Tredje begrensning omhandler at simuleringmodellene begrenses til kun én form for vekseldrift, der borerigg og lastesystem deles mellom to stuffer i to parallelle tunnellop. All tilgjengelig tid har gått med til utvikling av simuleringmodeller som beskriver dette systemet. Naturligvis har det da ikke vært tid til å se på andre varianter av vekseldrift.

Fjerde begrensning betyr at det forutsettes et normalt driftsnivå. Eksempelvis tas det ikke hensyn til tider tilknyttet forberedende og avsluttende arbeider for oppstart og avslutning av tunneldrivingen. Dette er gjort da det er selve drivingen som har vært av interesse.

1.4 Struktur

Masteroppgaven er bygget opp og strukturert på en måte som sørger for at leseren følger den naturlige progresjonen i oppgaven. Leseren får fortløpende presentert den informasjonen som er nødvendig for forståelse av den videre lesingen. Simuleringsmodellene med det tilhørende rammeverket, som er oppgavens hovedprodukt, presenteres i metoden. Derfor er det ansett nødvendig å presentere teorikapittelet før metodekapittelet, slik at leseren får et teoretisk grunnlag før vedkommende leser om utviklingen av simuleringsmodellene. Dette teoretiske grunnlaget omfatter både vekseldrift i tunnel, vekseldriftfaktoren, tidsplanlegging under usikkerhet og modellering og simulering, som er essensielt for å forstå prosessen med utvikling av simuleringsmodellene.

Oppgavens struktur fremkommer av tabell 1.1.

Tabell 1.1: Oppgavens struktur.

Hovedkapittel	Beskrivelse
1. Innledning	Presenterer bakgrunnen og behovet for masteroppgaven, formålet og forskningsspørsmålene og avgrensningene.
2. Teori	Fremlegger nødvendig teori tilknyttet kontrakt, vekseldrift, vekseldriftfaktoren, salvesyklus, prosjektplanlegging og tidsplanlegging under usikkerhet.
3. Metode	Beskriver utførelsen av litteraturstudien, intervjuene og simuleringsstudien, samt gjenbruket av materiell fra prosjektoppgaven.
4. Resultat	Presenterer resultatene som følger av intervjuene og simuleringsstudien. Dette inkluderer både selve simuleringsmodellene med tilhørende rammeverk, og resultatene fra simuleringeksperimentene.
5. Diskusjon	Diskuterer og analyserer resultatene fra intervjuene og simuleringeksperimentene opp mot teorien, metoden og bakgrunnen for masteroppgaven. Forskningsspørsmålene diskuteres i kronologisk rekkefølge.
6. Konklusjon	Legger frem konklusjonene gjort med bakgrunn i diskusjonen og analysen, og svarer ut forskningsspørsmålene i kronologisk rekkefølge.
7. Videre arbeid	Presenterer aspekter ved arbeidet det anbefales at det arbeides videre med.

2. Teori

Dette hovedkapittelet presenterer relevant bakgrunnsteori som har til hensikt å tilrettelegge for besvarelse av forskningsspørsmålene.

2.1 Kontrakt

Her presenteres teori tilknyttet kontrakter i tunnelprosjekter.

2.1.1 Praksis og risikofordeling

En kontrakt representerer en avtale mellom to eller flere parter (Lædre, 2012). Kontrakten gir rammeverket for samarbeidet mellom partene, og fordeler ansvaret og styringsmulighetene. De siste vel 50 årene har enhetspriskontrakter blitt benyttet ved de fleste undergrunnsprosjektene i Norge (NFF, 2012). En enhetspriskontrakt innebærer at enhetsprisene i kontrakten er justerbare og i tillegg kan suppleres med løst anslåtte mengder (Lædre, 2012).

Tunnelbygging forutsetter bergmassen som et byggemateriale (NFF, 2012). Følgelig blir undersøkelsene av bergmassen før bygging et viktig grunnlag for estimering av mengdene og kostnadspostene i mengdebeskrivelsen i kontrakten. Dette danner også grunnlaget for anslaget av total tunnelbyggetid. Mengdene må representere realistiske estimater for at prisene og tidsplanene skal få gode anslag. Planleggingen av undergrunnsarbeider krever også at eventualiteter og forholdsregler inkluderes i kontrakten, for å håndtere både ventede og uventede forhold.

Før kontrahering blir grunnforholdene kartlagt og en geologisk rapport utarbeides, som senere inngår i kontraktsdokumentene (NFF, 2012). Denne rapporten baseres på faktiske data fra undersøkelsene, samt en del om forventede grunnforhold, som er en tolkning av de faktiske dataene. Dette gir byggherren et grunnlag for adressering av tiltak og mengder som spesifiseres i kontrakten, og som samtidig har betydning for anslaget av tunnelbyggetid. Informasjonen benyttes også av entreprenøren som grunnlag for en egen vurdering av grunnforholdene og som vedkommende kan benytte i prosessene vedrørende prising og planlegging av jobben. I denne forbindelse er det viktig med forutsigbarhet, og at informasjonen som fremkommer tas med fra en fase til den neste. Under bygging er det viktig at både byggherre og entreprenør har kompetanse på anleggsplassen for bestemmelse av

sikringsmetoder og vurdering av geologiske forhold både på og foran stoffen. Vurderingen av de geologiske forholdene er særlig viktig for eventuelle injeksjonsarbeider.

I mengdebeskrivelsen spesifiserer byggherren sikringsmetodene og stipulerer tilhørende mengder. Mengdene stipuleres basert på hva byggherren forventer, da dette sørger for forutsigbarhet og bedre oversikt over omfanget til arbeidene. Entreprenøren betales så i henhold til de faktiske mengdene som utføres.

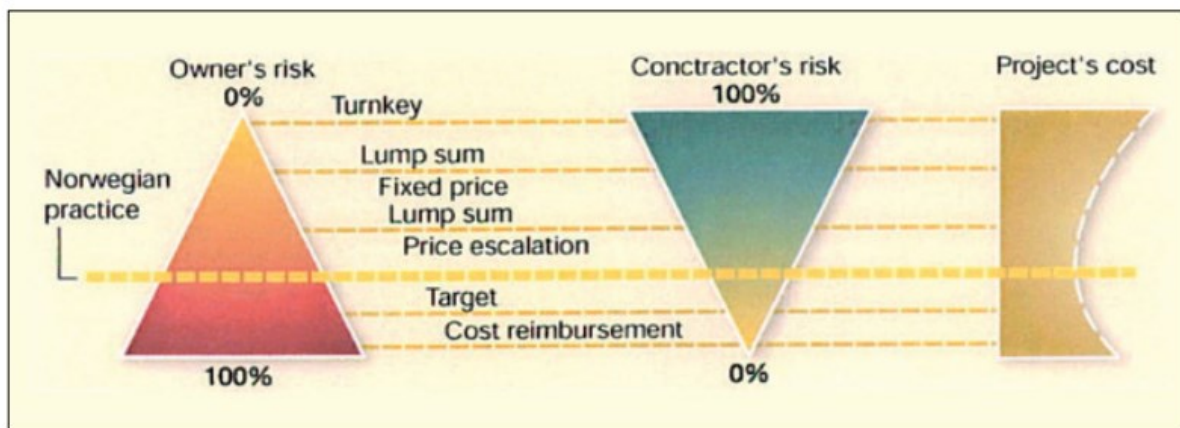
Under vannkraftutbyggingen fra 60-årene til og med 80-årene, ble et kontraktkonsept som fokuserte på risikofordeling implementert (NFF, 2012). Disse kontraktene adresserer to hovedelementer av risiko:

- **Grunnforhold.** Byggherren er ansvarlig for grunnforholdene, og er sågar ansvarlig for resultatet av grunnundersøkelsene byggherren finner nødvendig å utføre. Dersom undersøkelsene senere viser seg å være mangelfulle, er dette byggherrens problem.
- **Ytelse.** Entreprenøren er ansvarlig for effektiv utførelse av arbeidene, og skal utføre arbeidene i henhold til tekniske spesifikasjoner. Entreprenøren blir kompensert for faktisk utført arbeid i henhold til enhetsprisene i kontrakten. Tunnelbyggetiden underveis justeres basert på forhåndsbestemte standardkapasiteter i et ekvivalenttidsregnskap for ulike aktiviteter hvis mengdene endres.

Dette betyr at byggherren innehar risikoen for økte kostnader dersom grunnforholdene er verre enn antatt (NFF, 2012). I motsatt fall vil besparelser grunnet bedre grunnforhold enn antatt tilfalle byggherren. Entreprenøren har på sin side risikoen for egen ytelse. Dersom entreprenøren er mindre effektiv enn de beskrevne kapasitetene i ekvivalenttidsregnskapet ved økte mengder, kan entreprenøren havne bak skjema. I en slik situasjon må entreprenøren ta igjen den tapte tiden på egen bekostning dersom straff skal unngås. En slik straff kan være dagmulkt, som er en kontraktfestet bot entreprenøren plikter å betale for hver dag vedkommende er forsinket (Codex Advokat, 2020). Botens størrelse er vanligvis 1 promille av kontraktsummen som følge av de fleste standardkontraktene fra Norsk Standard, samt fra forbrukerlovene. Andre størrelser kan likevel avtales. Er entreprenøren mer effektiv enn de beskrevne kapasitetene, er det muligheter for tidligere ferdigstilling som resulterer i kostnadsbesparelser og økt avkastning, i tillegg til betalingen som ligger til grunn i enhetsprisene i kontrakten (NFF, 2012).

De nevnte risikofordelingsprinsippene eliminerer ideelt sett alle diskusjoner omkring endrede grunnforhold (NFF, 2012). Mengdene følges opp, og justeringer av betaling og

tunnelbyggetid justeres fortløpende. Dette fungerer godt så lenge det er tilstrekkelig å kun utføre mer eller mindre arbeid regulert av enhetsprisene og de forhåndsbestemte kapasitetene for å håndtere endrede grunnforhold. Forutsetningene som må ligge til grunn er dog at alle nødvendige arbeidsaktiviteter relatert til håndtering av usikre og endrede grunnforhold er inkludert i kontrakten, som ikke alltid er tilfellet. Figur 2.1 illustrerer risikofordelingen mellom byggherre og entreprenør ved ulike oppgjørformer, og at den norske praksisen i snitt gir lavest mulig prosjektkostnad.



Figur 2.1: Risikofordelingsprinsipper (NFF, 2012).

2.1.2 Karakteristika ved norske enhetspriskontrakter

Typiske norske enhetspriskontrakter karakteriseres av:

- **Geologisk/geoteknisk rapport.** Rapporten utarbeides for byggherren basert på grunnundersøkelser in situ, og skal presentere all tilgjengelig informasjon (NFF, 2012). Tradisjonelt inneholder rapporten i tillegg til denne faktuelle delen også en tolkningsdel som tolker de geologiske dataene. Selv om det er en forutsetning at rapporten inneholder alle viktige geologiske faktorer, skal tilbyderne utarbeide sin egen tolkning av dataene.
- **Mengdebeskrivelse.** Mengdene for alle arbeidsaktiviteter anslås av byggherren med sine rådgivere og legges ved kontraktsdokumentene (NFF, 2012). Dette omfatter blant annet driving, bolting, sprøytebetong, injeksjon og tekniske installasjoner. Byggherren bør avstå fra å presse enhetsprisene ned ved å beskrive større mengder enn hva tilfellet faktisk er. Taktisk prising fra tilbyderne kan likevel skje, men dette kan oppdages ved nærmere vurdering av tilbudene.

- **Mengdevariasjoner.** Faktiske mengder kan variere grunnet variasjoner i grunnforholdene, og entreprenøren godtgjøres da for faktisk utførte mengder og enhetsprisene entreprenøren har tilbudt (NFF, 2012). Enhetsprisene holdes fast innenfor et forhåndsbestemt variasjonsintervall på mengdene, som i enkelte kontrakter kan være satt til $\pm 100\%$.
- **Standardkapasiteter, eller tidsekvivalenter.** Tradisjonelt har disse kapasitetene blitt bestemt i forhandlinger mellom organisasjonene til flere byggherrer og entreprenører (NFF, 2012). Kapasitetene kan oppdateres samtidig med teknisk utvikling, men vanligvis brukes de satte kapasitetene i flere kontrakter over noen år. Dette er et godt verktøy for justering av byggetid og frister ved endrede mengder i forhold til hva som er beskrevet i kontrakten, så lenge kapasitetene er realistiske. Forutsetningen for at det tas i bruk er at balansen av tidsekvivalenter, altså økning minus reduksjon av arbeidsaktiviteter, endres mer enn en spesifisert mengde. Denne spesifiserte mengden som inkluderes i kontrakten er typisk ± 3 uker (NFF, 2017). All regulering av byggetid utover dette medfører enten en økning eller reduksjon av byggetiden.

For at dette systemet skal fungere, må noen forutsetninger være til stede (NFF, 2017):

- **Erfarne byggherrer og entreprenører.** Begge parter må ha erfaring med undergrunnsarbeider og ledelsen på begge sider må inneha nødvendig autoritet til å fatte avgjørelser for å takle tekniske og kontraktuelle problemer på stedet når de oppstår. Dette krever respekt for hverandre og hverandres oppgaver.
- **Avgjørelsestaking.** Det er kritisk at representanter fra begge parter har mulighet og autoritet til å fatte beslutninger på stuff, særlig med hensyn på arbeidssikring og injeksjon. Dette krever erfarne organisasjoner hos både byggherre, entreprenør og konsulent.
- **Kjennskap til kontrakt.** Hvis begge parter er kjente med kontrakten og dens detaljer, kan diskusjoner og enigheter oppnås når behovet oppstår. Dette er typisk situasjonen når de involverte partene innehar erfaring med lignende prosjekter.

Hovedfordelen med dette systemet er at insentivet for entreprenøren om å ferdigstille innenfor fristen opprettholdes, uansett om grunnforholdene forverres (NFF, 2012).

Entreprenører har påpekt ulempen med at deres rolle er begrenset til utførelse kun av det beskrevne arbeidet, uten insentiver til introduksjon av innovative løsninger som utnytter entreprenørenes kompetanse på en bedre måte.

2.1.3 Håndtere varierende mengder – «100 % regelen» og «ekvivalenttidsregnskap»

I Norsk tunneldrift tas viktige avgjørelser på stuff, relatert både til tiltak foran stuff og sikring på stuff (NFF, 2012). En mulig konsekvens av dette kan være at det oppstår en betydelig forskjell mellom de stipulerte mengdene i kontrakten, og det faktiske arbeidet som utføres. Dette ivaretas av typiske kontraktsformater, eksempelvis «Prosesskoden» fra Statens vegvesen, som også benyttes av Bane NOR, mens Standard Norge har egne kontrakter for samme formål, som NS 3420.

I relasjon til priser, håndteres mengdespørsmålet med «100 %-regelen», en klausul som foreligger i spesifikasjonene omkring sikring i standardkontrakten:

- Enhetsprisene legges til grunn så lenge faktisk utført arbeid ikke avviker kontrakten med mer enn $\pm 100\%$.
- Hvis byggherren eller entreprenøren ønsker å justere enhetsprisene, settes prisene gjennom forhandlinger mellom partene.
- Justerte enhetspriser skal ikke avvike fra enhetsprisene i kontrakten med mer enn 20 %. Justert pris skal bestemmes i henhold til dokumenterte utgifter.

Disse reguleringene håndterer de endrede mengdene relatert til pris som kan oppstå grunnet endringer i geologiske forhold, men ikke det faktum at varierende mengder har innvirkning på entreprenørens tilgjengelige tid mot den endelige fristen (NFF, 2012). For å håndtere aspektet med byggetid, er det blitt innført en annen kontraktklausul kalt «ekvivalenttidsregnskap». Ekvivalenttidsregnskapet skal justere total byggetid og baseres på faktisk utførte sikringsmetoder. Dette er særlig myntet på aktiviteter som er nødvendige for å sikre trygg driving, men som reduserer fremdriften. Typisk er dette tidskritiske aktiviteter på stuff, som manuell rensk, bolting, sprøytebetongbuer og injeksjon (Verling & Neraal, 2020). Følgende punkter relateres til ekvivalenttidsregnskapet (NFF, 2012):

- Hvis de faktiske sikringsmengdene varierer i forhold til mengdene beskrevet i kontrakten, justeres fristen for ferdigstillelse i henhold til de forhåndsbestemte standardkapasitetene for ulike aktiviteter.
- Totaltiden for sikringsmetoder summeres i timer, både faktisk utførte mengder og de beskrevne mengdene i mengdebeskrivelsen. Denne forskjellen i akkumulerte verdier beregnes.

- Entreprenøren opererer normalt med en toleranse for ekstra sikringstiltak. Typisk kan dette være én uke ekstra per år byggetid. Når denne toleransen passerer, vil den ekstra tiden bergenes som antall skift og dager, som deretter legges til endelig frist.

Standardkapasitetene bestemmes som nevnt gjennom forhandlinger mellom representanter fra byggherrer og entreprenører, og skal reflektere det beste innenfor utstyr og metoder på gitt tidspunkt (NFF, 2012). Formålet med ekvivalenttidene er at entreprenøren ikke skal bære tidsrisikoen for økte mengder arbeidssikring, samt det faktum at redusert tidspress på slike aktiviteter er et viktig aspekt i forbindelse med helse, miljø og sikkerhet (HMS) (Verling & Neraal, 2020). Ekvivalenttidsregnskapet skal i sum skape en større forutsigbarhet for entreprenørene når det kommer til risiko for forlenget byggetid som følge av økte sikringsmengder.

Risiko har en pris, og anvendelse av begge klausulene, «100 %-regelen» og «ekvivalenttidsregnskapet», skaper gode verktøy for å redusere usikkerheten relatert til risiko i tunnelkontrakter (NFF, 2012). I tillegg til å redusere sin egen risiko, bør byggherren også redusere entreprenørens risiko for å presse ned total byggekostnad. Dersom entreprenøren drives ut av kontrakten grunnet terminering, konkurs eller lignende, vil risikoen i siste instans tilfalle byggherren.

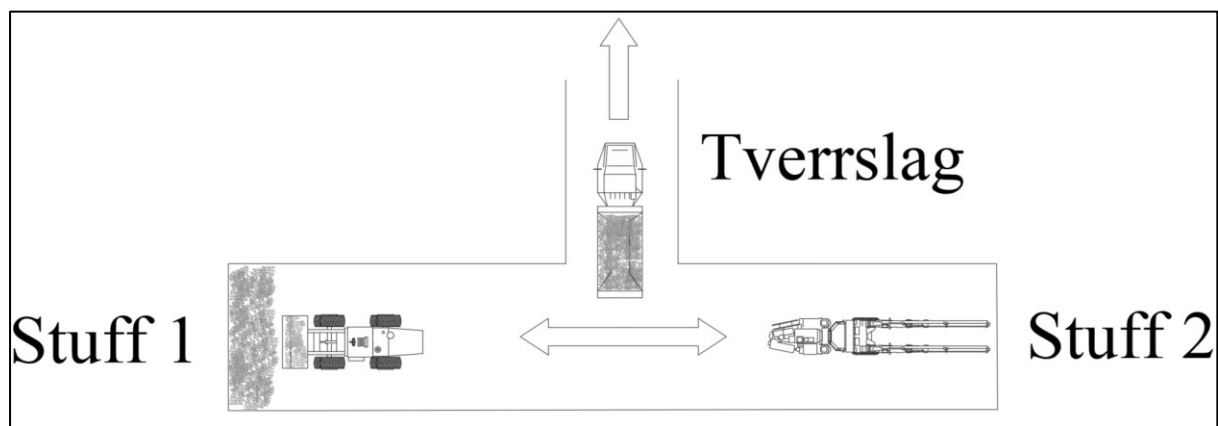
2.2 Vekseldrift i tunnel

Konvensjonell tunneldriving med boring og sprengning har vært den dominerende metoden for bygging av tunneler i Norge (Grendal et al., 2014). Drivingen foregår i en gitt retning, og antall angrepspunkter kan naturligvis variere. Det kan eksempelvis drives fra hver side av en tunnel, slik at det blir to angrepspunkter, eller driving på to stuffer på hver side av en toløpstunnel, slik at det blir fire angrepspunkter. En annen mulighet er tverrslag, som er adkomsttunneler til selve hovedtunnelen (JBV & SVV, u.å.). Dette gir flere angrepspunkter for tunneldriften og forkorter byggetiden. Mulige tverrslag og angrepspunkter vurderes for å oppnå et mest mulig rasjonelt driftsopplegg med hensyn til fremdrift og økonomi (SVV & Bane NOR, 2020).

Vekseldrift er et driftsopplegg som omhandler å drive vekselvis på to stuffer med én utstyrspakke (Statkraft, 2010). Dette innebærer at boreriggen bedriver salveboring på den ene stuffen, mens andre nødvendige aktiviteter som ventilering og utlasting av utsprengte masser kan foregå på den andre stuffen. Tunnelen drives i to retninger av samme drivelag for optimal

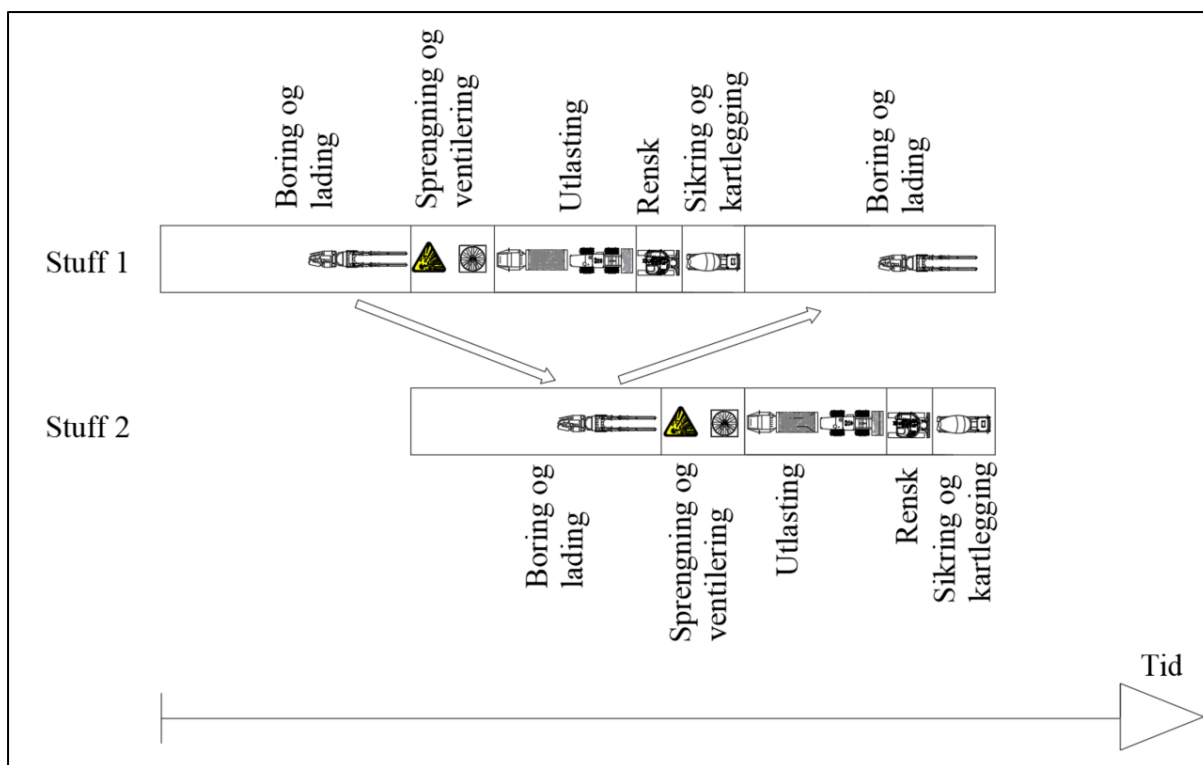
utnyttelse av tunnelrigger, utstyr og mannskap (SVV & Bane NOR, 2020). Som en konsekvens reduseres ventetiden for mannskap og maskiner (JBV, 2016). For å oppnå relativt høy inndrift med ordinær vekseldrift, er det nødvendig med god utnyttelse av utstyret og tett koordinering av aktivitetene som skal utføres på hver av stoffene det drives vekseldrift på (Grøv & Beitnes, 2006). Vekseldrift kan kombineres med tverrslag (SVV & Bane NOR, 2020), der det drives veksel på de to stoffene i bergrommet som oppnås i enden av tverrslaget.

Figur 2.2 illustrerer vekseldrift via et tverrslag, der det foregår utlasting på Stuff 1, salveboring på Stuff 2 og utkjøring via tverrslaget. Hjullasteren og boreriggen bytter plass når utlasting og salveboring er ferdig på de respektive stoffene.



Figur 2.2: Vekseldrift via tverrslag.

Figur 2.3 illustrerer vekseldrift og hvordan boreriggen flyttes mellom to stuffer i to parallelle tunneler mens drivingen forløper i tid. Pilene mellom stoffene i figuren viser forflyttingen av boreriggen.



Figur 2.3: Vekseldrift i to parallelle tunneler langs tidsakse.

2.3 Vekseldriftfaktor og enhetstider for tunneldrift

I det følgende presenteres grunnlaget for eksisterende vekseldriftfaktor og beregninger tilknyttet varigheter.

2.3.1 Generelt om teoretisk grunnlag for beregning av vekseldriftfaktor

Vekseldrift gir økt tidsforbruk i forhold til normal enstuffsdrift (Log, 2000).

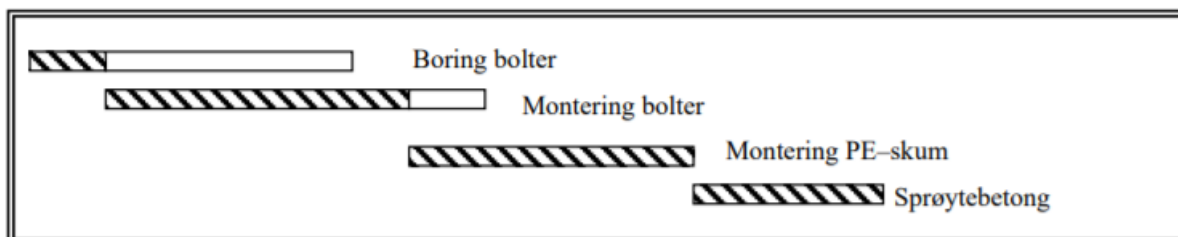
Fremdriftsfaktoren for vekseldrift, eller vekseldriftsfaktoren, angir mertiden per stuff som drives med vekseldrift sammenlignet med enstuffsdrift (Haugan & Bruland, 2021).

Eksisterende grunnlag for vurdering av tidsbruk i vekseldrift kontra normal enstuffsdrift foreligger i *PROSJEKTRAPPORT 2F-99 TUNNELDRIFT Enhetstidssystem for driving, sikring og innredning* (Hermann et al., 1999). Før vekseldriften kan vurderes opp mot enstuffsdrift, må tidsforbruket for enstuffsdrift beregnes, og det kan gjøres med enhetstidssystemet i prosjektrapporten. Dette enhetstidssystemet er ment som et hjelpemiddel ved: tidsplanlegging generelt; alternativsvurderinger; utforming av kontrakter, særlig mot byggetid; regulering av tidsfrister i kontrakter; oppbygning av erfaringsdata; og akkordsetting

(Hermann et al., 1999). Rapporten dekker driving, sikring og innredning av tunneler. Relatert til driving og sikring legges følgende forutsetninger til grunn:

- Veg- og jernbanetunneler med tverrsnitt fra 10 til 120 m².
- Konvensjonell drift.
- Midlere bergforhold med middels borsynk: DRI = 49, samt middels sprengbarhet i bergmasse.
- Optimalisert og godt utstyr.
- Forbud mot arbeid foran bomfestene under boring.
- Kapasitet er gitt som tidsforbruk per meter tunnel.
- Alle kapasiteter er skiftkapasiteter, altså at tilfeldig tapstid er inkludert, satt til 11,1 % hver time.
- Angitt tidsbestemmende faktorer for sikring. Angir hvor stor del av prosessen som er tidsbestemmende tid, og beskriver dermed eventuell parallellitet mellom aktiviteter.

Tidsbestemmende faktor illustreres av figur 2.4, der eksempelet kommer fra arbeid med vann- og frostsikring (Hermann et al., 1999).



Figur 2.4: Illustrasjon av tidsbestemmende faktor (Hermann et al., 1999).

I figuren er de tidsbestemmende faktorene som følger (Hermann et al., 1999):

- Boring bolter: 0,3.
- Montering bolter: 0,7.
- Montering PE-skum: 1,0.
- Sprøytebetong: 1,0.

Tidsbestemmende faktorer på under 1,0 betyr at aktiviteter i større eller mindre grad kan foregå parallelt, mens tidsbestemmende faktor på 1,0 betyr at aktiviteten er styrende for tidsbruken og ingen andre etterfølgende aktiviteter kan foregå parallelt med denne aktiviteten. Av figur 2.4, samt de tidsbestemmende faktorene, ses det blant annet at «Montering PE-

skum» kan påbegynnes før «Montering bolter» er avsluttet, men «Sprøytebetong» kan ikke påbegynnes før «Montering PE-skum» er avsluttet.

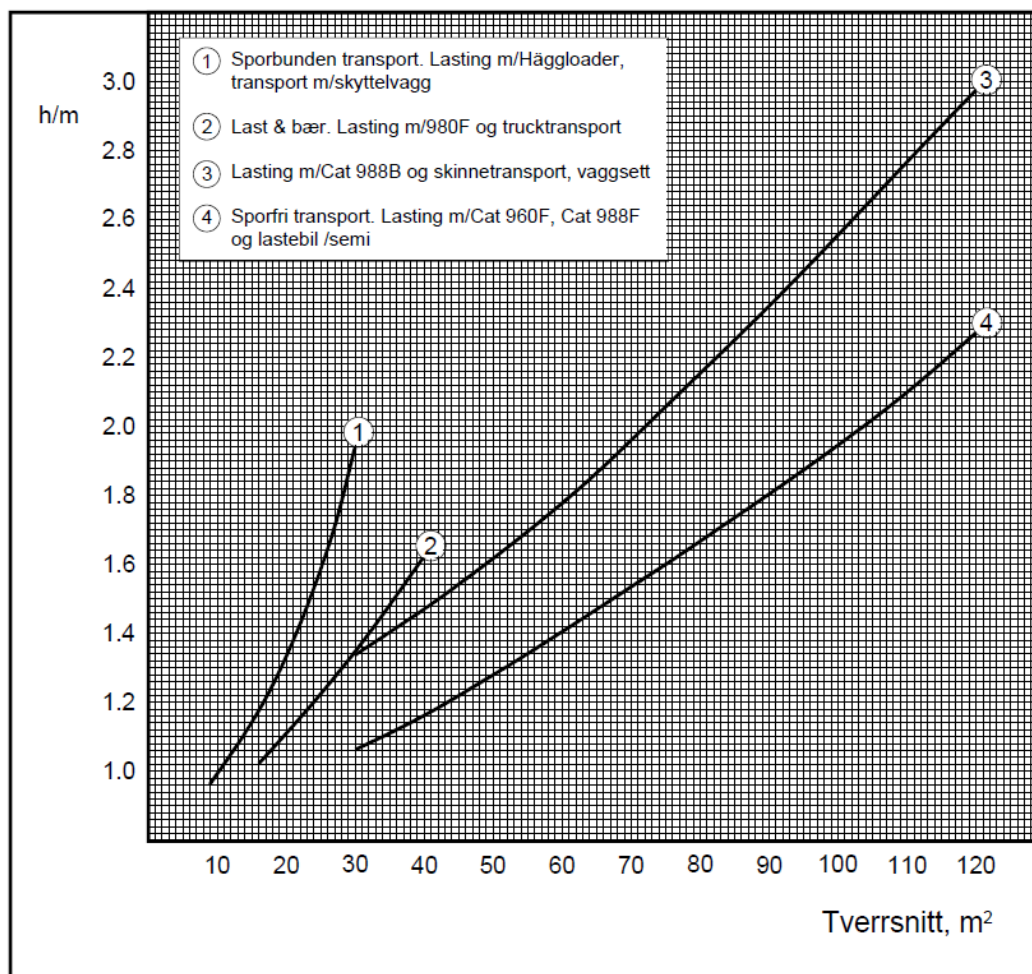
2.3.2 Tilrettelegging for tunneldrift

Tunneldrift krever hjelpeanlegg av forskjellige slag (Bruland, 2013b). Blant annet må det etableres et påhugg, som er en vertikal bergoverflate som markerer starten på tunnelen (Grendal et al., 2014). Tiden det tar å etablere et påhugg varierer med vanskelighetsgrad og stedlige forhold (Hermann et al., 1999). Denne tiden er fiksert, og normal tid settes til fire uker i prosjektrapporten.

I tillegg til etablering av påhugg, tar det også litt tid før inndriften er på et normalt driftsnivå (Hermann et al., 1999). Dette gir et merforbruk i tid sammenlignet med normal drift, og prosjektrapporten setter tilleggstiden inntil normal drift er nådd til 3-6 uker.

2.3.3 Enhetstider for tunneldriving og justeringsfaktor for vekseldrift

Prognosen for tidsforbruket per stoff illustreres i figur 2.5, der inndriften vises som funksjon av tverrsnitt for ulike utstyrskombinasjoner. Kurve 1 og 2 forutsetter 2-bomsrigg, og kurve 3 og 4 forutsetter 3-bomsrigg.



Figur 2.5: Tid til tunneldriving (Hermann et al., 1999).

Andre forutsetninger for denne prognosen er

- 45 mm borhullsdiameter og 102 mm grovhull
- 5,0 m boret lengde
- inndrift på 95 % av boret lengde
- mekanisk rensk med pigmaskin
- lading etter endt boring
- bruk av slurry

Ved vekseldrift regnes hver stoff separat (Hermann et al., 1999). Enhetstidene finnes for hver stoff fra figur 2.5 og justeres deretter opp med passende faktor, kalt vekseldriftfaktor, fra figur 2.6 gitt av tverrsnitt og utstyrskombinasjon. Utstyrskombinasjonene leses av figur 2.5. Maksimal lengde mellom stuffer forutsettes å ikke være vesentlig mer enn 2000 m. Tilfeldige tapstider økes fra 11,1 % ved normal enstuffsdrift til 15 % ved vekseldrift grunnet økt plunder og heft. Det regnes i tillegg med delvis dobbelt utstyr for vekseldriften.

Utstyrs -komb.	Tverrsnitt [m ²]													
	10	16	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	*	1,28	*	1,26	*	1,14	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1,24	*	1,13	*	1,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	1,19	1,15	1,10	1,07	1,09	1,11	1,14	1,16	1,17	1,19
4	-	-	-	-	1,3	1,29	1,31	1,28	1,31	1,28	1,25	1,23	1,21	1,20

**ikke-angitte verdier skyldes sprang i utstyrskombinasjoner. Mellomliggende verdier kan finnes med interpolasjon.*

Figur 2.6: Vekseldriftfaktorer (Hermann et al., 1999).

Disse vekseldriftfaktorene relateres hovedsakelig til ren driving, og hensyntar dermed ikke sikringsmengdene som legges til grunn i dagens praksis (A. Bruland, personlig kommunikasjon, 9. november 2021). Vekseldriftfaktorene beregnes ut fra forholdet mellom summen av tid til sikring og utlasting, og tiden til boring og sprengning. Sikringsmengdene det regnes med er hovedsakelig beskjedne boltemengder.

Tunnelbyggetidsmodellen av 2021 beregner vekseldriftsfaktoren ut fra forholdet mellom summen av tid til sikring og forinjeksjon, og tid til boring og sprengning (Haugan & Bruland, 2021). Mye sikring og forinjeksjon gir en høy vekseldriftfaktor på 1,5 eller mer, mens lite sikring og forinjeksjon gir en lav vekseldriftfaktor på 1,4 eller mindre. I praksis har vekseldriftsfaktoren de senere årene vært satt til 1,3-1,4 (A. Bruland, personlig kommunikasjon 20. mai 2022).

2.3.4 Enhetstider for rigg, boring, lading, ventilasjon, rensk og utlasting

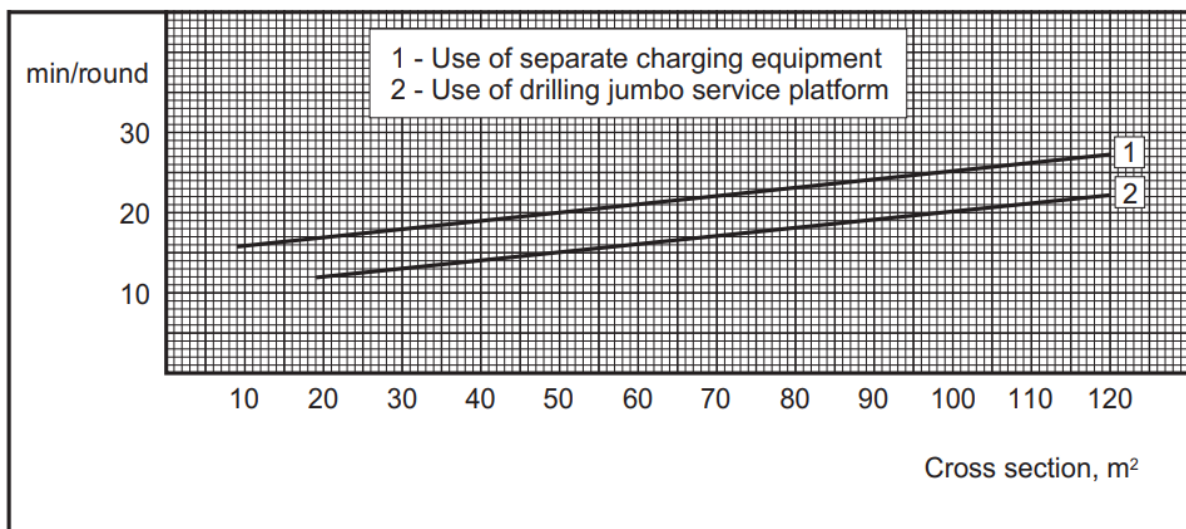
I det følgende presenteres grunnlaget for beregning av enhetstider relatert til rigg, salveboring, lading, ventilasjon, utlasting og rensk.

Rigg

Før boring og lading tiltar må det rigges opp, før det må rigges ned ved avslutning for sprengning. De viktigste tidene som inngår i oppriggen, forutsatt bruk av serviceplattformen på boreriggen ved lading, er (Zare, 2006):

- Kjøring av borerigg til stuffen.
- Til- og frakobling av vann og strøm.
- Posisjonering av boreriggen.
- Navigering, dersom datastyrt borerigg brukes.
- Pakke sammen utstyr og klargjøre boreriggen for utkjøring.
- Kjøring av boreriggen vekk fra stuffen.

Figur 2.7 angir total tidsbruk til rigg som funksjon av tverrsnitt, avhengig av om det benyttes separat ladeutstyr eller serviceplattformen på boreriggen.



Figur 2.7: Tid til rigg (Zare, 2006).

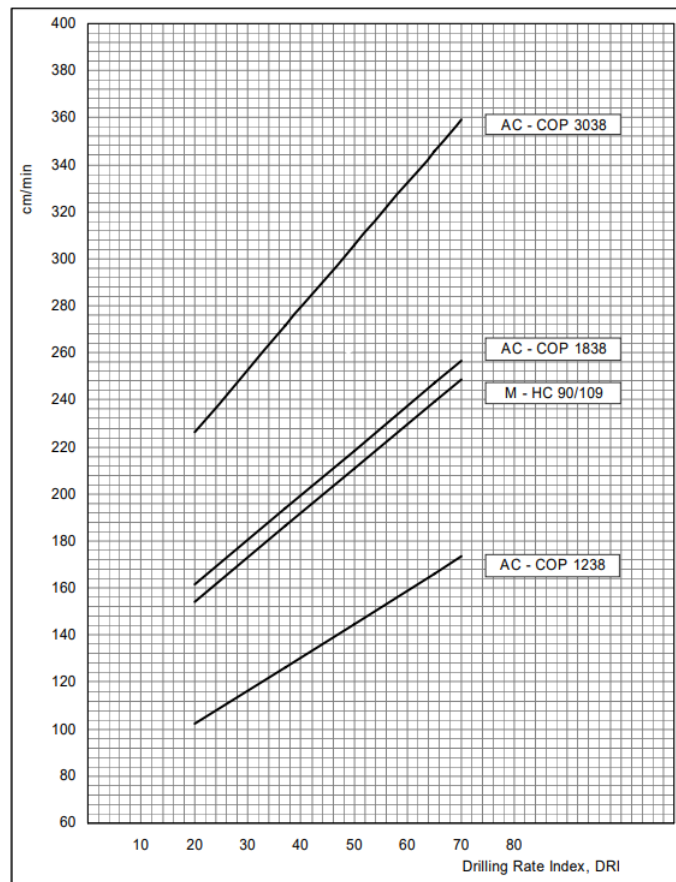
Boring

For å kunne beregne total boretid per salve, er det nødvendig å kjenne både antall hull og boreraten (Zare, 2006). Total boretid inkluderer

- tid til boring (netto borsynk)
- tid til flytt
- tid til bytte av borkroner
- tid grunnet mangel på samtidighet
- tid til eventuell stangskjøt

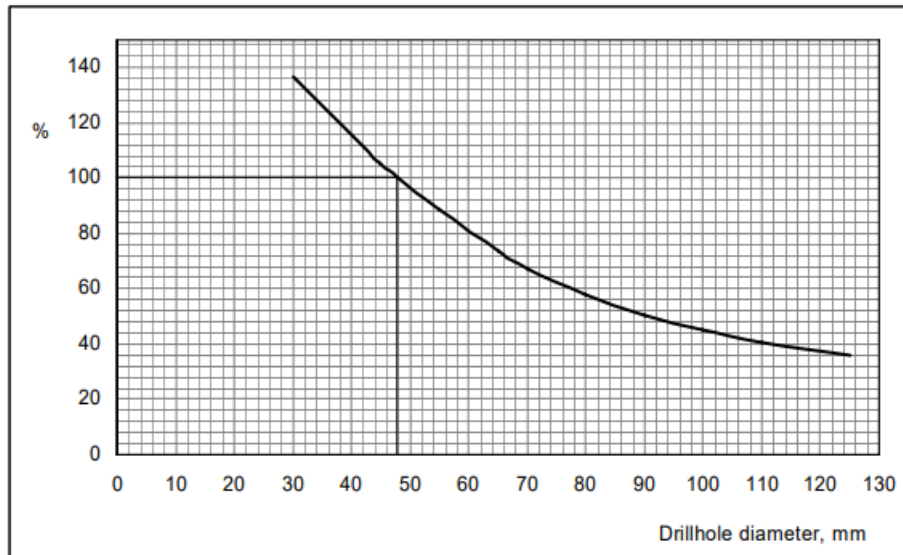
Disse tidene beregnes, og legges til slutt sammen for å få total boretid per salve. I det videre presenteres beregningene tilknyttet disse punktene.

Figur 2.8 illustrerer sammenhengen mellom DRI, som er et mål på bergartens borbarhet (Zare, 2006), og netto borsynk.



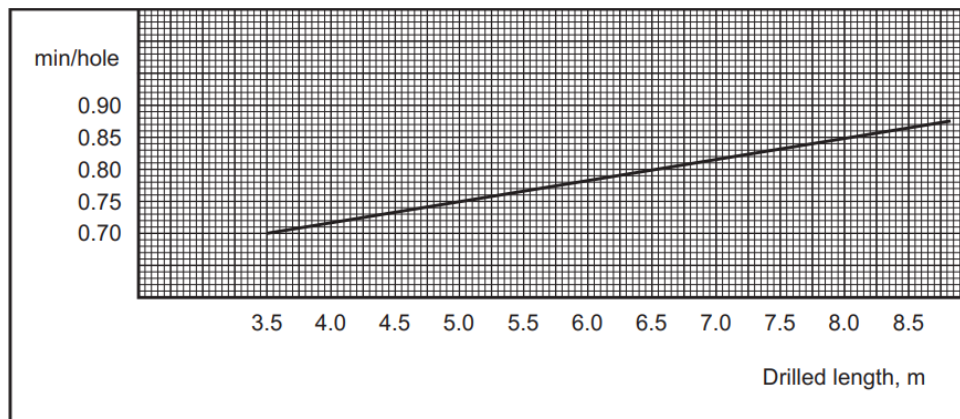
Figur 2.8: Netto borsynk som funksjon av DRI, v_b (Zare, 2006).

Figur 2.8 forutsetter 48 mm borhull, og må korrigeres dersom andre diametere er benyttet, som blant annet blir tilfelle i beregningen av boretid til grovhull. Korreksjonsfaktorer finnes ved hjelp av figur 2.9.



Figur 2.9: Netto borsynk som funksjon av borhulldiameter (Zare, 2006).

Tid til flytt inkluderer innretting, ansett, tilbaketrekning og flytt fra et borhull til et annet (Zare, 2006). Denne tiden er tilnærmet uavhengig av geologien men avhenger av boret lengde, og kan finnes ved hjelp av figur 2.10. Farten på tilbaketrekning av stangen er målt til 0,5 m/s.

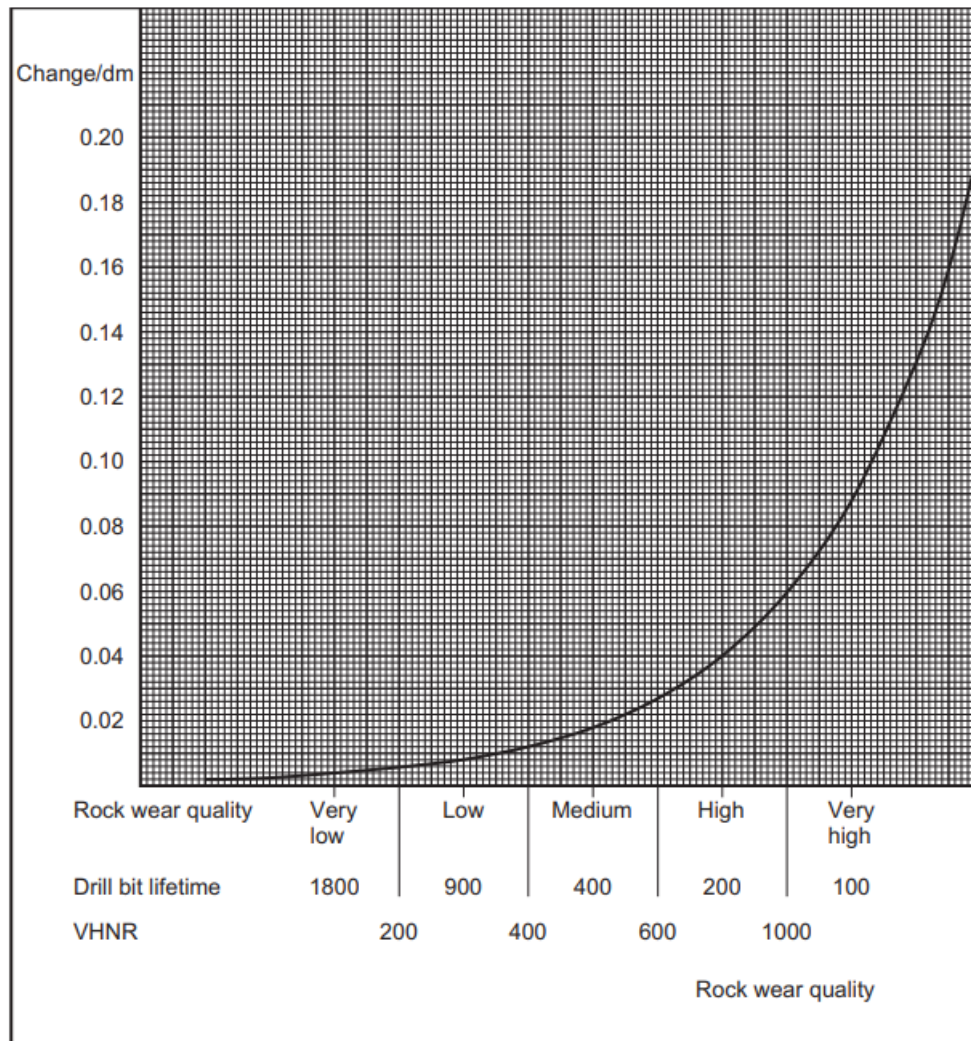


Figur 2.10: Tid til flytt per hull, t_f (Zare, 2006).

Stangskjøting må utføres ved boring av hull lenger enn omtrent 6 m (Zare, 2006). Tid til stangskjøting er uavhengig av stanglengde. Total tid til stangskjøting varierer med antall hull og er derfor avhengig av om grovhullene bores direkte eller om de bores med opprømming. Tid til stangskjøting, t_{st} , er målt til å være 1,8-1,9 min per hull.

Frekvensen på bytte av borkroner avhenger av slitasjen (Zare, 2006). Selve byttet av krone er målt til 1,5 min, men dersom alle borhammerne blir stoppet, dobles denne tiden til 3 min per

kronebytte. Sammenhengen mellom antall kronebytter per bormeter og slitasjen fremkommer av figur 2.11.

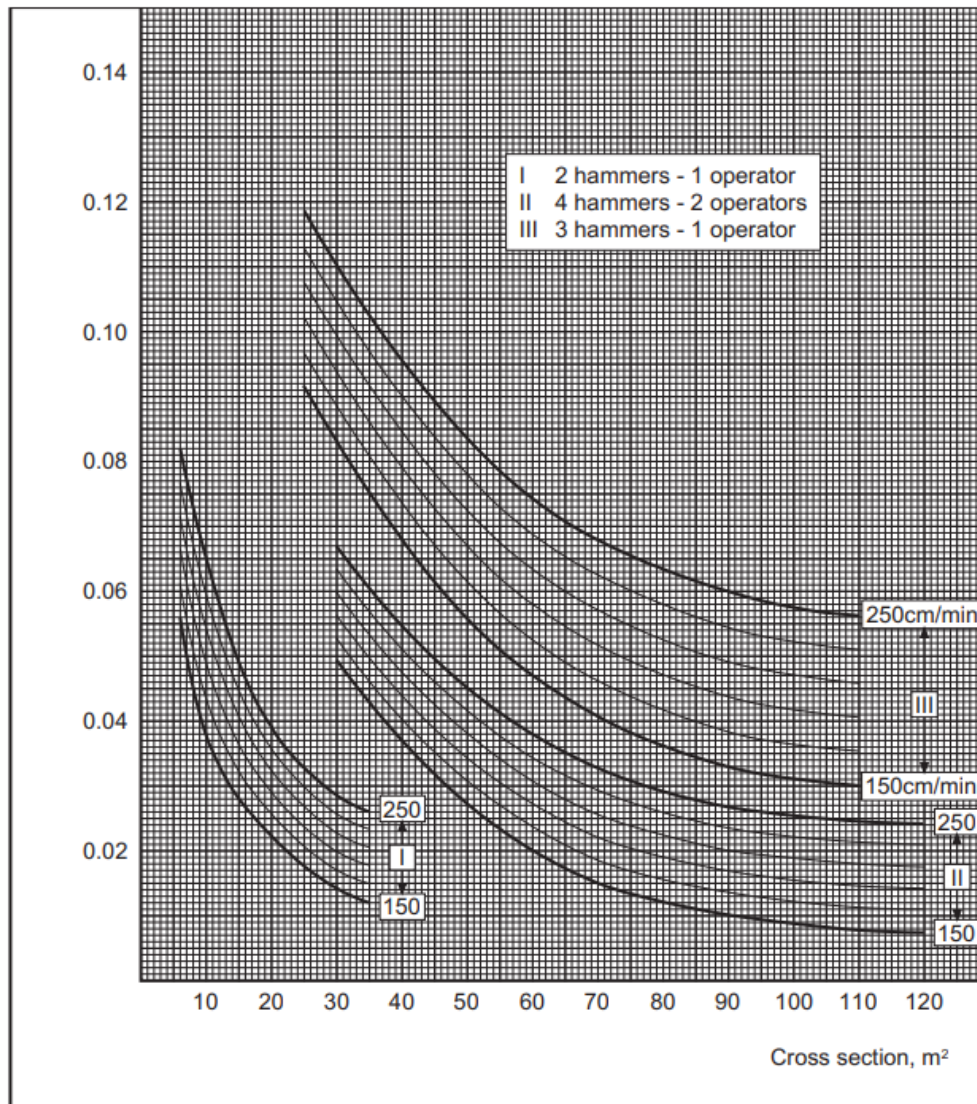


Figur 2.11: Frekvens på borkronebytter, f_k (Zare, 2006).

Samtidighet inkluderer følgende tapstider (Zare, 2006):

- Stopp av boring grunnet mangel på operatør.
- Tap av tid grunnet ulik fordeling av boring mellom borhammerne.
- Tap av tid siden borhammerne må startes i en sekvens i starten av salven.

Figur 2.12 illustrerer faktor for mangel på samtidighet som funksjon av tverrsnitt, netto borsynk og antall borhammere og operatører.



Figur 2.12: Faktor for mangel på samtidighet, f_{sa} (Zare, 2006).

Tabell 2.1 viser formlene for beregning av total boretid, der informasjonen fra de beskrevne figurene legges til grunn.

Tabell 2.1: Beregning av tider relatert til boring (Zare, 2006).

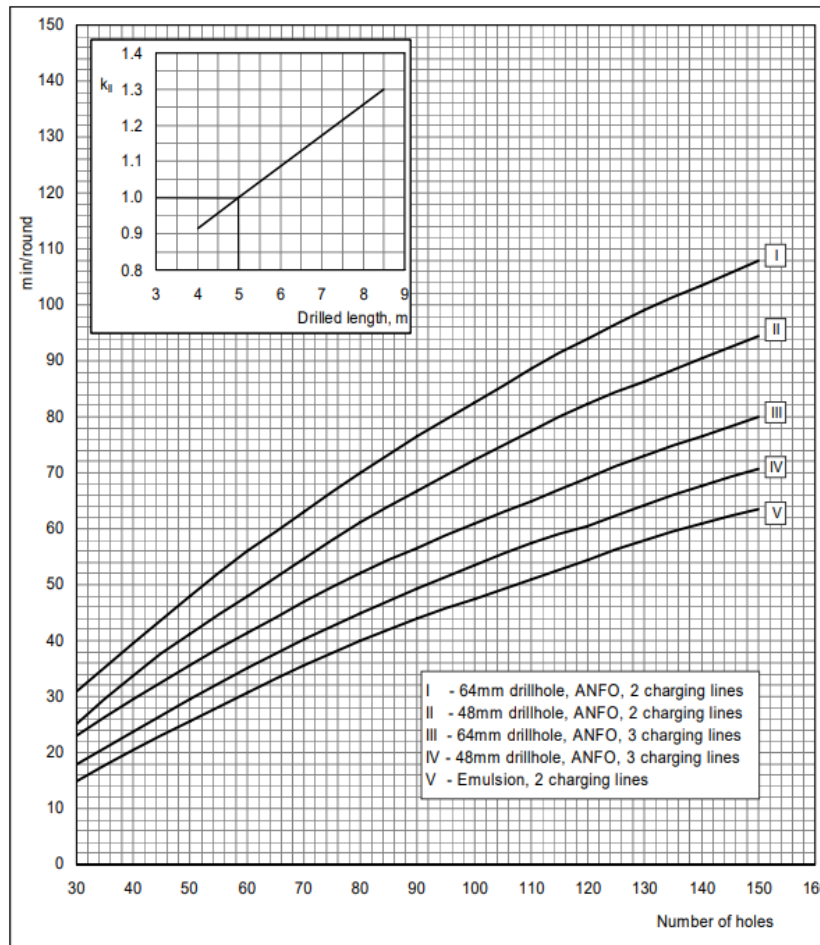
Tid relatert til boring	Formel
Boretid – ladde hull	$T_h = \frac{l_h * N_h}{v_h * N_m}$
Boretid – grovhull	$T_g = \frac{l_h * N_g}{v_g * N_m} * 1,25$ <p>Multipliserer med 1,25 dersom det bores med opprømming, da boring av grovhull har 25 % høyere boretid ved opprømming enn ved direkte boring. Opprømming er at mindre borhull bores opp igjen med en borekrone med større diameter.</p>
Tid til flytt	$T_f = \frac{t_f * (N_h + 2 * N_g)}{N_m}$
Stangskjøtt	$T_{st} = \frac{t_{st} * (N_h + 2 * N_g)}{N_m}$
Borkronebytte	$T_k = \frac{l_h * (N_h + 2 * N_g) * f_k * t_k}{N_m}$
Mangel på samtidighet	$T_{sa} = (T_h + T_g + T_f) * f_{sa}$
Total boretid	$T_b = T_h + T_g + T_f + T_{st} + T_k + T_{sa}$
Parameter	Forklaring
l_h	Boret lengde.
N_h	Antall ladde hull.
N_g	Antall grovhull.
v_h	Netto borsynk, eventuelt korrigert for annen borhullsdiameter enn 48 mm.
v_g	Netto borsynk, eventuelt korrigert for annen borhullsdiameter enn 48 mm.
N_m	Antall borhammere.
t_f	Tid til flytt.
t_{st}	Tid til stangskjøtt per hull.
f_k	Frekvens på borkronebytte.
t_k	Enhetstid for borkronebytte.
f_{sa}	Faktor for mangel på samtidighet.

Lading

Ladetiden avhenger av følgende faktorer (Zare, 2006):

- **Mengde sprengstoff.** Avhenger av bergets sprengbarhet, tunneltverrsnitt, boret lengde, borhullsdiameter, sprengstofftype og eventuelle krav til konturkvalitet.
- **Sprengstofftype.** Valget mellom ulike patronerte sprengstoff som Kemix A og dynamitt, og bulksprengstoff som ANFO og emulsjon. For patronerte sprengstoff er dimensjonen på patronen 10-15 mm mindre enn borhullsdiameteren.
- **Ladekapasitet.** Basert på arbeidsstudier.
- **Antall ladelinjer.** Likt antallet arbeidere som lader salven.
- **Antall borhull.** Bestemmer antall ladepunkter.
- **Borhullsdiameter.** Skiller mellom 48 mm og 64 mm borhull for ANFO. Ved bruk av emulsjon kan ladekapasiteten reguleres slik at ladetiden er uavhengig av borhullsdiameteren.
- **Boret lengde.** Bestemmer ladet lengde i hvert hull.

Figur 2.13 viser tidsbestemmende ladetid per salve som funksjon av antall hull. Kurven er basert på 5,0 m boret lengde. Innfelt figur gir korreksjonsfaktor, k_u , for fravikende boret lengde fra 5,0 m. Det er ikke gjort forskjell mellom tidsbestemmende ladetid per salve for patronerte sprengstoff og ANFO, da forskjellen i ladekapasitet kompenseres med forskjellen i spesifikk ladning. Forutsetter lading etter endt boring.

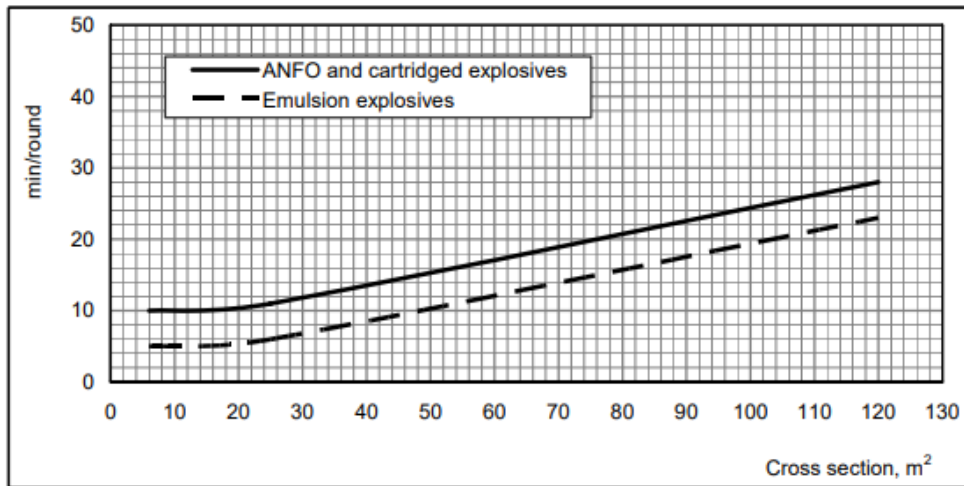


Figur 2.13: Tidsbestemmende ladetid og korreksjonsfaktor boret lengde (Zare, 2006).

Ventilasjon

Lengden på ventilasjonspausen avhenger av viftekapasitet, dukdiameter, antall duker, sprengstoffmengde per salve og avstanden mellom dukmunning og stuff (Zare, 2006).

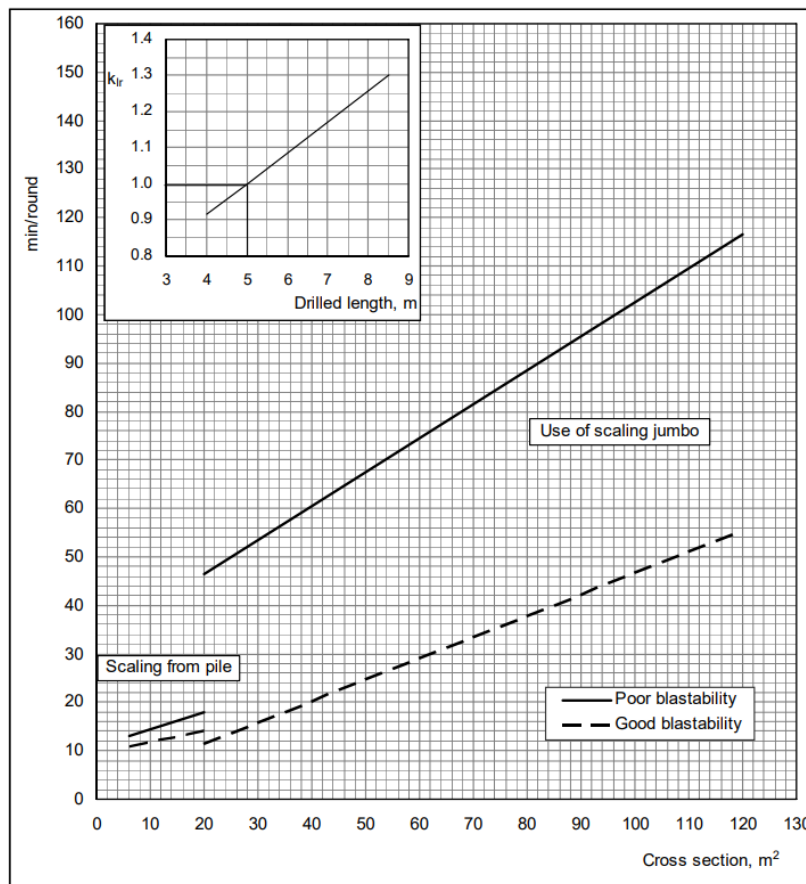
Avstanden mellom dukmunning og stuff er her antatt til 30-70 m. Nødvendig lengde på ventilasjonspausen for fjerning av sprenggasser fremkommer av figur 2.14 som en funksjon av tunneltverrsnitt. Dette er den tiden fra sprengning til konsentrasjonen av nitrose gasser på stuff er under terskelverdien. Figuren tar utgangspunkt i terskelverdi på 2 ppm. Dagens krav er 2 ppm for nitrogenmonoksid (NO) og 0,5 ppm for nitrogendioksid (NO₂) (Forskrift om tiltaks- og grenseverdier, 2021).



Figur 2.14: Tidsbestemmende ventilasjonspause (Zare, 2006).

Rensk

Tid til rensk fremkommer av figur 2.15, der tiden per salve er gitt som funksjon av tunneltversnitt. Innfelt figur beskriver korreksjonsfaktor for fravikende boret lengde. Bergets sprengharhet, og hvorvidt det benyttes egen rigg for rensk spiller inn på tiden.



Figur 2.15: Tid til rensk (Zare, 2006).

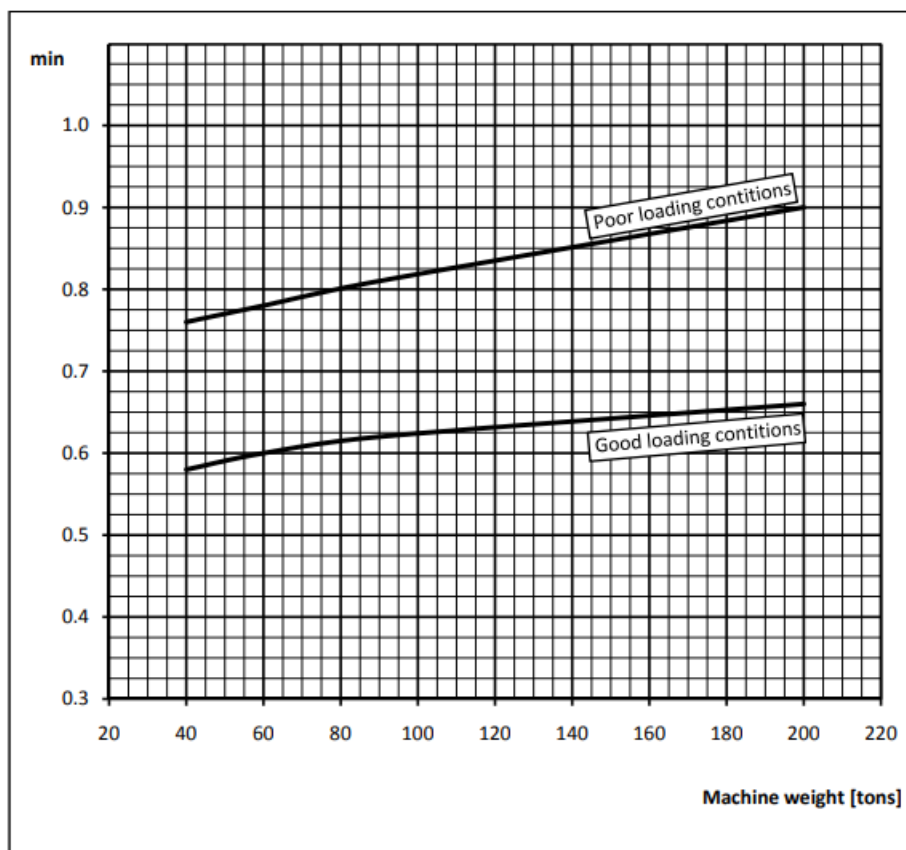
Utlasting

Ved lasting spiller følgende faktorer inn: netto syklustid; skuffestørrelse; fyllingsfaktor av skuffe; og fikserte tider.

Netto syklustid for én lasteoperasjon for hjullasteren inkluderer (Olsen, 2008)

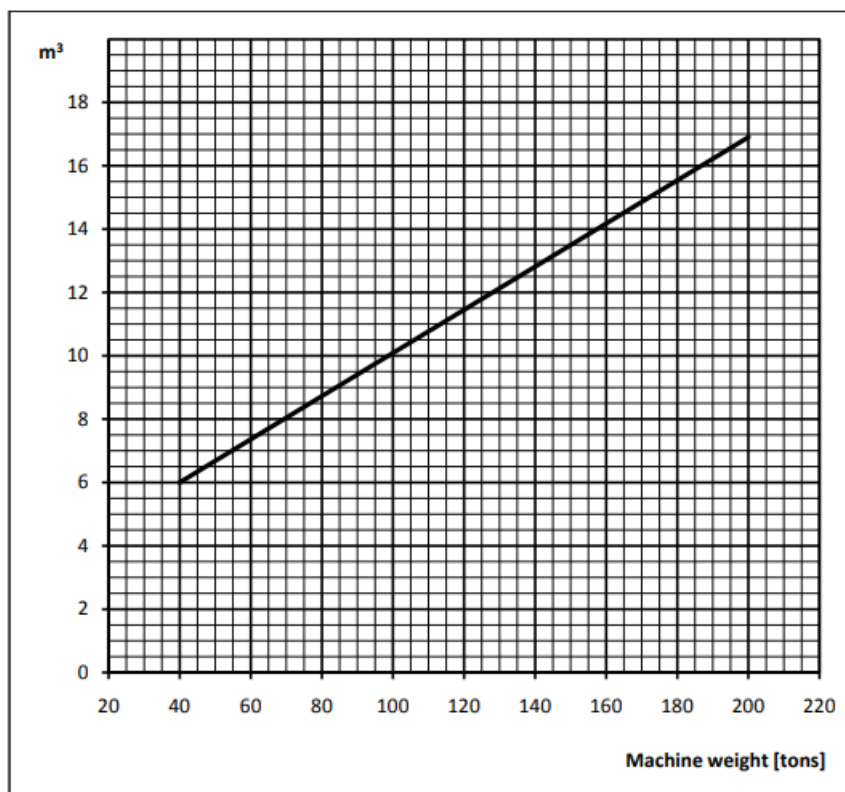
- fylling av skuffe
- transport til lastebil
- tømme skuffe i lastebil
- transport til utsprengte masser på stuff

Denne syklustiden fremkommer av figur 2.16, der syklustiden er gitt som funksjon av maskinvekt og lasteforhold.



Figur 2.16: Netto syklustid for hjullaster (Olsen, 2008).

Standard skuffestørrelse for hjullastere ved lasting av sprengt stein vises i figur 2.17 som funksjon av maskinvekt.



Figur 2.17: Skuffestørrelse for hjullaster (Olsen, 2008).

Normale fyllingsfaktorer for skuffe til hjullaster vises i tabell 2.2.

Tabell 2.2: Skuffefyllingsfaktor for hjullaster (Olsen, 2008).

Lasteforhold	Skuffefyllingsfaktor [%]
Bra	90
Middels	85
Dårlig	80

Brutto lastekapasitet per lastebil for hjullasteren beregnes ved hjelp av netto syklustid, skuffestørrelse og skuffefyllingsfaktor, for deretter å legge til fikserte tider. Fikserte tider er gitt i tabell 2.3.

Tabell 2.3: Fikserte tider per bil for hjullaster (Olsen, 2008).

Lasteforhold	Lastebil-manøvrering	Trimming, massehaug	Komprimering av bakkeplan	Plukke ut stein	Total fiksert tid
Bra	0,30	0,10	0,10	0,15	0,65
Middels	0,30	0,25	0,10	0,20	0,85
Dårlig	0,30	0,40	0,10	0,30	1,10

Fikserte tider tilhørende aktivitet til transportutstyret på massedeponiet fremkommer av tabell 2.4.

Tabell 2.4: Fikserte tider på deponi (Olsen, 2008).

Aktivitet i forbindelse med massetransport	Tid [min]
Manøvrering på tippet	0,40
Tipping av masser	0,50

Masser får et utvidet volum i forhold til teoretisk faste masser, og vises i tabell 2.5.

Tabell 2.5: Omregningsfaktorer for ulike masser (Olsen, 2008).

Type masse	Omregningsfaktor i forhold til teoretisk fast masse		
	Teoretisk fast masse	Løse masser	Anbrakte masser
Stein	1,00	1,55-1,65	1,35-1,50
Morene	1,00	1,30-1,40	1,00-1,10
Sand og grus	1,00	1,10-1,20	1,00
Leire	1,00	1,30-1,40	1,00-1,20

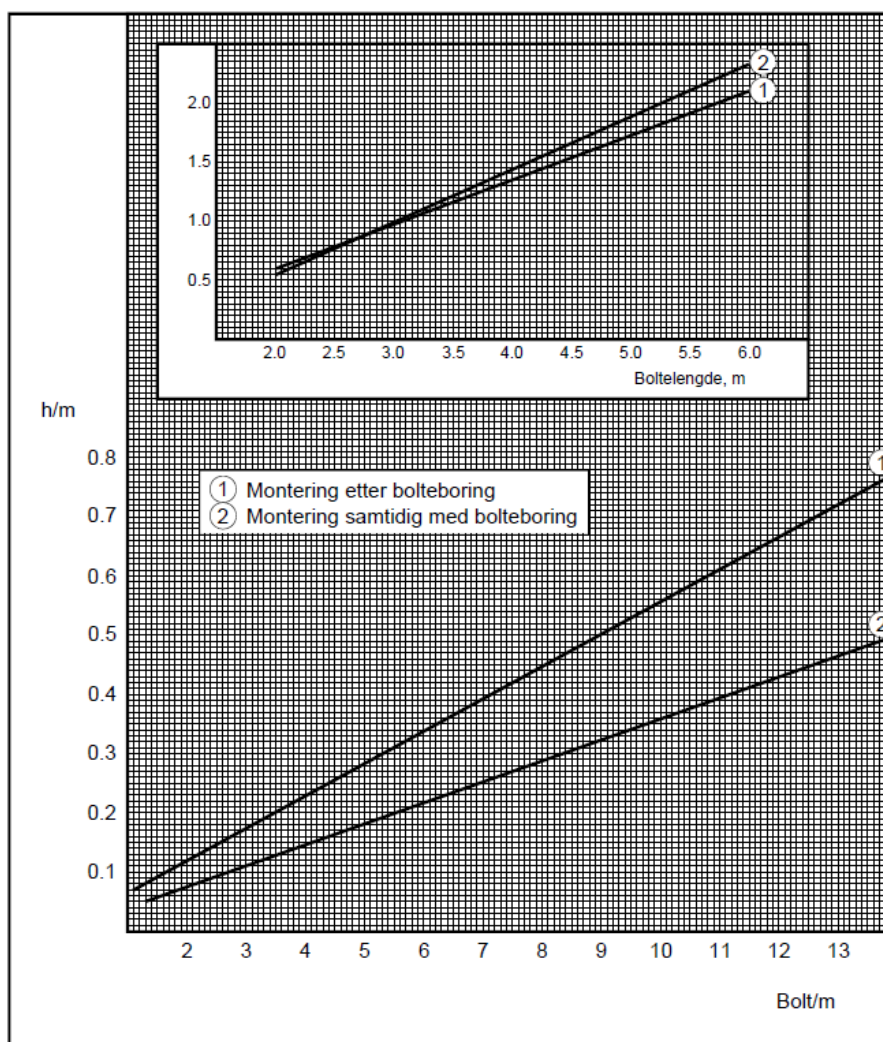
2.3.5 Enhetstider for sikring

I prosjektrapporten er sikringen forutsatt utført under drivingen, og utføres av drivlaget (Hermann et al., 1999). Økt tidsforbruk grunnet geologisk betinget heft legges til som en prosentandel av utført sikring, der prosjektrapporten legger til grunn 5-10 %. Geologisk betinget heft kan være bore- og ladevansker; redusert salvelengde; eller oppdelt tverrsnitt. Sikringsmetodene er tilegnet tidsbestemmende faktorer. I det videre presenteres sikringsaktiviteter som anses mest relevante for masteroppgaven, der full utstøping og frysing er sett bort ifra.

Bolting

Enhetstid til bolting, inklusive bore- og monteringsstid, illustreres av figur 2.18, (Hermann et al., 1999). Forutsatt polyesterforankrede bolter med basis boltelengde på 3 m.

Tidsbestemmende faktor er 1,0. Korreksjonsfaktor for boltelengder forskjellig fra 3 m gis av innfelt figur.

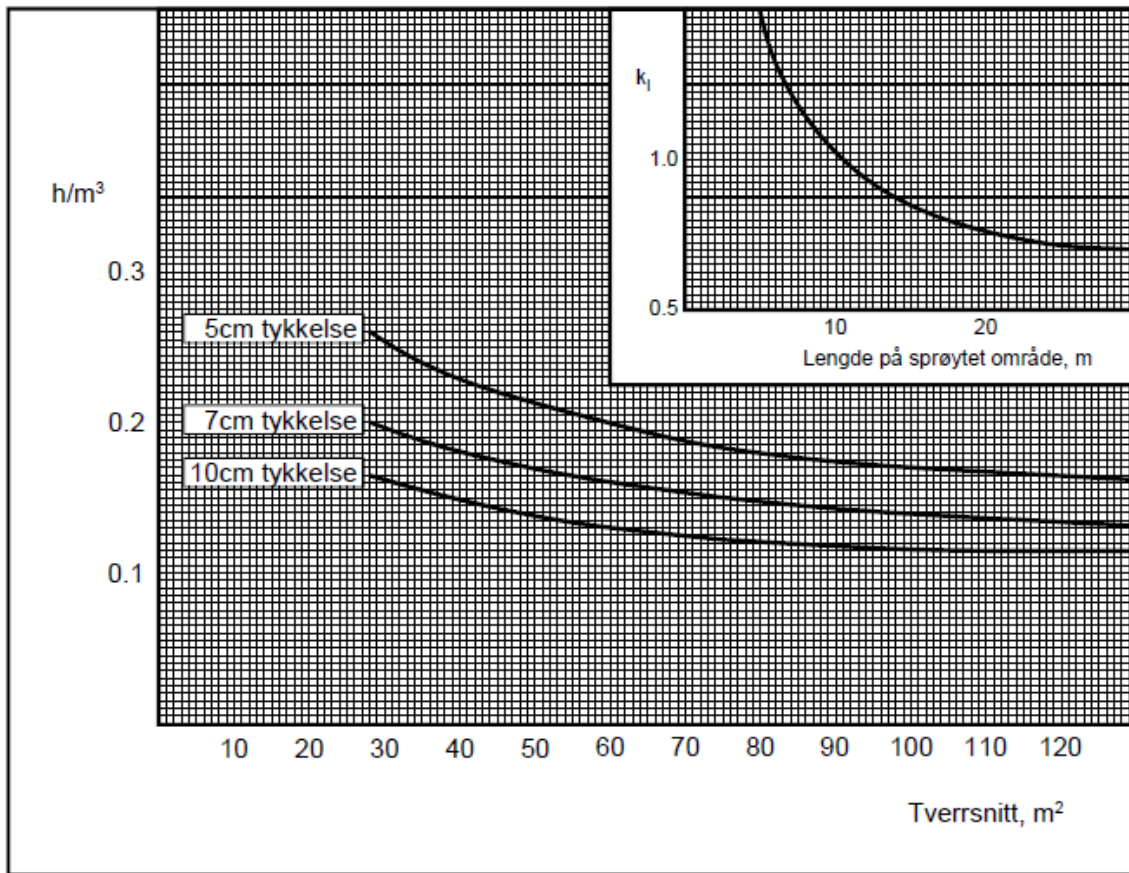


Figur 2.18: Tid til boltemontering (Hermann et al., 1999).

Sprøytebetong

Totaltid til betongsprøyting, inklusive rigg, vasking av fjelloverflate og selve sprøytingen, fremkommer av figur 2.19, (Hermann et al., 1999). Basis sprøytet lengde på 10 m, og prelltap er inkludert. Tidsbestemmende faktor på 0,2-0,7, forutsatt at hovedvekten av sprøytingen skjer på natt utenom ordinær skifttid. Hvis sprøytingen skjer etter hver salve, må

tidsbestemmende faktor økes betydelig. Korreksjonsfaktor for avvikende sprøytede lengder vises i innfelt figur.

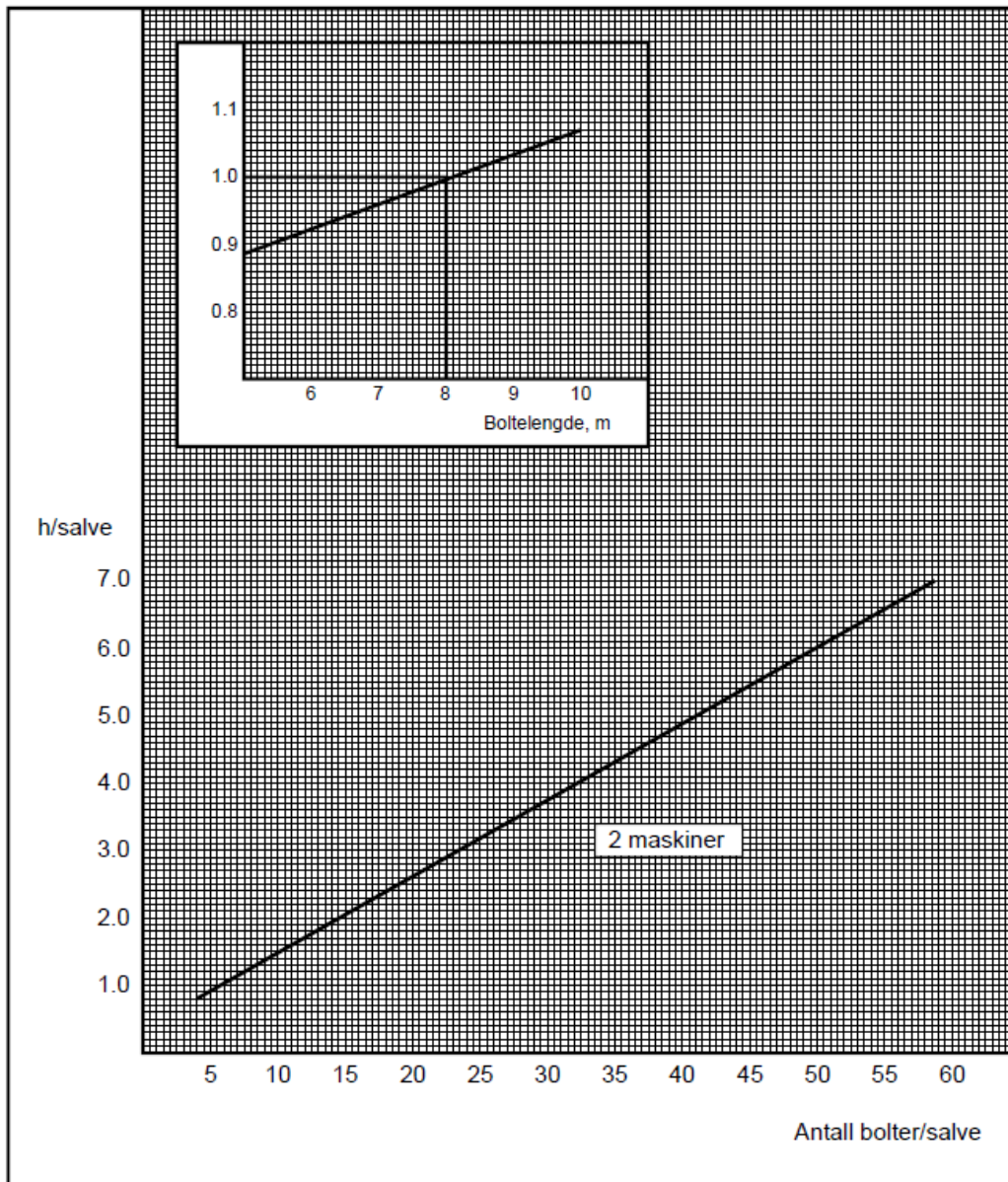


Figur 2.19: Tid til sprøytebetong (Hermann et al., 1999).

Forbolting

Tid til forbolting, inklusive rigg, boring, gysing og festing, vises i figur 2.20, (Hermann et al., 1999). Forutsatt 8 m bolt, og ekstra sprøytebetong må påregnes i områder med forbolter.

Kapasiteten avhenger av treningseffekt, og tidsbestemmende faktor er 1,0. Korreksjonsfaktor for avvikende boltelengder vises i innfelt figur.



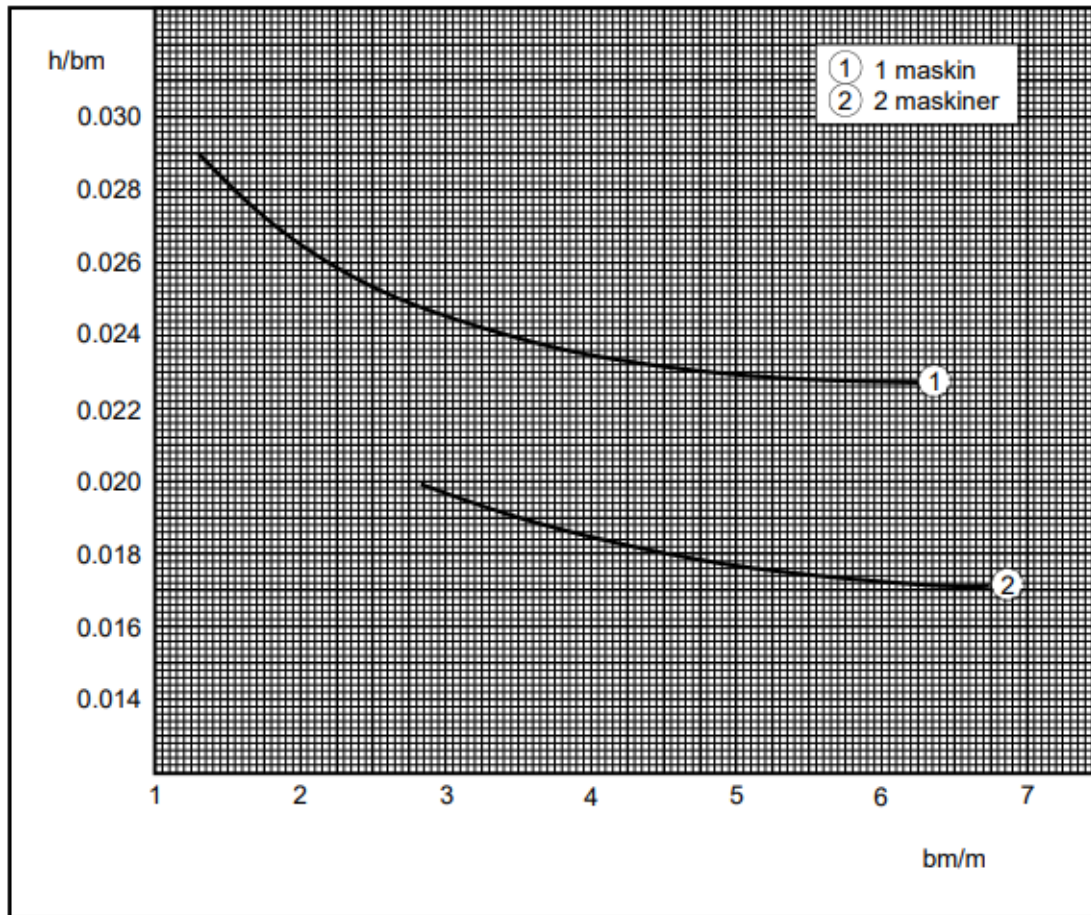
Figur 2.20: Tid til forbolting (Hermann et al., 1999).

Vanligvis er lengden på forboltene 6 m, men lengder på 8 m har blitt forsøkt (NFF, 2010).

Ved bruk av boltelengder på 6 m bør salvelengden ligge mellom 2,5 og 3 m, slik at det sikres overlapp mellom rastene.

Sonderboring

Tid til sonderboring inklusive rigging, boring, uttrekk, stangskjøt og tid til lekkasjemålinger fremkommer av figur 2.21 (Hermann et al., 1999). Basis boret lengde er 30 m og 10 m overlapp. Tidsbestemmende faktor er 1,0.



Figur 2.21: Tid til sonderboring (Hermann et al., 1999).

For å kunne beregne bm/m er det nødvendig med følgende formelverk (Hermann et al., 1999):

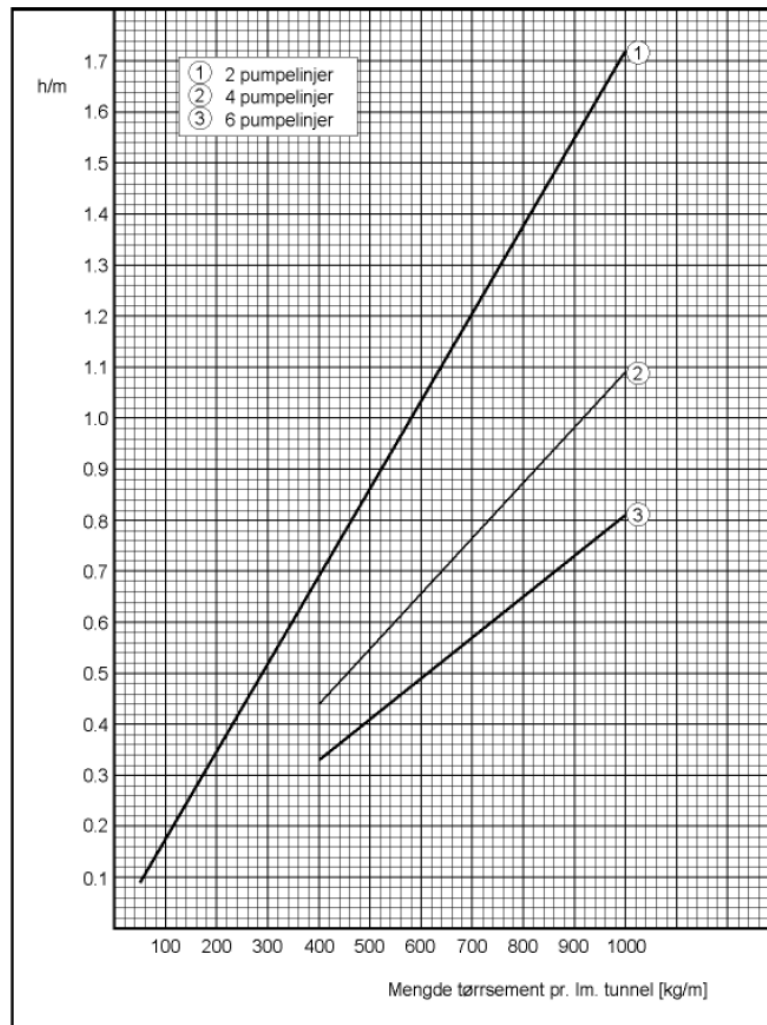
$$\frac{bm}{m} = \frac{a_{sonder} * a_{hull} * l_{sonderhull}}{(l_{sonderhull} - l_{overlapp}) * 100 \%}$$

der

- a_{sonder} – lengden av hele tunnelen som skal sonderbores [%]
- a_{hull} – antall sonderhull
- $l_{sonderhull}$ – lengde sonderhull [m]
- $l_{overlapp}$ – lengde på overlapp [m]

Injeksjon

Tid til injisering, inklusive tid til pumping, montering av pakkere, slangeskifter med mer, fremkommer av figur 2.22, (Hermann et al., 1999). Forutsatt normalisertpumpekapasitet på 310 kg/h.

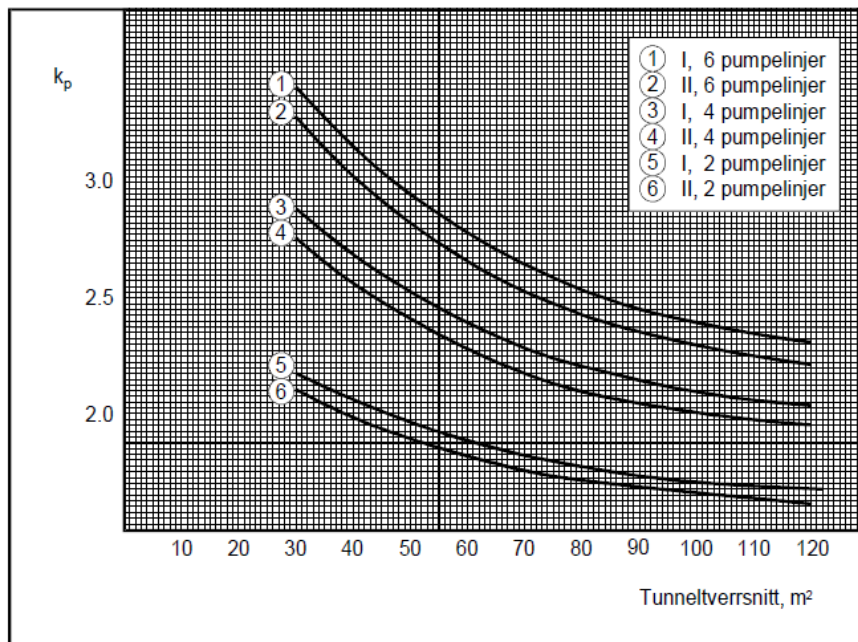


Figur 2.22: Tid til injeksjon (Hermann et al., 1999).

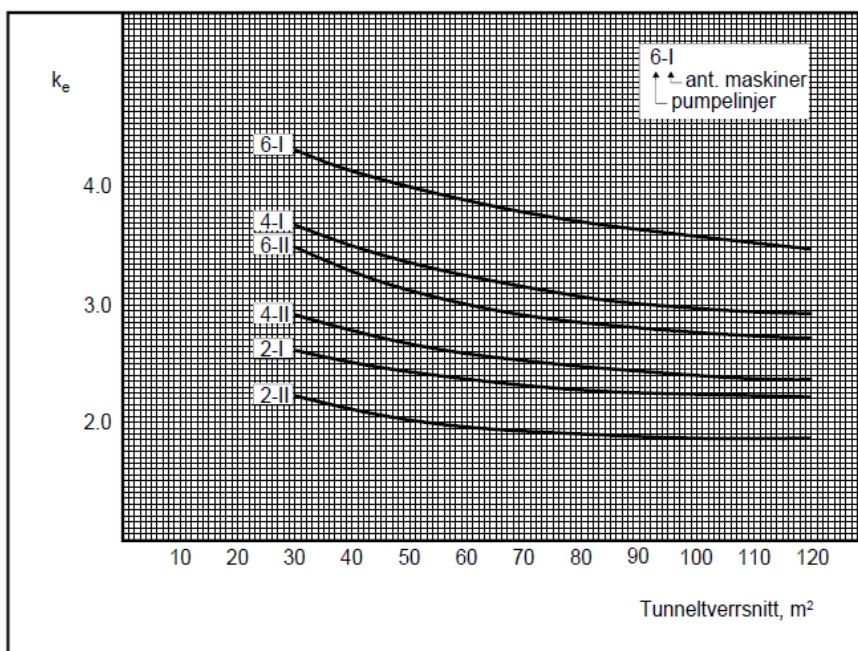
Mengden tørrsement er et gjennomsnitt for hele tunnallengden. Alle tall forutsetter sementbasert injeksjon under høyt trykk. Tidsbestemmende faktor er 0,6-0,7.

Korreksjonsfaktor for tidsbruken avhenger av om det injiseres parallelt med skjermboring, eller om det injiseres etter skjermboring, samt hvor mange maskiner som bidrar. Figur 2.23 og figur 2.24 illustrerer korreksjonsfaktorer for henholdsvis injisering parallelt med boring, og injisering etter boring. Romertallene i figurene angir hvor mange maskiner som brukes. Andre forutsetninger er som følger:

- Lengde injeksjonshull: 23 m.
- Lengde kontrollhull: 20 m.
- Hulldiameter: 51 mm.
- Antall kontrollhull: 6.
- Tidsbestemmende herdetid: 4 t.



Figur 2.23: Korreksjon for injeksjon parallelt med skjermboring (Hermann et al., 1999).



Figur 2.24: Korreksjon for injeksjon etter skjermboring (Hermann et al., 1999).

2.4 Salvesyklus

Dette kapittelet tar for seg salvesyklusen og dens bestanddeler.

2.4.1 Generelt om salvesyklus

Konvensjonell tunneldriving har en sekvensiell oppbygning (Grendal et al., 2014), og hver sprengningssekvens kalles salvesyklus. Salvesyklusen består av en rekke aktiviteter som avhenger av hverandre. Når siste aktivitet er avsluttet, påbegynner den første igjen, og syklusen fortsetter. Hvor mange aktiviteter som inngår i salvesyklusen, avhenger av forholdene tilknyttet aktuelt prosjekt. Eksempelvis vil det ikke i alle prosjekter være nødvendig med forinjeksjon og særlige hensyn til rystelser og støy. For å etablere en grunnleggende forståelse beskrives dog alle aktuelle aktiviteter i salvesyklusen i det følgende.

2.4.2 Forinjeksjon

Forinjeksjon i tunnelbygging utføres for å redusere permeabiliteten i bergmassen, samt konsolidere bergmassen (NFF, 2011). Prosedyren er tidkrevende og kostbar, og vil kun utføres dersom det er høyst nødvendig, både med hensyn på forholdene under selve drivingen og fra et levetidsperspektiv for tunnelen (A. Bruland, personlig kommunikasjon, 26. oktober 2021). Avhengig av sammensetningen av injeksjonsmassen kan herdetiden alene være opptil 10 timer i en tunnel under normale omstendigheter (Hognestad et al., 2010). Forinjeksjon foregår enten sporadisk, ved at det identifiseres et behov som følge av løpende vurderinger under driving, eller systematisk, der det på forhånd er bestemt at et strekke, eller hele tunnelen, skal forinjiseres (A. Bruland, personlig kommunikasjon, 26. oktober 2021). Vurderingene underveis baseres på sonderboring, lekkasjemålinger og seismikk.

I en skjerm rundt hele tunneltverrsnittet, bores typisk 18-24 meter lange hull med boreriggen, før det pumpes en injeksjonsmasse under høyt trykk inn i hullene med en egen injeksjonsrigg (Hognestad et al., 2010). Borhullene kan strekkes opp mot 30 meter. Injeksjonsmassen, som typisk er en sementblanding tilsatt ulike kjemikalier og varierende tilslagsstørrelse, strømmer inn i sprekker og kanaler i berget som er forbundet med injeksjonshullet og herder. Man oppnår da en situasjon med stillestående vann (A. Bruland, personlig kommunikasjon, 26. oktober 2021). Sammensetningen til injeksjonsmassen avhenger av sprekkesystemet og

åpningen til sprekkene (Hognestad et al., 2010). Normalt avsluttes injeksjonsprosedyren når ett av følgende to stoppkriterier er oppfylt:

- (1) Når et angitt mottrykk i hullet oppnås under pumping.
- (2) Når en angitt mengde injeksjonsmasse er pumpet inn.

2.4.3 Boring

Boring foregår med hydrauliske borerigger av varierende størrelse og oppsett avhengig av prosjektrelaterte forhold, som eksempelvis tverrsnittsstørrelse (Bruland, 2013c). Boringen utføres for å skaffe plass til sprengstoffet for løsbryting av bergmasse (Bruland, 2013a). I Norge er typisk boreriggene utstyrt med datasystemer som kontrollerer boreytelsen og automatisk innretter boreriggen for neste salve, samt kartlegger resultatet av forrige salve (NFF, u.å.). Antall hull i salven avhenger av tverrsnittsstørrelse, sprengstofforbruk, bergmassens sprengbarhet, borhullsdiameter, salvelengde, ferdighetsnivå og eventuelle kvalitetskrav (Bruland, 2013d). Med 45 mm diameter borhull og 5 m salvelengde, kan eksempelvis et tverrsnitt på 90 m² med middels sprengbarhet ha 122 hull, pluss fire grovhull i kutten.

2.4.4 Lading

Når salven er ferdigboret starter ladingen av salven, der borhullene fylles med sprengstoff (Grendal et al., 2014), samt en eller flere tennere som har til hensikt å initiere sprengstoffet (Olsen, 2002b). Det mest brukte sprengstoffet i tunnel er slurry-basert, og er et to-komponentsystem som blandes direkte under lading (NFF, 2014). Den ene komponenten er et flytende brennstoff, og den andre en vandig løsning av nitrogenrike salter (Olsen, 2002b). Slurry er vanskelig å initiere, så primer må benyttes i tillegg for å sikre initiering. Lading kan foregå mens boringen pågår, dersom det er tillatt i det aktuelle tilfellet (Bruland, 2013c).

2.4.5 Sprengning

Tennerne initieres, og initierer videre sprengstoffet i borhullene som knuser og bryter berget løst, før det kastes mot den frie flaten (Olsen, 2002a). I tunnelsprengning er den frie flaten konstruert av kutten, slik at omkringliggende hull sprenges mot denne nyåpnede frie flaten (Bruland, 2013d). Sprengningen tilpasses tilstanden i berget og eventuelt omliggende miljø

slik at skader på eksisterende infrastruktur unngås (Grendal et al., 2014). Under normale forhold uten særlige krav til rystelser, grunnet eksempelvis nærliggende infrastruktur, sprenges hele salven med tidsintervaller mellom tennerne, slik at ikke alt sprengstoffet detonerer samtidig. Ved rystelsesbegrensninger settes det inn forsinkelser slik at mindre sprengstoff detoneres per tenner. Dersom det brukes NONEL-tennere kobles det inn forsinkerblokker, mens det ved elektroniske tennere legges inn ønsket forsinkertid elektronisk (Olsen, 2002c).

2.4.6 Ventilering

Etter skyting må bergrommet ventileres ved at ren luft blåses inn på stuff for uttynning av sprenggasser og dieselavgasser (Johannessen et al., 1992). Dette er de to parameterne som hovedsakelig er dimensjonerende for ventilasjonsbehovet ved konvensjonell tunneldrift. I denne sammenheng finnes to ulike metoder for ventilasjon: enveis ventilasjon; og toveis ventilasjon. For ren uttynning av skytegassproppen benyttes enveis ventilasjon i form av kun blåsende ventilasjon, mens det for lengre tunneler og store tverrsnitt er nødvendig med toveis ventilasjon. I lengre tunneler fordrives skytegassproppen over lengre avstander og får stor utstrekning, og for å sikre et akseptabelt arbeidsmiljø bør det dermed brukes en form for toveis ventilasjon der det i tillegg til innblåsende luft brukes et avtrekkssystem. Andre tiltak mot sprenggasser utenom ventilasjon kan være: personlig verneutstyr, herunder blant annet filtermasker; og ulike former for overtrykksventilasjon, som førerhytte med overtrykk og opphold i bu med overtrykk (Rønn et al., 2000).

Ventilasjonsanlegget omfatter en ventilasjonsduk og et vifteopplegg (Johannessen et al., 1992). I tidsrommet der ventileringen foregår bør ingen aktivitet foregå på stuff, da det tar en viss tid før luftkvaliteten er tilstrekkelig for et akseptabelt arbeidsmiljø. Denne driftspausen kalles «ventilasjonspause», og er forskjellig for de to ventilasjonsmetodene. Lengden på ventilasjonspausen avhenger av: tunneltverrsnittet; avstanden mellom dukmunningen og stuffen; den gitte avstanden skytegassproppen må presses utover fra dukmunningen for akseptabelt arbeidsmiljø gjennom hele tunnelen; og lufttilførselen. Krav til arbeidsmiljø settes av arbeidstilsynet og reguleres av arbeidsmiljøloven med tilhørende forskrift om tiltaks- og grenseverdier (Arbeidstilsynet, u.å.).

2.4.7 Utlasting

Utsprengte bergmasser lastes opp på dumpere eller lastebiler og kjøres til deponi eller til bruk andre steder på anlegget (Grendal et al., 2014). Prinsipielt er det tre forskjellige lastemaskintyper som laster opp massene: gravemaskin, belte- og hjullaster og skrapelaster (Bruland, 2013c). I norsk sammenheng utføres lasting og transport typisk med henholdsvis hjullaster og lastebiler, og drives av diesel eller elektrisitet for å ivareta arbeidsmiljøet på stuff (NFF, u.å.).

Ved utlasting må de utsprengte massene transporteres ut av tunnelen så snart som mulig av fremdriftsmessige hensyn (Nye Veier, 2021). Følgelig kan det være nødvendig med mellomlagring av de utsprengte massene i umiddelbar nærhet av tunnelmunningen.

Før utlasting av steinrøysa påbegynner, bør røysa spyles med vann for å løse opp forbindelser i skytegassene, samt binde støvet som oppstår fra sprengningen (Johannessen et al., 1992).

2.4.8 Rensk

Sprengningen påkjenner berget, og etter utlasting pigges løst berg ned med en hydraulisk pigghammer, typisk påmontert en gravemaskin (Grendal et al., 2014). Driftsrensk er den rensk som skal utføres etter hver sprengte salve, og som er nødvendig for gjennomføring av videre arbeider på en sikker måte (SVV, 2018). Som hovedregel skal maskinell driftsrensk etterfølges av manuell driftsrensk med spett eller annet manuelt utstyr. I tillegg til rensk av frilagt bergoverflate som følge av sprengning, renskes bakenforliggende salvestrekninger som en del av manuell driftsrensk.

2.4.9 Sikring

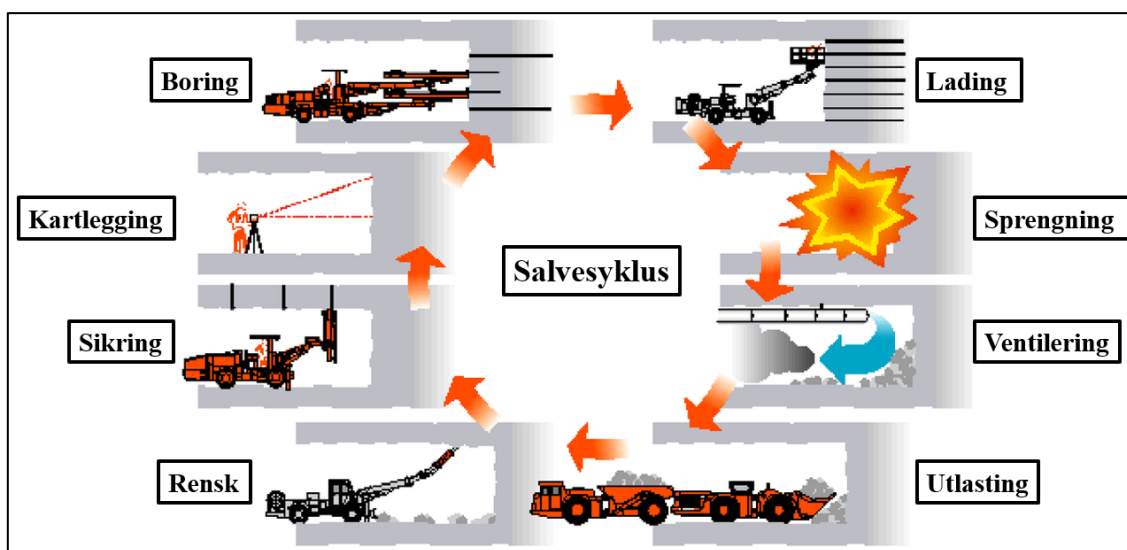
Etter driftsrensk sikres heng og vegger med bolter og sprøytebetong, eventuelt også tyngre sikring (JBV, u.å.). Basert på en klassifisering av bergmassens kvalitet, kan sikringsomfanget dimensjoneres med Q-systemet, som blant annet angir boltelengder, tykkelse på laget med sprøytebetong og antall lag med armeringsjern i sprøytebetongbuer (NGI, 2015). Tyngre sikring omfatter blant annet forbolting, sprøytebetongbuer og full utstøping (Sve et al., 2008). Sprøytebetongbuer har dog i stor grad erstattet full utstøping (NGI, 2015). I tillegg til eventuell bruk av Q-systemet, har eksempelvis Statens vegvesen beskrevet egne krav til

sikring i *Håndbok R761 Prosesskode 1 Standard beskrivelsestekster for vegkontrakter* (SVV, 2018).

I vanlige byggherrestyrte entrepriser er byggherren ansvarlig for prosjektering og bestemmelse av metode og permanentsikring (Sve et al., 2008). Entreprenøren har ansvaret for etablering av tilstrekkelig sikring for å ivareta sikkerheten under driving. I den forbindelse stiller Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) krav i sin *Bergsprengning: veiledning til kapittel 10*. Her beskrives det blant annet at stoffen må være forsvarlig rensket, sikret og kontrollert mot gjenstående ladninger og deler av ladninger fra tidligere arbeid, før boringen kan tilta og ny salvesyklus påbegynnes (DSB, 2019). Ved behov for tyngre sikring og stabiliserende tiltak foran stoff, er det vanligvis byggherre som er ansvarlig for prosjektering av sikringen (Sve et al., 2008).

Forholdene i tunnelen kontrolleres og kartlegges av geologer etter hver salve (JBV, u.å.), og må foregå i perioden før sprøytebetong påføres (Sve et al., 2008).

Figur 2.25 illustrerer en typisk salvesyklus, men forinjeksjon er utelatt.



Figur 2.25: Salvesyklus, modifisert etter Heiniö (1999).

2.4.10 Bakstuff

I tillegg til de overnevnte aktivitetene som inngår i salvesyklusen, må det utføres arbeider som tilrettelegger for driften på stoff (Bruland, 2013b). Personene som utfører disse oppgavene går under betegnelsen *bakstuff*, og bistår ikke i særlig grad i selve driften på stoff.

Arbeidsoppgavene omhandler å føre frem ventilasjon, elektrisitet, vann og eventuelt luft, til stoffen. Reparatørene har en særdeles viktig oppgave med å holde utstyret i stand.

2.5 Nedbrytning og planlegging av prosjekter og aktiviteter

I dette kapittelet vil teori knyttet til planlegging av et prosjekt eller en aktivitet presenteres. Dette vil være til hjelp for nedbrytning av større aktiviteter, se sammenhenger og avhengigheter mellom aktiviteter, illustrere aktivitetene og bestemme varigheten både på aktivitetene og prosjektet.

2.5.1 Prosjektplanlegging

Prosjektplanlegging som prosess omfatter oppgaver og aktiviteter som dokumenterer og illustrerer hvordan prosjektets resultat skal utformes og leveres (Hussein, 2016).

Prosjektplanlegging tar utgangspunkt i resultatet fra initieringsfasen, beskrivelsen av formålet, effektmålene, suksesskriteriene og leveransene og skal dokumentere og resultere i en hensiktsmessig handlemåte for gjennomføring av prosjektet. Hussein (2016) viser videre til følgende planleggingsverktøy, som er nyttige som kommunikasjonsmiddel for synliggjøring og bevisstgjøring av nødvendige arbeidsoppgaver i prosjektet

- milepælplan
- prosjektnedbrytningsstruktur (WBS)
- nettverksdiagrammer
- ressursdiagrammer
- S-kurve

I det følgende vil prosjektnedbrytningsstruktur og nettverksdiagram utdypes, da de vurderes relevante for denne oppgaven.

2.5.2 Prosjektnedbrytningsstruktur

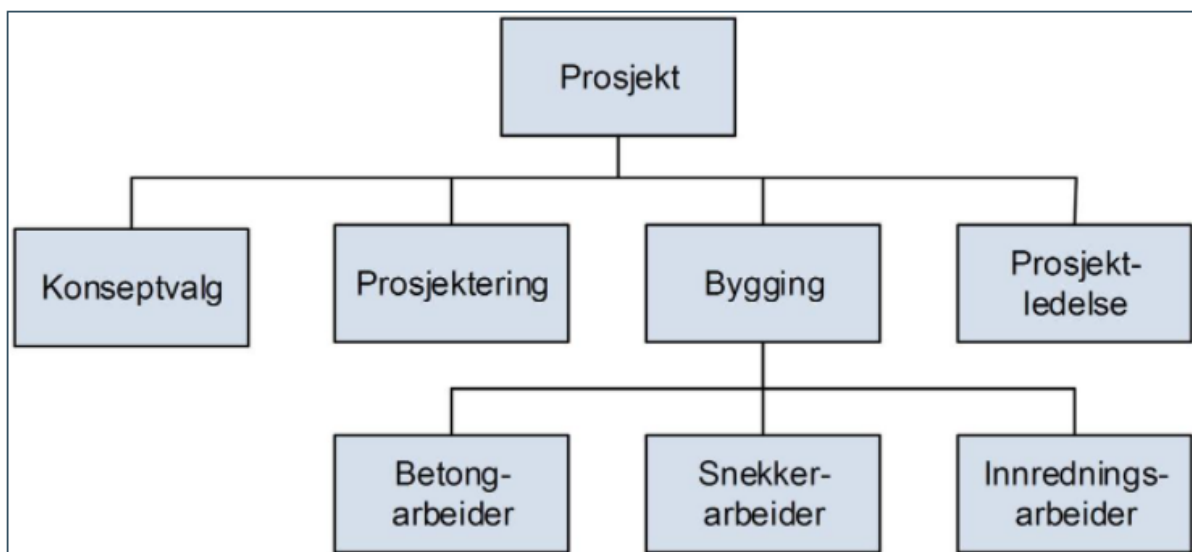
Prosjektnedbrytningsstruktur er et hjelpemiddel for å bryte ned prosjektet til små, autonome og kontrollerbare arbeidsoppgaver kalt arbeidspakker (Hussein, 2016). I det videre vil prosjektnedbrytningsstruktur omtales som WBS, som kommer av den engelske navnet på verktøyet: *Work Breakdown Structure*. Nederste nivå i en WBS inneholder arbeidspakkene. En arbeidspakke er et miniprojekt med et definert resultat med følgende egenskaper:

- Status eller ferdigstillelse kan lett og utvetydig bestemmes.
- Har kort varighet.
- Har en ansvarlig enhet eller person.

Prinsipper for hvordan WBS-en skal utformes er ifølge Hussein (2016):

- Hvert WBS-element i strukturen skal representere en håndfast leveranse.
- Hvert WBS-element på høyere nivå fås ved å aggregere alle underordnede WBS-elementer.
- Et underordnet WBS-element skal kun ha ett moder-WBS-element.
- Nedbrytning av et høyere WBS-element skal beskrive hvordan elementet skal bli produsert og verifisert.
- Komponenter i WBS-en må være unike og godt definerte for å unngå duplisering av arbeid.
- WBS-strukturen må kunne oppdateres og gi mulighet for fleksibilitet til å kunne håndtere endringer.
- WBS-en må inneholde alt av arbeid i prosjektet.
- Alle viktige dokumenter må være med i WBS-en.
- Koding må gjenspeile den logiske strukturen i WBS-en.

Et eksempel på en slik WBS vises i figur 2.26.



Figur 2.26: Eksempel på WBS (Rolstadås, 2021a).

2.5.3 Nettverksplanlegging

Nettverksplanlegging er en teknikk som brukes innen prosjektledelse for tidsplanlegging av aktiviteter (Rolstadås, 2021a). Et prosjekts tidsplan tar utgangspunkt i prosjektets WBS. For hver arbeidspakke defineres hvilke aktiviteter som skal gjennomføres. Normalt må aktivitetene gjennomføres i en bestemt rekkefølge. Dette kalles rekkefølgeavhengigheter. Formålet med nettverksplanlegging er å

- (1) bestemme prosjektets sluttdato
- (2) bestemme hvilke aktiviteter som direkte påvirker prosjektets varighet

Grunnlaget for en nettverksberegning er følgende:

- En liste over hvilke aktiviteter som inngår.
- Hvilke rekkefølgeavhengigheter som gjelder mellom aktivitetene.
- Aktivitetenes varighet.

Et nettverksdiagram er en skjematisk illustrasjon av aktivitetene i prosjektet og avhengighetene mellom dem (Hussein, 2016).

I nettverkslitteraturen benyttes begreper som kritisk aktivitet og kritisk vei (Rolstadås, 2021a). Kritiske aktiviteter kan defineres som aktiviteter som direkte påvirker prosjektets varighet, altså har de ingen flyt og dermed ingen planleggingsfrihet. En sammenhengende kjede av kritiske aktiviteter fra start til slutt kalles en kritisk vei.

Det finnes to hovedteknikker for å beregne varighet på: (1) Med faste estimater for varigheten av aktiviteten (deterministisk); eller (2) med estimater beheftet en viss usikkerhet som følger en statistisk sannsynlighetsfordeling (stokastisk).

Critical Path Method (CPM) er et eksempel på den første teknikken, og Program Evaluation and Review Technique (PERT) er et eksempel på den andre teknikken (Austeng et al., 2005a; Klakegg, 1994; Rolstadås, 2021b). Ofte gjøres stokastisk nettverksplanlegging basert på simuleringer ved hjelp av datamaskiner (Rolstadås, 2021b).

Hussein (2016) viser til at nettverksplanlegging, Gantt-diagram og PERT er verktøy og metoder som benyttes for å beskrive og visualisere tidsplaner for prosjekter. Dette samsvarer med både Austeng et al. (2005a) og Klakegg (1994), som begge også presenterer PERT.

2.6 Tidsplanlegging under usikkerhet

I dette kapittelet vil det presenteres teori knyttet til tidsplanlegging under usikkerhet.

2.6.1 Håndtering av usikkerhet

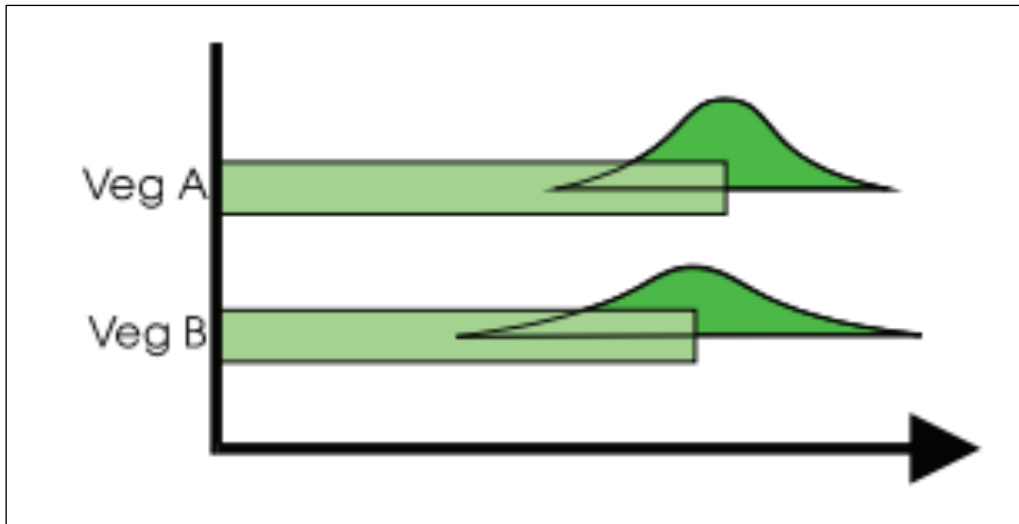
Tradisjonelt har planlegging og styring av fremdrift i prosjekter generelt vært basert på deterministiske planleggingsteknikker med fokus på kritisk vei, som Critical Path Method (CPM) (Austeng et al., 2005a). Det har ikke vært noen tradisjon for å hensynta usikkerhet i tidsplanlegging.

Program Evaluation and Review Technique (PERT) ble utviklet i USA på 60-tallet, og var det første forsøket på metodikk for å analysere usikkerhet i tidsplanlegging (Austeng et al., 2005; Klakegg, 1994). PERT tok utgangspunkt i å utvide CPM slik at den kunne inkludere usikkerhet i tidsanslagene (Klakegg, 1994). De grunnleggende konseptene i PERT er følgende (Austeng et al., 2005a):

- Grundige tidsestimater for alle aktiviteter.
- Tidsestimatenes eksponering for usikkerhet.
- Nøyaktig kjennskap til den rekkefølgen aktivitetene må utføres i.

PERT er basert på nettverk og stokastiske analyser av varighet på aktivitetene (Austeng et al., 2005a). Den store svakheten med metoden var blant annet at det kun ble summert usikkerhet langs kritisk vei. Det er de parallelle nærkritiske vegene som representerer den største utfordringen i nettverksteknikkene som håndterer usikkerhet. De nærkritiske vegene kan ha en tendens til å få utsatt starttidspunkt, eller bruke lengre tid ved utnyttelse av flyt. Dette medfører ofte at disse nærkritiske vegene blir mer eller mindre kritiske, og at en eller flere av dem vil kunne bli ytterligere forsinket, og derfor forlenge den totale varigheten til prosjektet.

Når det er parallelle aktiviteter i nettverket betyr det at den lengste av de aktuelle vegene i strukturplanen avgjør når man blir ferdig (Austeng et al., 2005a). Dette er kjent i deterministisk nettverksteknikk. Når man inkluderer usikkerhet i varigheten til den enkelte aktivitet i nettverket får man et nytt problem: Hvilken vei gjennom nettverket blir avgjørende for når prosjektet avslutter? Dette illustreres i figur 2.27.



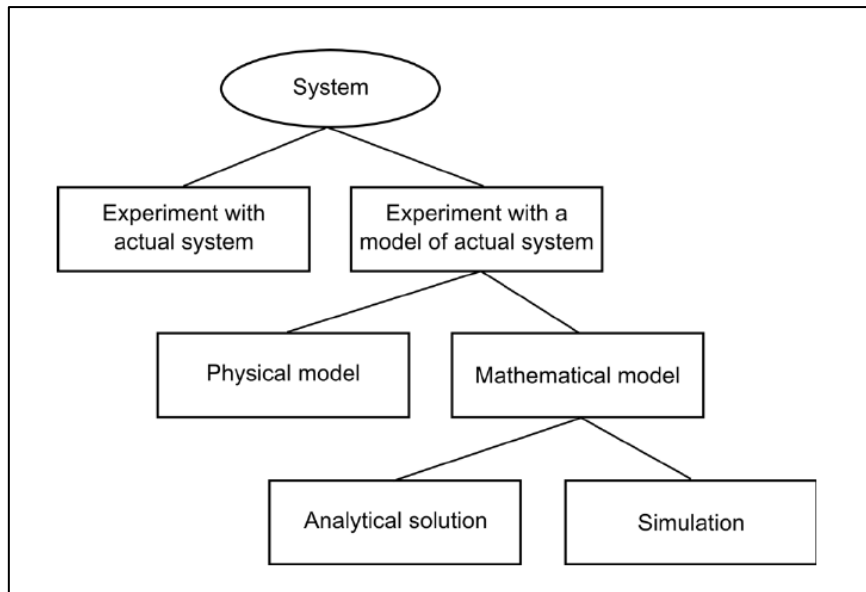
Figur 2.27: To parallelle, usikre veger (Klakegg, 1994).

2.6.2 System, modellering og simulering

Å imitere operasjonene til ulike typer prosesser i den virkelige verden kan kalles simuleringer (Law, 2007). Prosessen av interesse kalles systemet, og for å kunne studere systemet vitenskapelig må det gjøres et sett med antakelser om hvordan det fungerer. Disse antakelsene utgjør modellen som blir brukt for å prøve å få en viss forståelse av hvordan systemet oppfører seg. Videre kan systemet defineres som en samling av enheter som handler og interagerer sammen for å oppnå et logisk mål. Systemets tilstand kan defineres som samlingen av nødvendige variabler for å beskrive systemets tilstand på et gitt tidspunkt, relativt til det som studeres.

Et system kan kategoriseres som diskret eller kontinuerlig (Law, 2007). Et diskret system er et system der tilstandsvariablene endres øyeblikkelig på adskilte tidspunkter. Et kontinuerlig system er et system der tilstandsvariablene endres kontinuerlig med hensyn til tiden.

Ethvert system vil som oftest i løpet av sin levetid få et behov for å studeres for å oppnå en forståelse for forholdet mellom de ulike komponentene, eller for å forutse ytelsen under en ny betingelse (Law, 2007). I figur 2.28 presenteres et flytskjema for ulike måter å studere et system på. Videre presenteres valgene med bakgrunn i Law (2007).



Figur 2.28: Måter å studere et system (Law, 2007).

Eksperiment med det faktiske systemet eller eksperiment med en modell av systemet?

Hvis det er mulig å endre og eksperimentere med det faktiske systemet og dermed la det operere under nye betingelser, er dette sannsynligvis ønskelig (Law, 2007). I et slikt tilfelle er det ingen tvil om at det som studeres er valid. Dog, er dette ofte for kostbart eller for forstyrrende for systemet. Av denne grunnen er det ofte nødvendig å bygge en modell som en representasjon av systemet, og studere den som en erstatning for det faktiske systemet.

Fysisk modell eller matematisk modell?

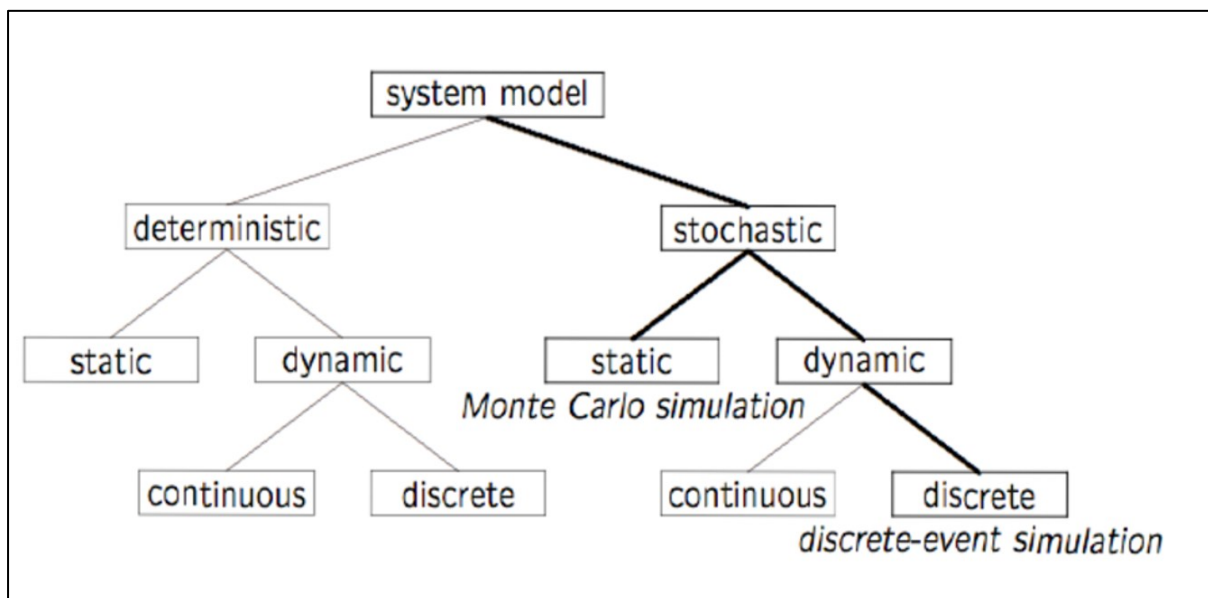
For mange forbindes ordet «modell» med modelleire-biler i vindtunneler eller tankskip i svømmebasseng (Law, 2007). Dette er eksempler på fysiske modeller, og de er sjelden typiske modeller av interesse i systemanalyse. Noen ganger har de blitt funnet nyttig, men majoriteten av slike modeller er matematiske. Matematiske modeller representerer et system i form av logiske og kvantitative sammenhenger som manipuleres og endres for å se hvordan modellen reagerer, og dermed se hvordan systemet ville reagert, gitt at den matematiske modellen er valid.

Analytisk løsning eller simulering?

Når den matematiske modellen er bygget må man se hvordan den kan brukes for å besvare spørsmål av interesse om det systemet den skal representere (Law, 2007). Hvis modellen er

simpel nok, kan det være mulig å bearbeide sammenhengene og mengdene for å få en eksakt analytisk løsning. Noen analytiske løsninger kan bli ekstraordinært komplekse, og krever omfattende beregningsressurser. Hvis en analytisk løsning til en matematisk modell er tilgjengelig og beregningseffektiv, er en slik løsning som oftest å foretrekke. Imidlertid er mange systemer svært komplekse, slik at valide matematiske modeller i seg selv er komplekse, og dermed utelukker muligheten for analytiske løsninger. I slike tilfeller må modellen studeres ved hjelp av simulering.

Gitt at man har en matematisk modell som skal studeres ved hjelp av simulering, må man finne verktøy for å gjøre dette (Law, 2007). Ved å klassifisere simuleringsmodeller langs tre dimensjoner kan man lettere bestemme verktøy for simuleringen. Dette illustreres i figur 2.29, og dimensjonene presenteres med bakgrunn i Law (2007).



Figur 2.29: Simuleringsmodeller langs tre dimensjoner (Babulak & Wang, 2010).

Deterministisk eller stokastisk simuleringsmodell?

Hvis en simuleringsmodell ikke inneholder noen sannsynlighetskomponenter, kan den kalles en deterministisk simuleringsmodell (Law, 2007). I en slik modell vil outputen være bestemt når mengdene og sammenhengene er spesifisert. Derimot, må mange systemer modelleres slik at de har noen tilfeldige inputkomponenter, og dette gir stokastiske simuleringsmodeller. Stokastiske simuleringsmodeller produserer output som i seg selv er tilfeldig, og outputen må derfor kun behandles som et estimat på modellens sanne egenskaper. Et viktig poeng å få

frem er at deterministiske simuleringsmodeller er spesialtilfeller av stokastiske simuleringsmodeller.

Statisk eller dynamisk simuleringsmodell?

En statisk simuleringsmodell er en representasjon av et system på en bestemt tid, eller et system der tid ikke spiller noen rolle (Law, 2007). Eksempler på slike modeller er enkelte Monte Carlo-simuleringer, slik illustrert i figur 2.29. På den andre siden representerer dynamiske simuleringsmodeller system slik de utvikler seg over tid.

Kontinuerlige eller diskrete simuleringsmodeller?

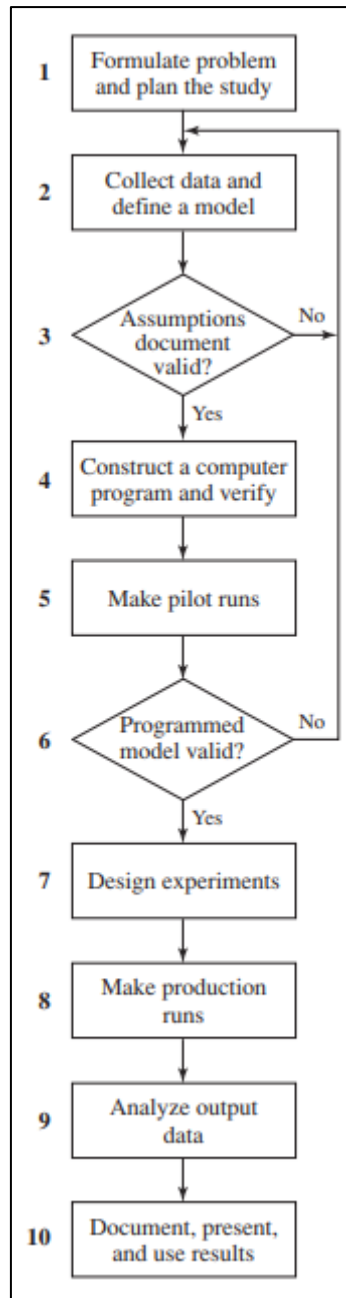
Dette kan defineres i stor grad slik som kontinuerlige og diskrete systemer ovenfor. Kontinuerlig simulering omhandler modellering over tid av et system ved en representasjon der tilstandsvariablene endres kontinuerlig med hensyn til tiden (Law, 2007). Diskret hendelsessimulering gjelder modellering av et system slik det utvikler seg over tid ved en representasjon der tilstandsvariablene endres øyeblikkelig på separate tidspunkter. Disse tidspunktene er tidspunktene der en hendelse inntreffer, og der hendelsen er definert som en øyeblikkelig hendelse som kan endre tilstanden til systemet.

Slik figur 2.29 illustrerer, vil simuleringsmodeller som er stokastiske, dynamiske og diskrete omtales som diskret hendelsessimuleringer.

Hvis modellen ikke er en «nær» tilnærming til det faktiske systemet vil sannsynligvis konklusjoner utledet fra modellen være feil, og kan resultere i at kostbare beslutninger blir tatt på feil grunnlag (Law, 2009). Validering kan og bør bli gjort for alle modeller, uavhengig av om det korresponderende systemet eksisterer eller om det skal bygges i fremtiden.

Validering defineres av Law (2009) som prosessen for å bestemme om en simuleringsmodell er en nøyaktig representasjon av systemet, tilpasset målene ved studien. En simuleringsmodell og dens resultater har kredibilitet hvis beslutningstakerne og andre nøkkelpersonell aksepterer de som «korrekte».

I figur 2.30 presenteres Law (2007) sine beskrevne steg som bør inngå i en simuleringsstudie. Law (2009) sier at det å ha en slik tilnærming for å utføre en simuleringsstudie er kritisk for studiens suksess generelt, og spesielt for å utvikle en valid modell.



Figur 2.30: Steg i en simuleringsstudie (Law, 2007).

2.6.3 Beregningsmetoder i bygg og anlegg

Det finnes to prinsipielle måter å beregne stokastiske anslag; ved bruk av analytiske metoder eller ved bruk av simuleringsmetoder (Drevland et al., 2005; Klakegg, 1994). Begge teknikker bruker i prinsippet de samme inngangsdataene i form av strukturplan, tidsanslag og fordelingsfunksjoner, det er imidlertid stor forskjell på regneoperasjonene som blir utført (Klakegg, 1994).

Analytiske metoder

Ved bruk av analytiske metoder beskrives hvert element ved et matematisk uttrykk (Drevland et al., 2005). Hvert element regnes så sammen til et nytt uttrykk som gir fordelingen av mulige utfall.

Sentralt i regneoperasjonen er modellen som representerer tidstillegget (Klakegg, 1994). Det er denne modellen som skiller de enkle analytiske teknikkene fra de vanskelige. Modellen er bygd opp som et analytisk regelsett som er karakteristisk for den aktuelle teknikken.

Eksempel på slike metoder er PERT, Suksessiv tidsplanlegging, Møllers metode og PNET (Klakegg, 1994).

Simuleringsmetoder

I simuleringsteknikker finnes det ikke et analytisk regelsett for utregning av stokastiske tidstillegg (Klakegg, 1994). Tidstillegget kommer i stedet frem som en statistikk over en mengde beregninger som alle er deterministiske gjennomregninger av nettverket. En datamaskin regner gjennom nettverket gang på gang med tilfeldig trukket inngangsdata innenfor de definerte realistiske utfallsrommene for hver enkelt aktivitet.

For hver gjennomregning trekkes en tilfeldig verdi ut fra tidssannsynlighetsfordelingen for aktiviteten og benyttes i beregningen. Etter at simuleringen er ferdig, vil den ha et statistisk grunnlag for å utarbeide en sannsynlighetsfordeling for summen. Eksempel på slike metoder er Monte Carlo-simulering (Drevland et al., 2005; Klakegg, 1994; Law, 2007), og diskret hendelsessimulering (Drevland et al., 2005; Law, 2007).

Som allerede nevnt, skilles det mellom statiske og dynamiske modeller (Drevland et al., 2005). En statisk simuleringsmodell kan for eksempel være et kostnadsoverslag, da tiden ikke spiller noen rolle. En dynamisk simuleringsmodell kan eksempelvis være fremdriftsplanen for et prosjekt, da det utfolder seg med tiden. Videre skilles det også, som nevnt, mellom kontinuerlig tidssimulering og diskret hendelsessimulering. En kontinuerlig tidssimulering kan eksempelvis være modellering av hastigheten på en bil, der tilstandsvariablene endres kontinuerlig med tiden. Et eksempel på en diskret hendelsessimulering er en fremdriftsplan der en aktivitet endrer tilstand fra påbegynt til ferdig.

Enhver simulering som kan modelleres som en diskret hendelsessimulering kan også modelleres som en kontinuerlig tidssimulering, men det er mer ressurskrevende (Drevland et al., 2005). Kontinuerlig tidssimulering har ingen plass i prosjektstyringssammenheng; der det

er nødvendig med dynamisk simulering er det tilstrekkelig å benytte diskret hendelsessimulering.

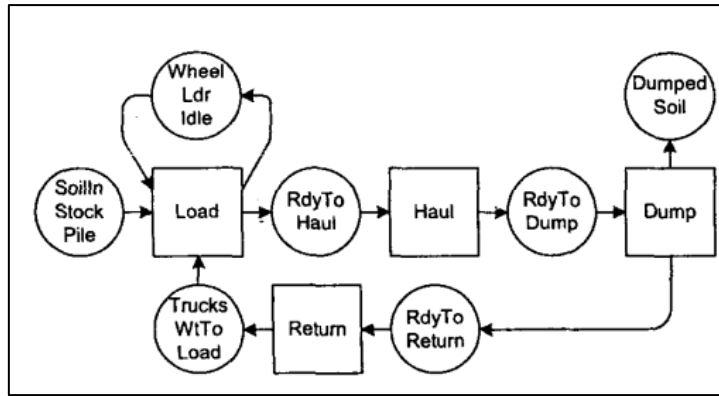
Det er nevnt at fremdriftsplaner er et eksempel på dynamiske simuleringer, dog er det fullt mulig å beregne vanlige fremdriftsplaner ved hjelp av statiske simuleringer (Drevland et al., 2005). Det er først når man ønsker å modellere et ikke-deterministisk hendelsesforløp at det er behov for dynamiske simuleringer.

EZStrobe og Stroboscope

Stroboscope er et programmeringsspråk, utviklet som del av Martinez (1996) sin doktorgradsavhandling, designet for å kunne simulere prosesser i bygge- og anleggsprosjekter (Martinez & Ioannou, 1994). Prosessene i bygge- og anleggsprosjekter er veldig komplekse og involverer mange ulike typer av ressurser. Derfor fungerer også Stroboscope generelt som et effektivt simuleringsverktøy.

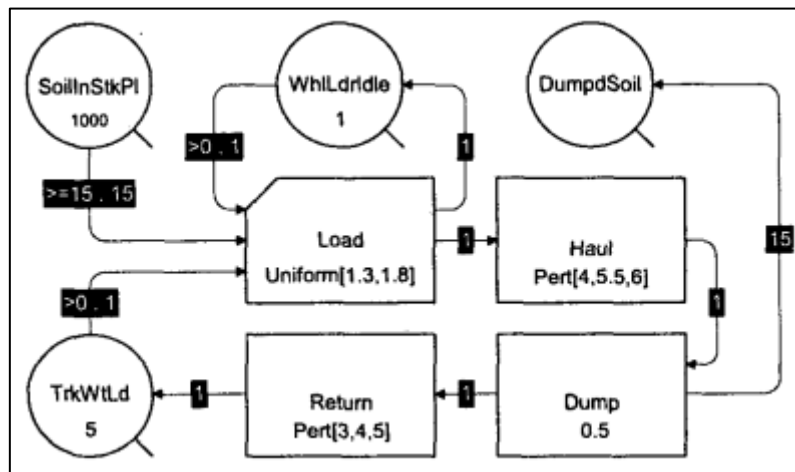
EZStrobe er et enkelt, men kraftig, simuleringsverktøy designet for å simulere byggeprosesser (Martinez, 2001). EZStrobe er et diskret hendelsessimuleringssystem som bruker nettverk basert på aktivitetssyklusnettverk (Activity Cycle Diagrams) og aktivitetsskanning (Activity Scanning), og som benytter Stroboscope som simuleringsmotor (*EZStrobe*, 2022).

Modeller basert på aktivitetsskanning er laget med bakgrunn i de ulike aktivitetene en operasjon kan inneholde (Martinez, 2001). Aktivitetsskanningen fokuserer på å (1) identifisere aktivitetene; (2) under hvilke forhold aktivitetene kan skje; og (3) utfallet av aktiviteten. Dette representeres gjerne gjennom aktivitetssyklusnettverk, som er et nettverk av sirkler og firkanter som representerer ledige ressurser, aktiviteter og deres forrang. Et eksempel på et standard aktivitetssyklusnettverk illustreres i figur 2.31, og representerer en prosess med masseflytting.



Figur 2.31: Eksempel på et standard aktivitetssyklusnettverk (Martinez, 2001).

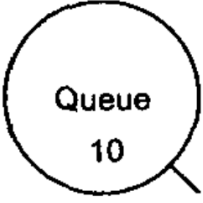

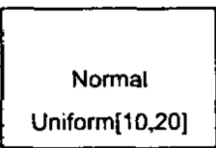

I EZStrobe illustreres aktivitetssyklusnettverket på samme måte, men er utvidet til å inneholde bemerkninger om aktiviteten eller ressursen (Martinez, 2001). I tillegg er det mer kompakt, da enkelte sirkler er overflødige. Et eksempel på den samme masseflyttingsprosessen illustrert ved hjelp av EZStrobe kan ses i figur 2.32.




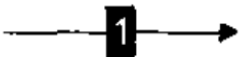

Figur 2.32: Eksempel på aktivitetssyklusnettverk fra EZStrobe (Martinez, 2001).

De grunnleggende modelleringselementene som kan benyttes i EZStrobe, forrangsreglene som styrer de og forklaringen av de presenteres i tabell 2.6, der figurer og tekst er hentet fra Martinez (2001).

Tabell 2.6: De grunnleggende modelleringselementene i EZStrobe (Martinez, 2001).

Navn	Figur	Forklaring
Queue		<p>Queue er et navngitt element som inneholder tilgjengelige ressurser. Navnet vises der det i eksempelfiguren står «Queue». Ved begynnelsen av simuleringen inneholder Queue et bestemt antall ressurser, og vises der det i eksempelfiguren står «10». Ressurser tilføres Queue når de frigjøres fra avsluttede foregående aktiviteter. Ressurser fjernes fra Queue når etterfølgende Combi-aktiviteter starter opp. En Queue kan etterfølge alle elementer bortsett fra Queue. Queue kan være foregående en Combi.</p>
Combi		<p>Er et navngitt element som representerer oppgaver som kan starte når ressursene i de foregående Queue-ene er tilstrekkelige mange til å gjennomføre oppgaven. Navnet vises der det i eksempelfiguren står «Combi». Formelen nederst i figuren brukes for å bestemme varigheten på aktiviteten. Varigheten bestemmes ofte fra en sannsynlighetsfordeling. Det betyr at ulike forekomster av den samme aktiviteten kan ha ulik varighet. Combi kan kun etterfølge Queue, og kan være foregående for alle elementer bortsett fra en Combi.</p>
Normal		<p>Normal er et navngitt element som representerer oppgaver som kan starte når en foregående aktivitet er avsluttet. Navnet vises der det i eksempelfiguren står «Normal». Formelen nederst i figuren brukes for å bestemme varigheten på aktiviteten, på samme måte som for Combi. Normal kan etterfølge alle elementer, bortsett fra en Queue. Normal kan også være foregående for alle elementer bortsett fra en Combi.</p>
Fork		<p>Fork er et element som representerer et vegvalg som er sannsynlighetsbestemt. Fork er typisk etterfølgende en aktivitet, men kan også være etterfølgende en annen Fork. Når en foregående aktivitet avsluttes, velger Fork-en en av sine etterfølgere. Den relative sannsynligheten for at en spesifikk etterfølger blir valgt avhenger av «P»-verdien i Branch Link.</p>

Tabell 2.6 – Fortsettelse fra forrige side.

Navn	Figur	Forklaring
Draw Link		Draw Link kobler sammen en Queue til en Combi. Den viser to deler med informasjon, delt av et komma. Delen før komma er betingelsen for at den etterfølgende Combi-en skal starte, som en funksjon av den foregående Queue-ens ressurser. EZStrobe inneholder de seks operatorene <, <=, >, >=, == og != som kan benyttes i denne sammenheng. Den andre delen er mengden ressurser som skal forsøkes fjernet fra Queue, gitt at første betingelse er oppfylt. Hvis mengden som forsøkes fjernet er større enn innholdet i Queue, fjernes hele innholdet.
Release Link		Release Link kobler en aktivitet til alle andre elementer bortsett fra en Combi. Teksten indikerer mengden ressurser som vil frigjøres hver gang en foregående aktivitet avsluttes.
Branch Link		Branch Link kobler sammen en Fork med alle andre elementer bortsett fra en Combi. Teksten indikerer verdien av «P»-verdien, som sammen med de andre etterfølgende aktivitetene og «P»-verdiene bestemmer den relative sannsynligheten for at denne vegen velges.

2.6.4 Statistikk

I dette kapittelet vil det presenteres nyttig teori knyttet til statistikk. Diskrete sannsynlighetsfordelinger har liten plass i usikkerhetsanalyser for prosjekter (Drevland et al., 2005), og vil ikke gå nærmere inn på.

Hovedregelen for valg av fordelingsfunksjon er at den må være mulig å angi ved hjelp av et tripplestimat (Drevland, 2013). Selv om de fleste fordelinger vil være entydig definert ved hjelp av et tripplestimat, så er det ikke sikkert simuleringsverktøyet har innebygde algoritmer for å regne om til de egentlige parameterne for fordelingen. For eksempel så kan gammafordelingen normalt sett ikke angis ved hjelp av tripplestimat. I det følgende vil utvalgte relevante sannsynlighetsfordelinger og statistiske teorem presenteres. Selv om ikke alle sannsynlighetsfordelingene vil anvendes eksplisitt i masteroppgaven, har de lagt

grunnlaget for simuleringsmodellene. Alle sannsynlighetsfordelingene som presenteres er innebygget i EZStrobe, og følgelig er det greit med en teoretisk bakgrunn for å kunne anvende dem.

Trekantfordelingen

I noen tilfeller har man forhold som er underlagt tilfeldighetenes lov, men har klart definerte grenser både nedover og oppover (Drevland et al., 2005). En stokastisk modell som dekker disse forholdene kan beskrives med trekantfordelingen.

Trekantfordelingen bestemmes av de tre parameterne a , b og c , som presenteres nedenfor. Parameterne er definert som følger:

- a – kontinuerlig nedre grenseparameter $a < c$.
- b – kontinuerlig parameter for mest sannsynlig verdi $a \leq b \leq c$.
- c – kontinuerlig øvre grenseparameter.

Dette gjør at trekantfordelingen enkelt kan benyttes ved tripplestimat.

En viktig egenskap med trekantfordelingen er at den har mulighet til å være asymmetrisk og symmetrisk. Hvis forskjellen mellom a og b er større enn forskjellen mellom b og c , vil mest sannsynlige verdi ligge til høyre for forventningsverdien og man har en venstreskjev fordeling. Hvis forskjellen mellom a og b er lik forskjellen mellom b og c vil mest sannsynlig verdi og forventningsverdien sammenfalle, og man har en symmetrisk fordeling. Hvis forskjellen mellom a og b er mindre enn forskjellen mellom b og c vil mest sannsynlige verdi ligge til venstre for forventningsverdien, og man har en høyreskjev fordeling.

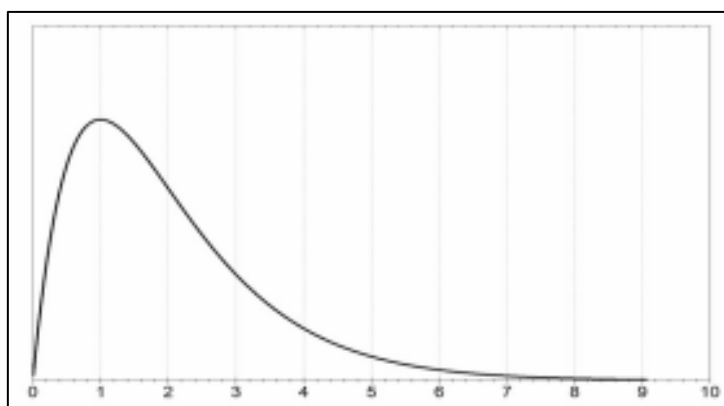
Normalfordelingen

Normalfordelingen forekommer i mange situasjoner (Drevland et al., 2005). Hvis man observerer størrelser som i utgangspunktet skulle være like, eksempelvis tidsforbruket på et bestemt arbeidsstykke, vil man se at tidsforbruket varierer rundt en eller annen middelvei med tilnærmet like mange observasjoner under middelveien som over. De fleste observasjoner ligger i nærheten av middelveien, men noen få avviker relativt sterkt fra denne. Fordelingen er symmetrisk om middelveien, som dermed også blir mest sannsynlig verdi og 50 %-kvantilen.

Gammafordelingen

Gammafordelingen er en høyreskjev fordeling gitt av to parametere: *Alfa* og *Beta* (Drevland et al., 2005). *Alfa* avgjør kurvens form, det vil si hvor høyreskjev den er, mens *Beta* er en skalarparameter som avgjør tallenes størrelse. Et viktig faktum om gammafordeling er at den per definisjon er høyreskjev, det vil si at fordelings mest sannsynlige verdi ligger til venstre for fordelings forventningsverdi. Lave verdier av *Alfa* vil gi en mer høyreskjev fordeling, mens høye verdier av *Alfa* vil gi en mindre høyreskjev fordeling, altså går fordelingen mot en normalfordeling. Går *Alfa* mot uendelig vil man ha en kurve som normalfordelingen, men den vil alltid være litt høyreskjev selv om det er snakk om svært små verdier. Dette kan ha konsekvenser i simuleringer og i enkelte analytiske metoder.

At fordelingen er høyreskjev er en egenskap som er viktig i praksis (Klakegg, 1994). Det vil alltid finnes en nedre grense for hvor raskt man kan gjennomføre en aktivitet, gjerne bestemt av tekniske forhold. I motsatt fall, kan man tenke seg at det ikke finnes en øvre grense for hvor lang tid en aktivitet kan ta og at det kan ta uendelig lang tid hvis alt går galt. Figur 2.33 illustrerer en gammafordeling.



Figur 2.33: Eksempel på gammafordeling (Drevland et al., 2005).

Erlangfordelingen

En sannsynlighetsfordeling som nevnes ofte, blant annet i *Tidplanlegging under usikkerheit* (Klakegg, 1994), er Erlangfordelingen. Erlangfordelingen er bare et spesialtilfelle av gammafordelingen, der *Alfa* er et heltall og kalles *k* i stedet (Drevland et al., 2005). Fordelen med Erlangfordelingen er at den er noe enklere matematisk.

Pert-fordelingen

Program Evaluation and Review Technique (PERT) er en teknikk for tidsplanlegging av prosjekter der aktivitetenes varighet er en usikker størrelse som følger en sannsynlighetsfordeling (Rolstadås, 2021b). PERT ble utviklet av Malcolm et al. (1959) for den amerikanske marinen (Rolstadås, 2021b). PERT tar utgangspunkt i at aktivitetenes varighet følger en betafordeling, og at man kan tilnærme seg denne fordelingen ved hjelp av tre estimater som gir forventningsverdi og standardavvik, og dermed sannsynlighetsfordelingen (Malcolm et al., 1959; Rolstadås, 2021b). Dette vil omtales som Pert-fordelingen i det følgende, og de tre estimatene er:

- a – den kortest tenkelige varighet (optimistisk).
- m – den mest sannsynlige varighet (realistisk).
- b – den lengste tenkelige varighet (pessimistisk).

Perry og Greig (1975) kritiserer den originale Pert-fordelingen for å være unøyaktig, og at dette kan skyldes at endepunktene brukes sammen med mest sannsynlige verdi. Det er vanskelig å estimere endepunktene, da det ikke er sikkert at de som skal estimere har opplevd endepunktene, eller at de kan vite at de har opplevd et endepunkt. De kan også slite med å skille force majeure-hendelser fra mer «normale» stokastiske variasjoner.

Av den grunn foreslås det å benytte 5 og 95 persentilene, i stedet for endepunktene, sammen med mest sannsynlig verdi for å bestemme forventningsverdi og standardavvik, og dermed sannsynlighetsfordelingen (Perry & Greig, 1975). For ordens skyld vil denne fordelingen omtales som Pertpg-fordelingen fra forfatterens navn i det følgende, og de tre estimatene blir:

- P_5 – estimat på 5 persentilen til varigheten (optimistisk).
- m – den mest sannsynlige varighet (realistisk).
- P_{95} – estimat på 95 persentilen til varigheten (pessimistisk).

Selv om PERT med utgangspunkt i betafordelingen har blitt mye brukt i viktige prosjekter, har det også møtt kritikk (Pérez et al., 2016). Det å bestemme betafordelingen sine fire parametere ut ifra tre estimater lar seg ikke gjøre, og det vil kun bli en tilnærming.

Sentralgrenseteoremet

En viktig forutsetning for både analytiske metoder og simuleringsmetoder er sentralgrenseteoremet. Sentralgrenseteoremet uttrykkes gjerne på en av to måter (Drevland et al., 2005):

1. Summen av et stort antall stokastiske verdier med tilfeldige fordelinger tenderer mot å være normalfordelt. Begrensningen er at verdiene er uavhengige variabler, og at ingen av verdiene er svært dominerende i forhold til de andre.
2. Gjennomsnittet av et stort antall verdier med samme vilkårlige sannsynlighetsfordeling tenderer mot å være normalfordelt.

Et «stort antall» er gjerne satt til mer enn 30 verdier, men gjelder også med bra tilnærming for ti verdier (Drevland et al., 2005). Tilnærmingen blir bedre og bedre med økende antall elementer, men vil aldri oppnå en eksakt normalfordeling.

3. Metode

Dette hovedkapittelet beskriver metodene som er benyttet for å kunne besvare masteroppgavens forskningsspørsmål. For hver forskningsmetode presenteres metoden, eventuelt gjenbruk fra prosjektoppgaven og en evaluering av metoden.

3.1 Litteraturstudie

En litteraturstudie er en omfattende studie og behandling av litteratur som relateres til et spesifikt emne (Aveyard, 2019). I denne masteroppgaven har det blitt søkt etter litteratur på hovedtemaene vekseldrift i tunnel, byggetid under usikkerhet og diskret hendelsessimulering. Formålet med litteraturstudien er å legge det teoretiske grunnlaget for masteroppgaven, og mye av litteraturen ble funnet i arbeidet med prosjektoppgaven høsten 2021. I tillegg er det utført supplerende søk i arbeidet med denne masteroppgaven.

3.1.1 Metoden

Søkene er utført systematisk i de akademiske databasene Scopus, Oria, Web of Science, ASCE, Science Direct og Google Scholar, samt kritiske søk i Google sin vanlige søkemotor. Mesteparten av litteraturen er dog funnet ved hjelp av direkte søk på kjente forfattere og organisasjoner.

I forbindelse med tunneldriften er særlig litteraturen som foreligger på nettsidene til Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF) blitt benyttet, samt *PROSJEKTRAPPORT 2F-99 TUNNELDRIFT Enhetstidssystem for driving, sikring og innredning* utgitt av institutt for anleggsdrift ved NTNU (1999), og kompendiene i *Anleggsteknikk Grunnkurs* ved NTNU. I tillegg er det identifisert informasjon fra ulike fagrapporter relatert til faktiske prosjekter med tunneldrift. Dette har vært nødvendig da litteraturen som eksisterer på tunneldrift, og særlig vekseldrift, er begrenset.

Teorien om tidsplanlegging under usikkerhet og relevante statistiske metoder er hovedsakelig funnet i rapporter fra *Forskningsprogrammet Concept*. Teori knyttet til modellering og simulering er hovedsakelig basert på boken *Simulation modelling & Analysis* av Averill Law (2007), og andre publikasjoner av samme forfatter. I tillegg er ulike publikasjoner om EZStrobe og Stroboscope lagt til grunn.

Identifisert litteratur ble evaluert fortløpende og systematisk med TONE-prinsippet for kildekritikk. TONE er et akronym som står for Troverdighet, Objektivitet, Nøyaktighet og Egnethet (NTNUbibliotek, 2017). Hva som inngår i de fire kategoriene i TONE-prinsippet fremgår av tabell 3.1.

Tabell 3.1: TONE-prinsippet.

Kategori	Fokusområde
Troverdighet	Hvem forfatteren er, og hvorvidt vedkommende er troverdig.
Objektivitet	Hvordan dataene er presentert, og hvorvidt dataene er lagt frem på en objektiv måte.
Nøyaktighet	Hvordan forskningsmetodikken er, og om denne er godt forklart. Grad av oppdaterte data og mulighet for bekreftelse av informasjonen.
Egnethet	Hvorvidt kilden er formålstjenlig i relasjon til tematikken i masteroppgaven.

For vurdering av litteraturen, ble det utarbeidet et karaktersystem. Hver kilde fikk en karakter innenfor hver enkelt kategori. Karaktersystemet bestod av tre grader, fra mindre god til meget god, og er

1. mindre god
2. god
3. meget god

Hver kategori fikk da tilegnet et tall. Etter karaktersetting ble det foretatt en totalvurdering av kilden med hver enkelt karakter i mente, der det munnet ut i hvorvidt kilden var av høy nok kvalitet til å kunne brukes i masteroppgaven.

3.1.2 Gjenbruk av litteraturstudien fra prosjektoppgaven

Utvalgte deler av prosjektoppgaven til forfatterne, skrevet høsten 2021, er gjenbrukt i teorikapittelet, som hovedsakelig er innhentet ved hjelp av en litteraturstudie. Alle kapitler har gjennomgått redaksjonelle endringer.

Følgende kapitler er i sin helhet hentet fra prosjektoppgaven: 2.2 *Vekseldrift i tunnel*, 2.4 *Salvesyklus* og 2.5 *Nedbrytning og planlegging av prosjekter og aktiviteter*.

Kapittel 2.3 *Vekseldriftsfaktor og enhetstider for tunneldrift* er delvis basert på prosjektoppgaven, men er betydelig utvidet og bearbeidet. Første halvdel av kapittel 2.3.1

Generelt om teoretisk grunnlag for beregning av vekseldriftfaktor er hentet fra prosjektoppgaven, mens den andre halvdel av dette kapittelet, omhandlende *tidsbestemmende faktor*, er lagt til. Kapitlene 2.3.2 *Tilrettelegging for tunneldrift* og 2.3.3 *Enhetstider for tunneldriving og justeringsfaktor for vekseldrift* er i sin helhet hentet fra prosjektoppgaven. Kapittel 2.3.5 *Enhetstider for sikring* er helt nytt, bortsett fra introduksjonen som er hentet fra prosjektoppgaven.

Kapittel 2.6 *Tidsplanlegging under usikkerhet* er betydelig utvidet. 2.6.1 *Håndtering av usikkerhet* er i sin helhet hentet fra prosjektoppgaven. 2.6.3 *Beregningsmetoder i bygg og anlegg* er basert på prosjektoppgaven, men betydelig utvidet. Underkapittelet *Simuleringsmetoder* er betydelig utvidet, der de tre siste avsnittene, av fem, er helt nye. Underkapittelet *EZStrobe og Stroboscope* er helt nytt. 2.6.4 *Statistikk* er basert på prosjektoppgaven, men underkapittelet *PERT-fordelingen* er helt nytt, og *Sentralgrenseteoremet* er fullstendig endret.

3.1.3 Evaluering av metoden

Litteraturstudie er, etter forfatterens skjønn, en god metode for å systematisk og strukturert søke etter eksisterende informasjon innenfor et tema, samt vurdering og kritikk av identifisert litteratur. En svakhet med litteraturstudie som metode er at søkene kan bli i overkant snevre som følge av søkeordene som benyttes, filtreringsmulighetene i databasene eller hvilket språk det søkes på. Det kan eksistere relevant litteratur innenfor tematikken som ikke fanges opp av søkeordene eller av databasene som brukes i søket. Litteraturen tilknyttet konvensjonell tunneldrift, og særlig vekseldrift i tunnel, ble på et tidlig stadium funnet å være mangelfull. Derfor er hovedvekten av denne litteraturen funnet ved hjelp av direkte søk på forfattere og organisasjoner, samt litteratur som er anbefalt og anskaffet av veileder.

En annen svakhet ved denne metoden kan være «confirmation bias», der litteratursøkeren har en formening om hva som skal finnes av litteratur og om tolkningen av litteraturen som finnes (Casad, 2016). I den forbindelse kan relevant litteratur utelukkes, da den ikke stemmer overens med litteratursøkeren sine ønsker i søket.

3.2 Intervju

Intervju er en samtale der en part innhenter informasjon fra en annen part (Orgeret, 2019), og vil i ustrukturert eller semistrukturert form være en kvalitativ forskningsmetode (Malt &

Grønmo, 2020). Hensikten med kvalitative metoder er å samle inn og analysere kvalitative data, som vanligvis foreligger i tekstform (Grønmo, 2020). I denne masteroppgaven er det utført forskningsintervju i semistrukturert form med flere ulike bransjerepresentanter fra ulike selskaper som har prosjektporteføljer der konvensjonell tunneldriving inngår. Formålet var å utvide vekseldriftbegrepet i tunnelsammenheng, samt innhente betraktninger omkring flere aspekter ved konvensjonell tunneldriving. I tillegg til å utvide forståelsen for tematikken og vekseldriftbegrepet, skulle denne informasjonen også fylle informasjonshullene fra litteraturstudien. Den siste og viktigste funksjonen til intervjuene, sammen med teorigrunnet, var å etablere det anleggstekniske rammeverket for simuleringsmodellen.

3.2.1 Metoden

Det ble først utarbeidet en intervjuguide som inneholdt klargjøringer i forbindelse med rettigheter og personvern for intervjuobjektet, samt spørsmålene. Spørsmålene var hovedsakelig de samme til alle intervjuobjektene, men noen justeringer ble gjort for den enkelte. I flere tilfeller svarte intervjuobjektene veldig utfyllende på enkelte spørsmål, slik at andre spørsmål i samme resonnement ble besvart. Dermed er ikke spørsmålene som allerede ble besvart oppført i transkripsjonen, men fremkommer under de spørsmålene der svaret faktisk kom. Naturlige oppfølgingsspørsmål ble stilt fortløpende. Spørsmålene i intervjuguiden ble også revidert og optimalisert underveis i arbeidet med intervjuene. Intervjuene foregikk parallelt med arbeidet med modellen. Uklarheter i sammenhenger i simuleringsmodellene ble dermed tatt opp i intervjuene for oppklaring.

Før forespørsler om intervju ble utsendt til intervjuobjektene per mail, leste oppgaveforfatterne seg opp på intervjuobjektene dersom det var mulig, slik at tilpasningene i spørsmål kunne gjøres. Blant annet ble noen prosjektspesifikke spørsmål stilt i oppfølgingen av hovedspørsmålene som skulle passe til de aktuelle prosjektene vedkommende har arbeidet med. Deretter ble relevante svar bakt inn i hovedspørsmålene i transkriberingen. Ellers omhandlet spørsmålene ulike aspekter ved vekseldrift i tunnel og salvesyklusen. I tillegg fikk noen av intervjuobjektene spørsmål om kontrakt, dersom intervjuobjektet i kraft av stillingen eller tidligere engasjementer skulle ha forutsetninger til å ha kunnskap om dette. Ett av intervjuobjektene fremskaffet også informasjon om tidsbruk på aktiviteter i salvesyklusen. Se vedlegg A for intervjuguiden.

Intervjuobjektene ble innledningsvis stilt generelle spørsmål om deres bakgrunn for å få en fin og litt personlig inngang til intervjuet. Av personvern hensyn er ikke disse svarene transkribert.

Intervjuene ble hovedsakelig utført per videosamtale, ved hjelp av dataprogrammet Microsoft Teams, med unntak av ett fysisk intervju. Innspillingsfunksjonen i Microsoft Teams og på iPhone, muliggjorde opptak av intervjuene, slik at intervjuene enklere kunne transkriberes i etterkant. Se vedlegg B for transkriberte intervju.

3.2.2 Gjenbruk av intervjuene fra prosjektoppgaven

Utvalgte resultat fra ett intervju gjort i prosjektoppgaven, gjenbrukes i resultatene i masteroppgaven og fremkommer i spørsmålet: «*Er dette en fornuftig inndeling ved tidsstudier?*» i resultatkapittelet. Her anslås varigheter til aktivitetene i salvesyklusen. Dette ble ikke inkludert i prosjektoppgaven, men intervjuet ble utført i forbindelse med arbeidet med prosjektoppgaven. Vedkommende intervjuobjekt henvises til som Intervjuobjekt 5 i resultatkapittelet. Totalt er altså ett av fem intervjuer gjennomført i forbindelse med prosjektoppgaven.

3.2.3 Evaluering av metoden

Metoden var i høyeste grad formålstjenlig, da intervjuene resulterte i gode betraktninger som tjener til masteroppgavens hensikt og tematikk. Svarene var viktige bidrag til å utvide vekseldriftbegrepet og forståelsen for vekseldrift, samt kontraktuelle elementer som ligger til grunn for behovet for en bransjeomforent tunnelbyggetidsmodell. Spørsmålene vedrørende salvesyklusen var essensielle for utarbeidelsen av rammeverket for simuleringsmodellene.

Svakheter ved metoden kan ligge i spørsmålene, oppgaveforfatterne som intervjuere, antall intervjuobjekter og hvem disse intervjuobjektene er. Oppgaveforfatterne har begrenset kjennskap til vekseldrift, og følgelig kan det være vanskelig å utarbeide gode spørsmål som medfører best mulige svar fra intervjuobjektene, samt følge opp de svarene som gis underveis i intervjuene på en god måte. Hvor godt vekseldriftbegrepet og forståelsen for vekseldrift blir utvidet, samt presisjonen til svarene på tidsbruk i salvesyklusen, kan påvirkes av hvor mange personer som er blitt intervjuet, og hvilke erfaringer eller faglig grunnlag disse har. Muligens kunne det vært intervjuet flere personer, og i større grad vært sørget for spredning, i blant

annet stilling og prosjekter, for å skape et større nedslagsfelt som hadde bidratt til bredere svar totalt sett.

En annen svakhet kan ligge i oppfattelsen og forståelsen for hva som blir sagt av intervjuobjektene. Det kan være fare for at intervjueren misoppfatter hva som menes, slik at enten utsagnet taper mening, eller at intervjuobjektet tillegges en mening vedkommende egentlig ikke har.

3.3 Simuleringsstudie

Selve simuleringsmodellen, og programmeringen av denne, er bare en liten del av den samlede innsatsen som kreves for å analysere komplekse systemer gjennom simulering (Law, 2007). I dette kapitlet vil alle del-metodene som har blitt utført for å gjennomføre simuleringsstudien presenteres. Hvert underkapittel i det følgende vil samsvare kronologisk med stegene i Law (2007) sin figur, se figur 2.30, som beskriver stegene i en simuleringsstudie, med unntak av steg åtte, ni og ti. Disse tre stegene har blitt gjennomført som en del av produksjonen av resultat, og vil naturligvis presenteres under kapittel 4. *Resultat*. Som figuren illustrerer er dette en iterativ prosess, slik at enkelte steg har blitt gjentatt flere ganger.

3.3.1 Definere problemet

Utgangspunktet for hele masteroppgaven var et ønske om å kunne bestemme vekseldriftfaktoren under usikkerhet, og hvordan vekseldriftfaktoren påvirkes av endrede betingelser. For å kunne bestemme vekseldriftfaktoren må man kunne bestemme tunnelbyggetiden for et tunnelprosjekt der det ikke benyttes vekseldrift, og en tilsvarende tunnel der det benyttes vekseldrift. Deretter kan vekseldriftfaktoren bestemmes som forholdet mellom disse byggetidene.

Det vil si at det er behov for to simuleringsmodeller: (1) En simuleringsmodell som simulerer regulær enstuffsdrift under usikkerhet; og (2) en simuleringsmodell som simulerer vekseldrift på to parallelle stuffer under usikkerhet.

Videre er det behov for et rammeverk som viser hvordan vekseldriftsfaktoren kan bestemmes ut ifra disse to simuleringsmodellene.

3.3.2 Definere en konseptuell modell

For å bestemme en konseptuell modell har det først vært behov for å innhente informasjon for å forstå hvordan systemet henger sammen. Denne informasjonsinnhentingene har hovedsakelig blitt gjort gjennom litteraturstudiet, der spesielt kapittel 2.2 *Vekseldrift i tunnel*, 2.3 *Vekseldriftfaktor og enhetstider for tunneldrift* og 2.4 *Salvesyklus* presenterer relevant teori for å forstå hvordan systemet henger sammen. Men også kapittel 2.5 *Nedbrytning og planlegging av prosjekter og aktiviteter* har blitt lagt til grunn for hvordan prosessene i systemet har blitt brutt ned i arbeidspakker.

I det følgende vil tre konseptuelle modeller presenteres, henholdsvis en konseptuell modell for regulær enstuffsdrift, en konseptuell modell for vekseldrift på to parallelle stuffer og et konseptuelt rammeverk for bestemmelse av vekseldriftfaktoren.

Konseptuell modell – Enstuffsdrift

Utarbeidelsen av den konseptuelle modellen startet med å bestemme alle de kritiske aktivitetene i en salvesyklus som i stor grad er felles for alle tunnelprosjekter. I første omgang ble dette satt til boring, lading, sprengning, ventilering, utlasting, rensk og sikring.

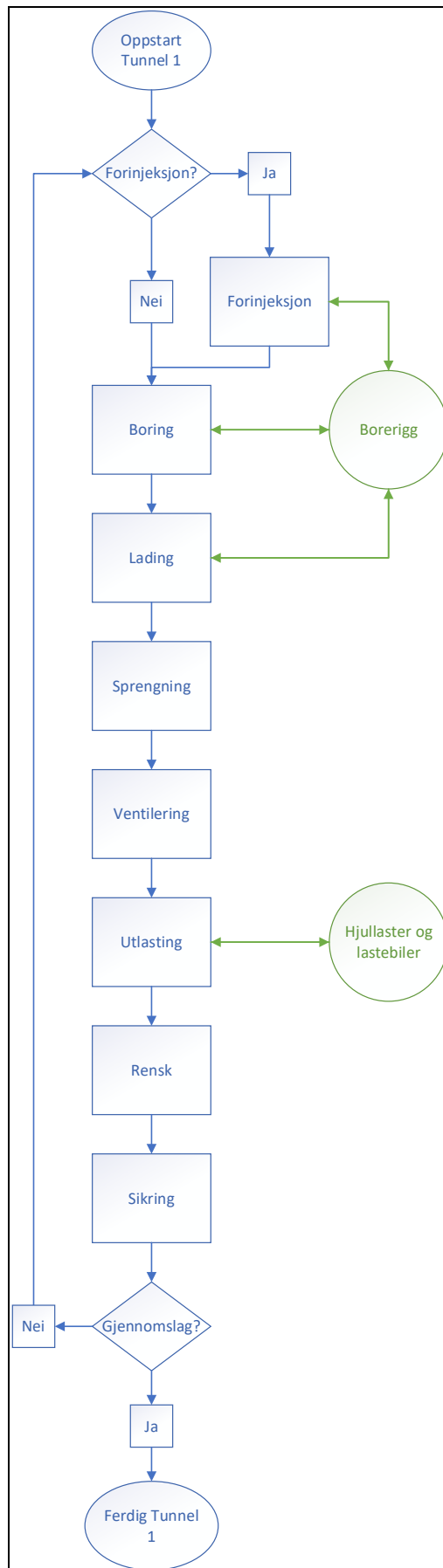
Etter blant annet intervjuene, som ble brukt som del av valideringen av den konseptuelle modellen, kom det frem at forinjeksjon ville være en veldig viktig aktivitet når det kom til bestemmelse av vekseldriftfaktoren. Gjennom intervjuene og litteraturstudien ble det også slått fast at forinjeksjon ikke er en aktivitet som forekommer på hver salve. Følgelig måtte den konseptuelle modellen utvides med en ny aktivitet for forinjeksjon og et nytt beslutningspunkt for å bestemme om forinjeksjon skulle utføres på den pågående salven.

Etter at aktivitetene og deres avhengighet var bestemt, var det behov for å bestemme hvilke ressurser det var behov for i modellen. For å bestemme dette, var det først behov for å forstå hvordan vekseldrift forløper. Grunnen til dette er at det forutsettes at det øvrige driftsopplegget er hensiktsmessig planlagt, og at ressurser som ikke deles mellom stufferne heller ikke vil påvirke vekseldriften, og dermed ikke trengs i simuleringsmodellen. Fra litteraturen ble vekseldrift definert så generelt som å drive vekselvis på to stuffer med én utstyrspakke. Denne generelle definisjonen ble på mange måter bekreftet fra intervjuene. Her ble vekseldrift beskrevet på utallige måter og i utallige kombinasjoner, der fellesnevneren var at ressursene vekslet mellom hvilken stoff de ble benyttet på. Å bygge en simuleringsmodell med utallige varianter og kombinasjoner av vekseldrift hadde vært krevende, og

sannsynligvis heller ikke nødvendig for å besvare problemstillingen. Av den grunn ble det besluttet å gå for den varianten som opplevdes mest «standard», som innebar én felles borerigg og et felles lastesystem.

Avslutningsvis var det behov for en stopp-betingelse. Denne ble satt til å være ved gjennomslag, siden selve drivingen avsluttes på dette tidspunktet. Hvis det ikke er gjennomslag gjentas syklusen.

Med bakgrunn i det overnevnte ble den konseptuelle modellen for regulær enstuffsdrift slik den presenteres i figur 3.1, og dette illustrerer hvordan systemet ved regulær enstuffsdrift henger sammen.



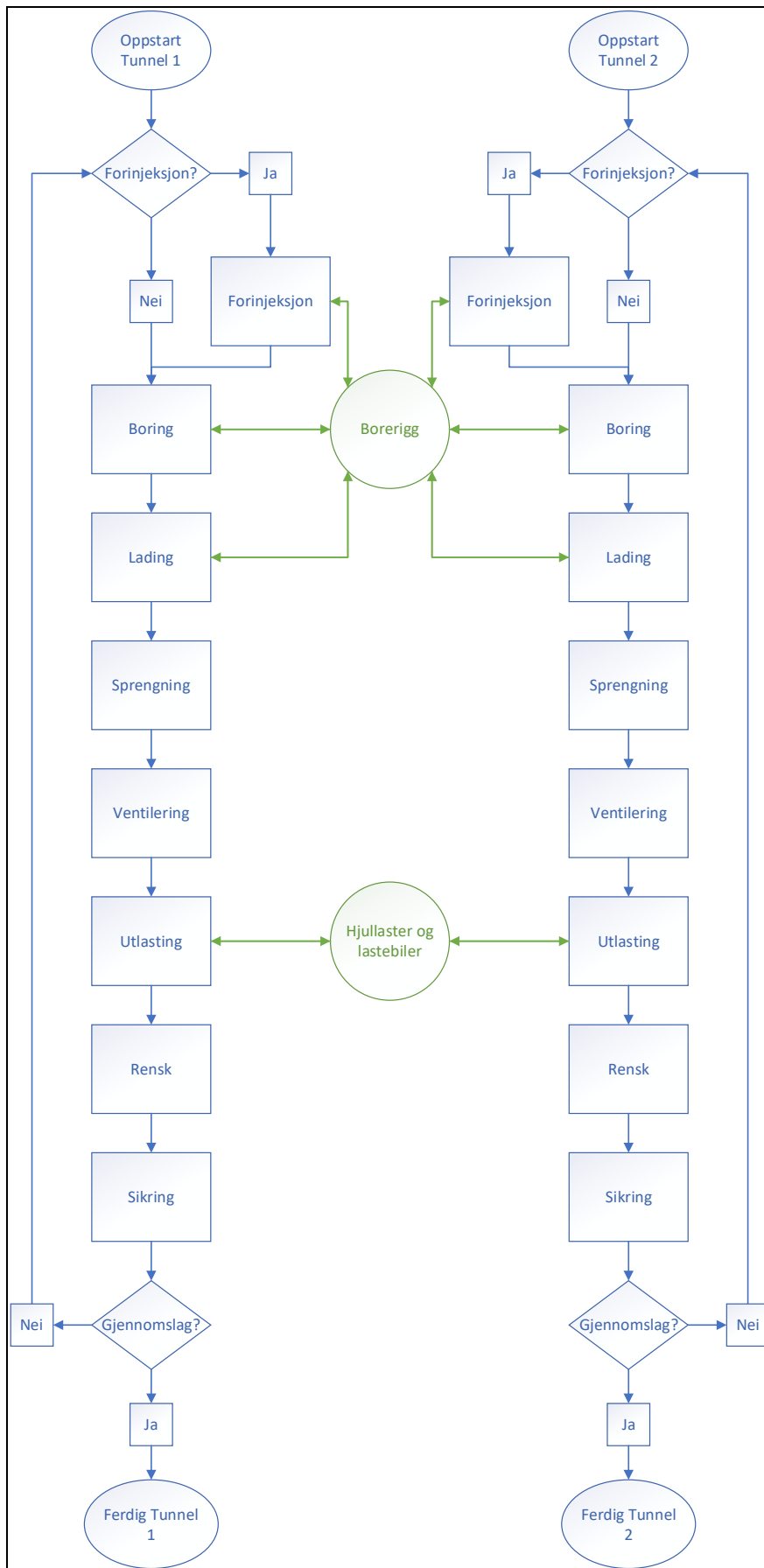
Figur 3.1: Konseptuell modell – Enstuffsdrift.

I figuren illustrerer de blå ellipsene start og slutt, blå diamanter illustrerer beslutningspunkt og blå rektangler illustrerer aktiviteter. De blå strekene illustrerer flyten i systemet, og viser hvordan de ulike elementene henger sammen, og er avhengig av hverandre. De grønne sirklene representerer ressurser, og de grønne linjene illustrerer aktiviteter som krever den respektive ressursen for å kunne gjennomføres.

Dette må på ingen måte forstås som en fullverdig beskrivelse av en tunnelbyggeprosess med alle aktiviteter og ressurser, og deres sammenheng og avhengigheter. Den konseptuelle modellen er en illustrasjon av det forfatterne, med utgangspunkt i WBS og nettverksplanlegging, anser som de viktigste elementene og deres avhengigheter, med det utgangspunkt at det skal bestemmes en vekseldriftfaktor.

Konseptuell modell – Vekseldrift

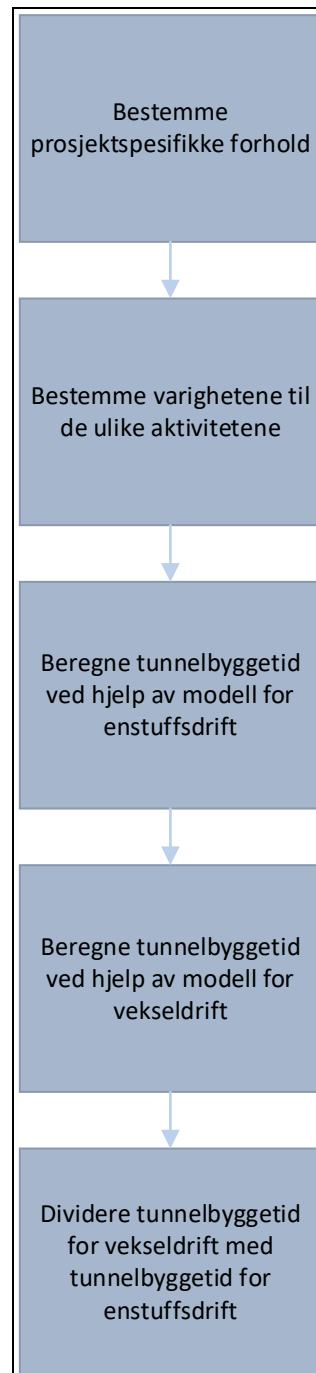
Den konseptuelle modellen for vekseldrift er bygget opp helt likt som modellen for enstuffsdrift. Forskjellen er at det foregår to sykluser parallelt, og at disse deler på ressursene for boreriggen og lastesystemet. Følgelig ble den konseptuelle modellen for vekseldrift slik som illustrert i figur 3.2.



Figur 3.2: Konseptuell modell – Vekseldrift.

Konseptuelt rammeverk – Vekseldriftfaktor

Siden det ble behov for to ulike simuleringsmodeller, oppstod det også et behov for å etablere et rammeverk for bestemmelse av vekseldriftfaktoren med bakgrunn i de to modellene. Dette rammeverket beskriver prosessen fra et eventuelt prosjekt til beregning av vekseldriftfaktoren. Rammeverket presenteres i figur 3.3.



Figur 3.3: Konseptuelt rammeverk – Vekseldriftfaktor.

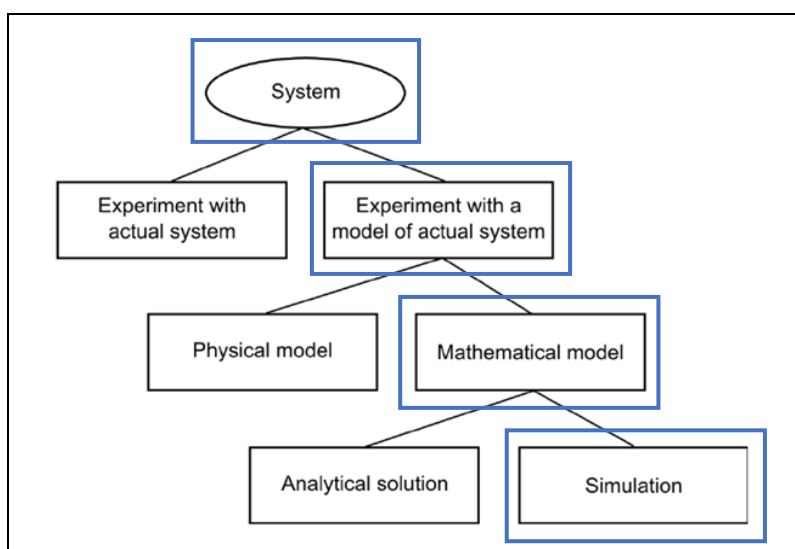
3.3.3 Validering av konseptuell modell

Som allerede nevnt i det foregående kapittelet, ble intervju brukt som en viktig del av det å validere de konseptuelle modellene. Blant intervjuobjektene var det konsensus om at den oppsatte salvesyklusen i den konseptuelle modellen er representativ og hensiktsmessig i tidsstudier relatert til konvensjonell tunneldriving.

Det konseptuelle rammeverket for bestemmelse av vekseldriftfaktoren ga seg selv, med utgangspunkt i definisjonen på vekseldriftfaktor, og hvilken input som var nødvendig for å bestemme vekseldriftfaktoren. Denne fremgangsmåten ble gjennom flere samtaler med veileder Amund Bruland bekreftet.

3.3.4 Bygge en simuleringsmodell

Med utgangspunkt i Law (2007) sitt flytskjema for ulike måter å studere et system på, vil valgene som førte frem til en simulering presenteres i det følgende. Vegvalgene illustreres med blå bokser i figur 3.4.



Figur 3.4: Vegvalg for måter å studere et system på, modifisert etter Law (2007).

Eksperiment med det faktiske systemet eller eksperiment med en modell av systemet?

Tunnelprosjekter er ofte prosjekter med høy kostnad, og det å skulle eksperimentere med et fullskala tunnelprosjekt ville vært både kostbart og svært forstyrrende for systemet. Dette er

også en masteroppgave, med begrensede ressurser både med hensyn på tid og økonomi. Av den grunn ble det tidlig åpenbart at en modell av det faktiske systemet var det korrekte for å besvare problemet.

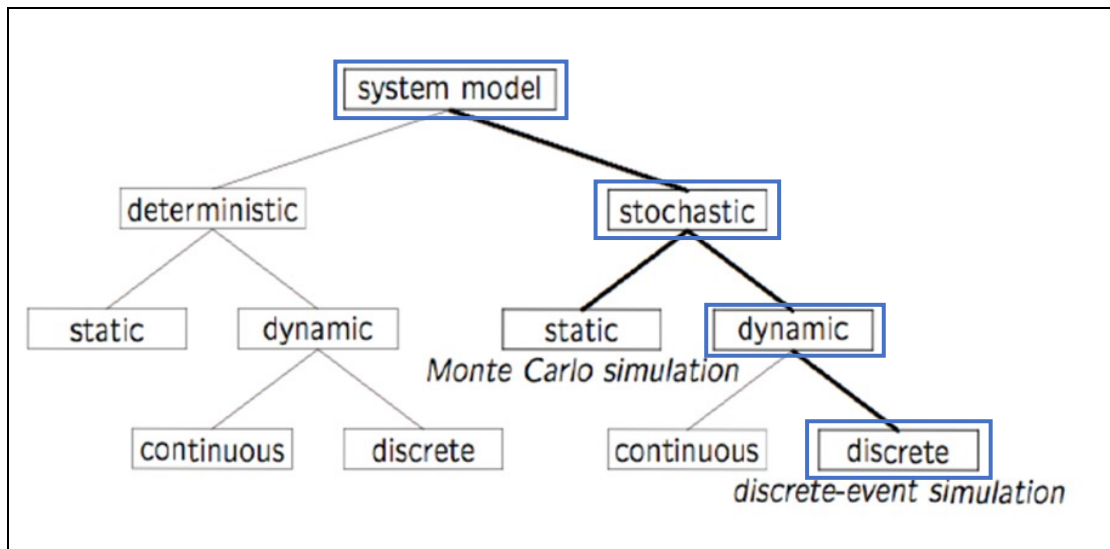
Fysisk modell eller matematisk modell?

Siden en del av det som ønskes besvart i denne oppgaven er hvordan vekseldriftfaktoren påvirkes av endrede betingelser, var det åpenbart at det var behov for en modell som var enkel å manipulere. Det å skulle endre eksempelvis tunneltverrsnitt, tunnellengde, geologi eller andre prosjektspesifikke forhold i en fysisk modell ville blitt arbeidskrevende. Av den grunn falt valget på en matematisk modell, noe som også er normalen ved systemanalyser.

Analytisk løsning eller simulering?

I utgangspunktet kan en salvesyklus oppfattes som en simpel og gjentakende prosess, og dermed kan tunneldriving også oppfattes som en simpel modell. Dog, med de ulike avhengighetene, beslutningspunktene og felles ressursene som vil inngå, spesielt ved vekseldrift, vil dette bli en kompleks prosess. I tillegg, med det i bakhodet at det er ønskelig å bestemme vekseldriftfaktoren under usikkerhet, kompliseres prosessen ytterligere. Av den grunn ble muligheten for en analytisk løsning utelukket, og valget falt på simuleringer.

Siden valget falt på en matematisk modell som skulle studeres gjennom simuleringer, var det behov for å finne passende verktøy for dette. Dette ble gjort med hjelp fra Law (2007) sin klassifisering av simuleringsmodeller langs tre dimensjoner som benyttes i det følgende, og klassifiseringen illustreres med blå bokser i figur 3.5.



Figur 3.5: Klassifisering av simuleringsmodell, modifisert etter Babulak og Wang (2010).

Deterministisk eller stokastisk simuleringsmodell?

Siden det underliggende ønsket var å kunne bestemme vekseldriftfaktoren under usikkerhet, var det naturligvis behov for en stokastisk simuleringsmodell. En fordel med dette er at det også vil muliggjøre deterministiske simuleringer, hvis det skulle være ønskelig, siden en deterministisk simulering kun er et spesialtilfelle av en stokastisk simuleringsmodell.

Statisk eller dynamisk simuleringsmodell?

Tunneldriving er et system som vil utvikle seg med tiden, hovedsakelig i form av meter inndrift i tunnelen. Følgelig vil det være behov for en dynamisk simuleringsmodell.

Kontinuerlige eller diskrete simuleringsmodeller?

I hovedsak er aktivitetene i systemet enkeltstående og etterfølgende. Det er altså start og slutt på aktivitetene som beskriver endringer i systemet, og i så måte er en diskret simuleringsmodell passende. Dette stemmer også godt overens med teorien som sier at kontinuerlige tidssimuleringer ikke har noen plass i prosjektstyringssammenheng, og at det er tilstrekkelig med det diskret hendelsessimulering.

Modellvalg og valg av simuleringsverktøy

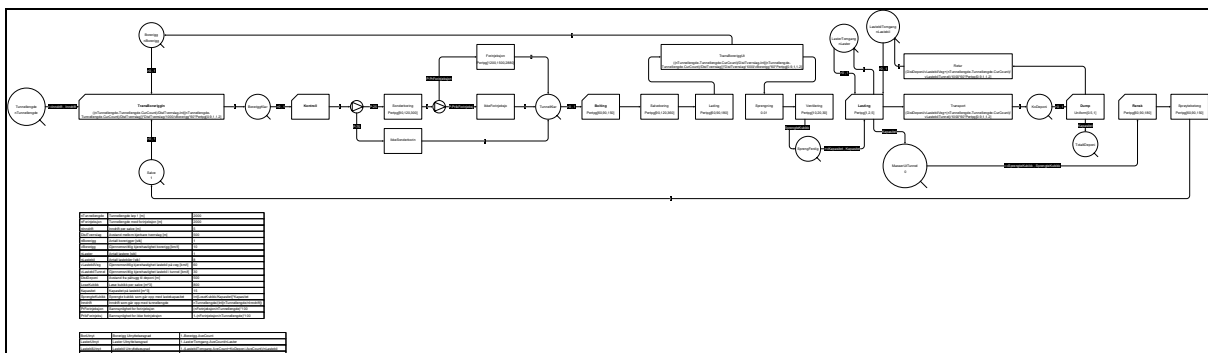
Summen av det overnevnte betyr at det korrekte simuleringsverktøyet for dette systemet er et verktøy som gjennomfører diskret hendelsessimulering.

I et møte med Frode Drevland (personlig kommunikasjon, 28. februar 2022) ble forfatterne introdusert for Stroboscope og EZStrobe, som er henholdsvis et programmeringsspråk og dataprogram for diskret hendelsessimulering. Grunnet forfatterenes begrensede kunnskaper innen programmering, EZStrobes enkle brukergrensesnitt og EZStrobe sitt aktivitetssyklusnettverk og dets likhet med de konseptuelle modellene, ble EZStrobe valgt som simuleringsverktøy.

For å kunne kjøre simuleringsmodellene må Stroboscope og EZStrobe lastes ned fra EZStrobe (2022) sin nettside. I fanen til venstre på denne nettsiden velger man *Stroboscope* og deretter *Installation* hvor det ligger en detaljert installeringsguide. For å kjøre EZStrobe kreves også Microsoft Visio, som må installeres separat. Microsoft Visio installeres på samme måte som alle andre Office-program, fra Microsoft Visio (2022) sin nettside.

Simuleringsmodell – Enstuffsdrift

I det følgende vil den første simuleringsmodellen presenteres, *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift*. Simuleringsmodellen i sin helhet kan ses i vedlegg C. Denne har blitt utarbeidet med utgangspunkt i den konseptuelle modellen, *Konseptuell modell – Enstuffsdrift*, med nødvendige tilpasninger for å få modellen til å fungere som ønsket. I figur 3.6 vises et oversiktsbilde av modellen.



Figur 3.6: Oversiktsbilde Simuleringsmodell – Enstuffsdrift.

Som oversiktsbildet viser har simuleringsmodellen blitt relativt «stor», og dermed uhensiktsmessig å presentere samlet i sin helhet. Av den grunn har det blitt nødvendig å dele opp presentasjonen og illustrasjonene i flere deler og bilder. Hvis leseren har mulighet, oppfordres det til å ha simuleringsmodellene ved sin side under lesing, for å lettere henge med i det følgende.

Alle tallverdier i det følgende er kun eksempler, og er nødvendigvis ikke de verdiene som vil brukes i de kommende produksjonssimuleringene. Alle tallverdier må manipuleres for å tilpasses prosjektspesifikke forhold, med noen få unntak. Videre kan også alle aktiviteter ta deterministiske eller stokastiske varigheter, alt etter ønske.

I figur 3.7 presenteres input-parameterne til modellen. Alle disse kan manipuleres, med unntak av *SprengteKubikk*, *Inndrift*, *PrForinjeksjon* og *PrIkForinjeksj* som er bearbejdede input-parametere beregnet av formler. *Int[x]* er en innebygd funksjon som gir det største heltallet mindre eller lik *x*. Øvrige input-parametere beskrives av figuren.

nTunnellengde	Tunnellengde løp 1 [m]	2000
nForinjeksjon	Tunnellengde med forinjeksjon [m]	2000
nInndrift	Inndrift per salve [m]	5
DistTverrslag	Avstand mellom kjørbare tverrslag [m]	500
nBorerigg	Antall borerigger [stk]	1
vBorerigg	Gjennomsnittlig kjørehastighet borerigg [km/t]	10
nLaster	Antall lastere [stk]	1
nLastebil	Antall lastebiler [stk]	8
vLastebilVeg	Gjennomsnittlig kjørehastighet lastebil på veg [km/t]	60
vLastebilTunnel	Gjennomsnittlig kjørehastighet lastebil i tunnel [km/t]	30
DistDeponi	Avstand fra påhugg til deponi [m]	500
LoseKubikk	Løse kubikk per salve [m ³]	800
Kapasitet	Kapasitet på lastebil [m ³]	15
SprengteKubikk	Sprengte kubikk som går opp med lastekapasitet	$\text{Int}[\text{LoseKubikk}/\text{Kapasitet}] * \text{Kapasitet}$
Inndrift	Inndrift som går opp med tunnellengde	$n\text{Tunnellengde}/(\text{Int}[n\text{Tunnellengde}/n\text{Inndrift}])$
PrForinjeksjon	Sannsynlighet for forinjeksjon	$(n\text{Forinjeksjon}/n\text{Tunnellengde}) * 100$
PrIkForinjeksj	Sannsynlighet for ikke forinjeksjon	$(1 - (n\text{Forinjeksjon}/n\text{Tunnellengde})) * 100$

Figur 3.7: Skjerm bilde av input-parameter Simuleringsmodell – Enstuffsdrift.

Figur 3.8 viser resultatene som skal beregnes og skrives ut etter en simulering. Dette kan utvides hvis man ønsker å studere noe annet, men i dette tilfellet har utnyttelsesgraden til de felles ressursene og driftstiden blitt valgt. *Queue.AveCount* er en innebygd funksjon som bestemmer det tidsvektede gjennomsnittet av innholdet i *Queue*, og ved hjelp av formlene i figuren lar utnyttelsesgraden til en ressurs bestemmes.

SimTime er en funksjon som gir verdien i simuleringsklokken, altså tiden simuleringen har tatt i valgt tidsenhet. I denne simuleringsmodellen er tidsenheten valgt til minutter, og ved å dele på 60 får man driftstiden i timer. I denne sammenhengen er driftstid synonymt med byggetid, drivetid og lignende.

BorUtnyt	Borerigg Utnyttelsesgrad	1-Borerigg.AveCount
LasterUtnyt	Laster Utnyttelsesgrad	1-LasterTomgang.AveCount/nLaster
LastebilUtnyt	Lastebil Utnyttelsesgrad	1-(LastebilTomgang.AveCount+KoDeponi.AveCount)/nLastebil
Tid	Driftstid i timer	SimTime/60

Figur 3.8: Skjerm bilde av resultater Simuleringsmodell – Enstuffsdrift.

I figur 3.9 vises et eksempel på en utskrift man får etter simulering. I eksempelet er det gjennomført ti simuleringer, og resultatene som skrives ut er i henhold til figur 3.8. I tillegg beregnes gjennomsnitt, standardavvik, minimum og maksimum for hvert av resultatene.

```

** Calculated results after simulation **

```

Run	BorUtnyt	LasterUtnyt	LastebilUtnyt	Tid
1	0.706304262	0.0977769076	0.100193456	16757.2441
2	0.712740458	0.095951103	0.0985182947	17069.7292
3	0.716309638	0.0946875772	0.0971627069	17323.1372
4	0.708229795	0.0976463741	0.099927256	16814.6905
5	0.719300472	0.0942892964	0.0965158847	17447.0875
6	0.691082131	0.1027945	0.105297457	15994.9477
7	0.714841114	0.094850455	0.0973451366	17267.3067
8	0.70043478	0.100171425	0.102279224	16434.8163
9	0.719197443	0.0933738524	0.0960643932	17499.5895
10	0.702099982	0.098820948	0.101058094	16618.6458
Average	0.709054008	0.0970362439	0.0994361903	16922.7195
Std Dev	0.00919832306	0.00297252526	0.00290905524	487.482259
Minimum	0.691082131	0.0933738524	0.0960643932	15994.9477
Maximum	0.719300472	0.1027945	0.105297457	17499.5895

```

-----
Execution Time = 2.549 seconds

```

Figur 3.9: Skjerm bilde av utskrift av resultatene etter simulering.

Figur 3.10 viser den første delen av simuleringsnettverket. Den første aktiviteten som vil foregå er *TransBoreriggIn*, representert av en *Combi*. Denne aktiviteten angir varigheten på transport av borerigg fra enten påhugg eller nærmeste kjørbare tverrslag til stoff, alt etter hvilken avstand som er kortest. Simuleringsmodellene forutsetter tverrforbindelser for hver 250. meter, siden det i toløpstunneler for trafikk er krav om tverrforbindelser for maksimalt hver 250. meter (SVV, 2022). I simuleringsmodellene er det tatt utgangspunkt i at hver andre tverrforbindelse gjøres kjørbare for tungt utstyr, slik at det er 500 meter mellom hver kjørbare tverrforbindelse. Det ble bekreftet i intervjuene at dette er ganske vanlig praksis. Varigheten er bestemt av en formel som beregner den korteste avstanden boreriggen skal transporteres,

ganget med gjennomsnittlig kjørehastighet til boreriggen og omregnet til minutter. Avslutningsvis er det multiplisert inn en sannsynlighetsfordeling for å representere usikkerheten til varigheten av aktiviteten. I dette eksemplet er det benyttet en *Pertpg*-fordeling, som gir en sannsynlighetsfordeling for en skaleringsfaktor som ganges med varigheten.

Videre vises de fire *Queue*-ene *Tunnellengde*, *Borerigg*, *Salve* og *BoreriggKlar*. Dette er *Queue*-er som inneholder ressurser.

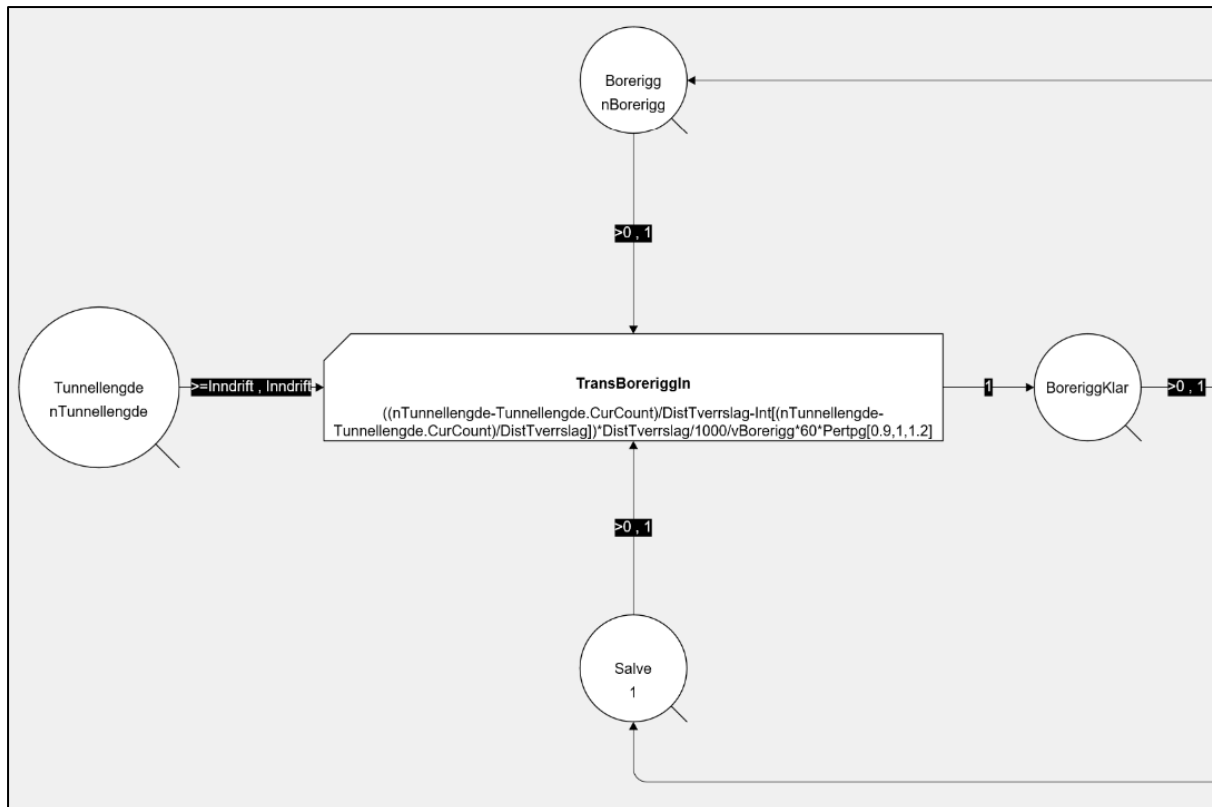
Tunnellengde representerer gjenstående drivemeter, altså antall meter som gjenstår å drive, og fungerer som start- og stoppbetingelse for hele simuleringen. For at simuleringen skal starte må det være drivemeter igjen, og simuleringen vil stoppe når det er tomt for drivemeter i *Queue*-en *Tunnellengde*. Fra *Branch Link*-en ser man at for hver salve reduseres gjenstående tunnellengde med den forhåndsdefinerte inndriften, *Inndrift*.

Borerigg representerer boreriggen. For at aktiviteten *TransBoreriggIn* skal starte ser man fra *Branch Link*-en at *Borerigg* må inneholde mer enn null ressurser, altså må boreriggen være tilgjengelig. Videre ser man at når *TransBoreriggIn* starter, fjernes én ressurs fra *Borerigg*, altså opptas boreriggen. Boreriggen vil være opptatt helt til ladingen er utført. Da vil den transporteres ut og deretter stilles tilgjengelig for en ny salvesyklus, i form av at *Borerigg* tilføres en ny ressurs.

Salve representerer antall salvesykluser i simuleringen, og er en *Queue* som sørger for at kun én salvesyklus kan foregå samtidig. I det *TransBoreriggIn* starter, frigjøres en ressurs fra *Salve*. Når hele salvesyklusen er utført, vil en ny ressurs tilføres *Salve* for å representere at det er klart for en ny salvesyklus.

BoreriggKlar er en *Queue* som representerer at boreriggen er transportert inn på stuff, og er tilgjengelig. Denne *Queue*-en tilføres en ressurs umiddelbart etter at *TranBoreriggIn* er ferdig.

For at *TransBoreriggIn* skal starte må startbetingelsene være tilfredsstilt, altså må *Tunnellengde*, *Borerigg* og *Salve* inneholde tilstrekkelig med ressurser.



Figur 3.10: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 1.

I figur 3.11 vises andre del av simuleringsmodellen. Etter at *BoreriggKlar* har mottatt ressurser sendes ressursene umiddelbart videre til *Combi-en Kontroll*. *Kontroll* er en aktivitet uten noen annen funksjon enn at en *Fork* ikke kan etterfølge en *Queue*, og ble følgelig satt inn. *Kontroll* har ingen varighet, og påvirker ikke simuleringen.

Videre kunne det her vært lagt inn tyngre sikring som forbolting. Det er ikke tatt med i modellen, siden forbolting forutsetter kortere salvelengde, og modellen er bygget omkring fast inndrift per salve. Fra teorien fremkommer det at boltelengder på eksempelvis 6 meter vil kreve salvelengder på 2,5-3,0 meter for å sikre overlapp mellom bolterastene. I denne omgang ville varierende inndrift per salve blitt uforholdsmessig komplisert. Redusert salvelengde hadde også medført et redusert masseuttak som ville komplisert arbeidet ytterligere.

Det neste elementet er en *Fork* som avgjør om det skal sonderbores eller ikke. Her er den relative sannsynligheten satt til 25 % for sonderboring og 75 % for ikke sonderboring, siden dette representerer sonderboring på hver fjerde salve.

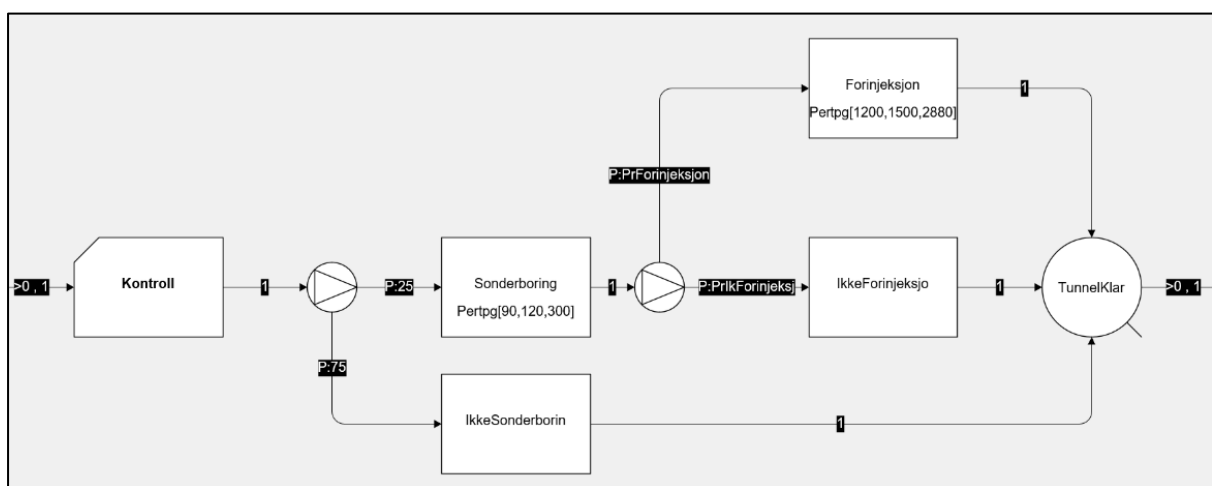
Hvis vegen uten sonderboring velges, sendes ressursene til *Normal-en IkkeSonderborin*. Dette er et element uten varighet, og er kun for å illustrere at det ikke sonderbores. Deretter sendes ressursene til *Queue-en TunnelKlar*, som representerer at syklusen er klar for neste aktivitet.

Hvis vegen med sonderboring velges, sendes ressursene til *Normal-en Sonderboring*. *Sonderboring* representerer sonderboringen for kartlegging av bergmassen foran stoffen, og her legges en varighet inn. I eksemplet er det valgt en varighet tilordnet en *Pertpg*-fordeling. Når *Sonderboring* avsluttes, sendes ressursene til en ny *Fork*.

I denne *Fork*-en velges det om det skal forinjiseres eller ikke. Her bestemmes den relative sannsynligheten for forinjeksjon som forholdet mellom tunnallengden som skal forinjiseres og tunnallengden. Den relative sannsynligheten for ikke forinjeksjon blir naturligvis én minus sannsynligheten for forinjeksjon. Formlene for dette vises i figur 3.7.

Blir forinjeksjon valgt sendes ressursene til denne *Normal-en*, og aktiviteten utføres med gitt varighet. Deretter sendes ressursene til *Queue-en TunnelKlar*, og syklusen er klar for neste aktivitet. *Forinjeksjon* representerer varigheter tilknyttet boring av injeksjonsskjermen og injisering av skjermen.

Blir ikke forinjeksjon valgt sendes ressursene til *Normal-en IkkeForinjeksjo* som kun illustrerer at det ikke forinjiseres, og ikke har noen varighet. Deretter sendes ressursene til *Queue-en TunnelKlar*, og syklusen er klar for neste aktivitet.



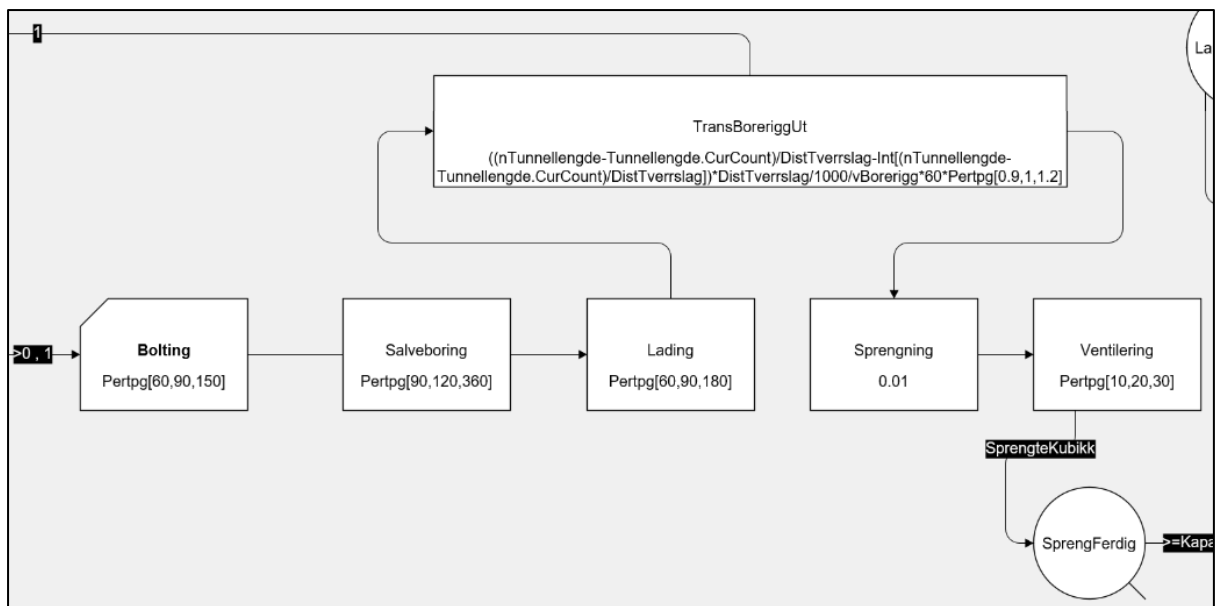
Figur 3.11: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 2.

I figur 3.12 presenteres tredje del av simuleringsmodellen. Etter at *TunnelKlar* har mottatt ressurser, sendes ressursene umiddelbart videre til *Combi-en Bolting*. *Bolting* representerer varigheter tilknyttet boring for bolter og boltemontering på den betongsprøytede bergoverflaten. I praksis legges gjerne boltingen til salveboringen, men for å kunne legge inn varierte sikringsmengder i form av bolte- og sprøytebetongmengder, ble boltingen satt inn som en egen aktivitet. Bolting er sikring for forrige salve, og legger beslag på boreriggen. Følgelig plasseres boltingen rett før salveboring, og ikke rett etter sprøytebetong.

Videre sendes ressursene gjennom *Normal-ene Salveboring, Lading, TransBoreriggUt, Sprengning* og *Ventilering*. *Salveboring* innebærer varigheter tilknyttet boring av mindre hull for lading med sprengstoff, samt boring av uladde grovhull i kuttene. Tider til flytting av bommer, tid til bytting av borekroner og ekstra tid som følge av mangel på samtidighet inngår også i disse varighetene. *Lading* innebærer varighetene omhandlende lading av de mindre hullene i salven med emulsjonssprengstoff og tennere, samt opprydning og klargjøring til sprengning. *TransBoreriggUt* representerer tiden som går med til utkjøring av boreriggen før sprengning. *Sprengning* omhandler kun selve sprengningssekvensen, og viser et eksempel på simuleringsmodellen også kan ta deterministiske varigheter. *Ventilering* viser til varigheten på ventilasjonspausen for fortykning av skytegassproppen og dieselavgasser som følge av henholdsvis sprengningen og bruk av dieseldrevne maskiner og utsyr.

Når aktiviteten *TransBoreriggUt* avsluttes sendes det også en ressurs til *Queue-en Borerigg*, som representerer at boreriggen er fristilt. Altså har boreriggen vært bundet opp fra *TransBoreriggIn* til *TransBoreriggUt*, og alle mellomliggende aktiviteter. Varigheten til *TransBoreriggUt* bestemmes i eksemplet på samme måte som for *TransBoreriggIn*.

Til slutt sendes ressursene til *Queue-en SprengFerdig*. Her illustreres mengden ressurser som sendes til *SprengFerdig* gjennom en *Release Link-en*, og er definert av parameteren *SprengteKubikk*. *SprengFerdig* er altså en *Queue* som inneholder gjenstående løse kubikk sprengstein per salve etter sprengning.



Figur 3.12: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 3.

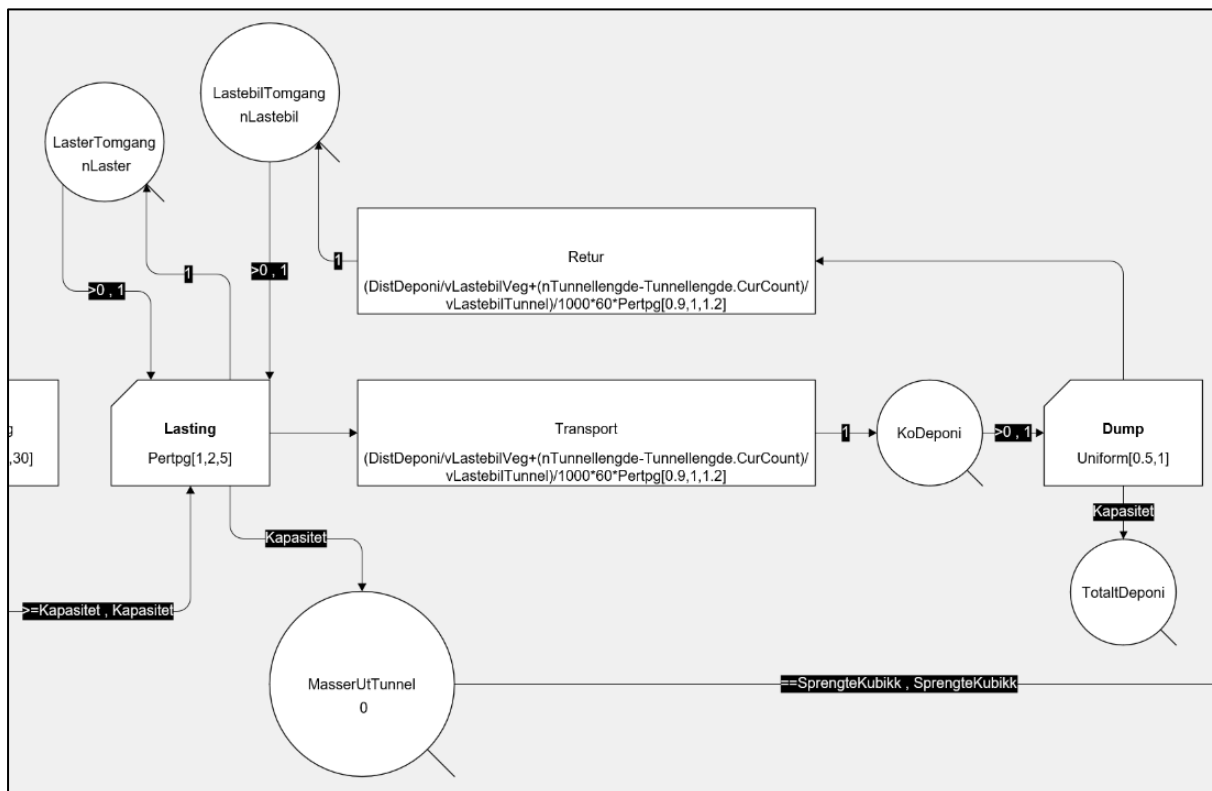
Fjerde del av modellen presenteres i figur 3.13. *Combi-en Lasting* representerer aktiviteten med å fylle en lastebil med sprengstein med en hjullaster. Varigheten her bestemmes som forklart tidligere. Betingelser for at denne aktiviteten skal starte er at det er en tilgjengelig hjullaster, at det er en tilgjengelig lastebil og at det gjenstår sprengstein. Tilgjengelige ressurser av hjullasterer representeres av *Queue-en LasterTomgang*, og tilgjengelige ressurser av lastebiler av *Queue-en LastebilTomgang*. Sprengstein representeres som nevnt av *SprengFerdig*, og frigjør lastebilen sin kapasitet, *Kapasitet*, for hver *Lasting*.

Når *Lasting* er fullført, sendes en ressurs som representerer lastebilen til *Normal-en Transport*, og en ressurs som representerer hjullasteren sendes til *LasterTomgang*. *Transport* representerer aktiviteten der lastebilen først kjører ut av tunnelen i en gitt hastighet, og deretter fra påhugg til deponi i en gitt hastighet. Denne varigheten tar også inn usikkerhet ved hjelp av en skaleringsfaktor tilordnet en *Pertpg*-fordeling, på samme måte som transporten av boreriggen.

Når *Transport* avsluttes sendes en ressurs til *Queue-en KoDeponi*, som representerer en eventuell kø ved deponiet, siden kun én lastebil kan dumpe, eller tippe, masser om gangen. *KoDeponi* frigjør kun en ressurs om gangen, til *Combi-en Dump* som representerer dumping av massene i lastebilen. I dette eksemplet er varigheten på *Dump* tilordnet en uniformfordeling, for å illustrere muligheten for andre innebygde funksjoner i EZStrobe. Når *Dump* avsluttes sendes lastebilen sin kapasitet til *Queue-en TotaltDeponi*. *TotaltDeponi* vil representere den totale mengden sprengstein som er tatt ut av tunnelen. Når *Dump* avsluttes

vil også en ressurs som representerer lastebilen sendes til *Normal*-en *Retur*. *Retur* representerer aktiviteten der lastebilen kjører tilbake til stuff igjen, og varigheten bestemmes på samme måte som for *Transport*. Når *Retur* avsluttes, sendes en ressurs som representerer lastebilen til *LastebilTomgang*, og representerer en tilgjengelig lastebil.

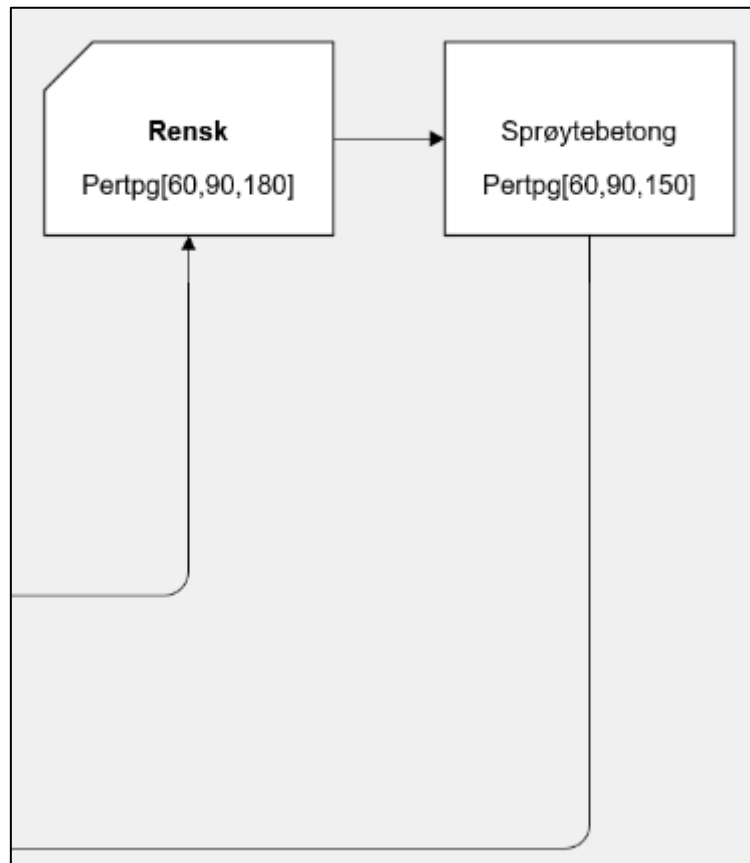
Når *Lasting* fullføres sendes det også ressurser til *Queue*-en *MasserUtTunnel*. *MasserUtTunnel* representerer en ventebetingelse, der man ikke kan gå videre til neste del av salvsyklusen før alle massene i tunnelen er tatt ut. *MasserUtTunnel* vil altså tilføres ressurser tilsvarende *Kapasitet* for hver *Lasting*. Når innholdet i *MasserUtTunnel* tilsvarer mengden *SprengteKubikk* frigjøres hele innholdet i *MasserUtTunnel*, og sender ressurser videre.



Figur 3.13: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 4.

Siste, og femte, del av simuleringsmodellen presenteres i figur 3.14. Når *MasserUtTunnel* er lik *SprengteKubikk* er startbetingelsen for *Combi*-en *Rensk* oppfylt. Når *Rensk* avsluttes kan *Normal*-en *Sprøytebetong* starte. Aktiviteten *Rensk* representerer varigheter tilknyttet maskinell rensk med piggmaskin og manuell driftsrensk med spett for fjerning av løse bergfragmenter. *Sprøytebetong* innebærer varigheter tilknyttet sikring av bergmassen med sprøytebetong.

Når *Sprøytebetong* er avsluttet sendes en ressurs til *Queue-en Salve*, som ble presentert i første del av modellen, for å representere at den pågående salvesyklusen er fullført og at det er klart for en ny.



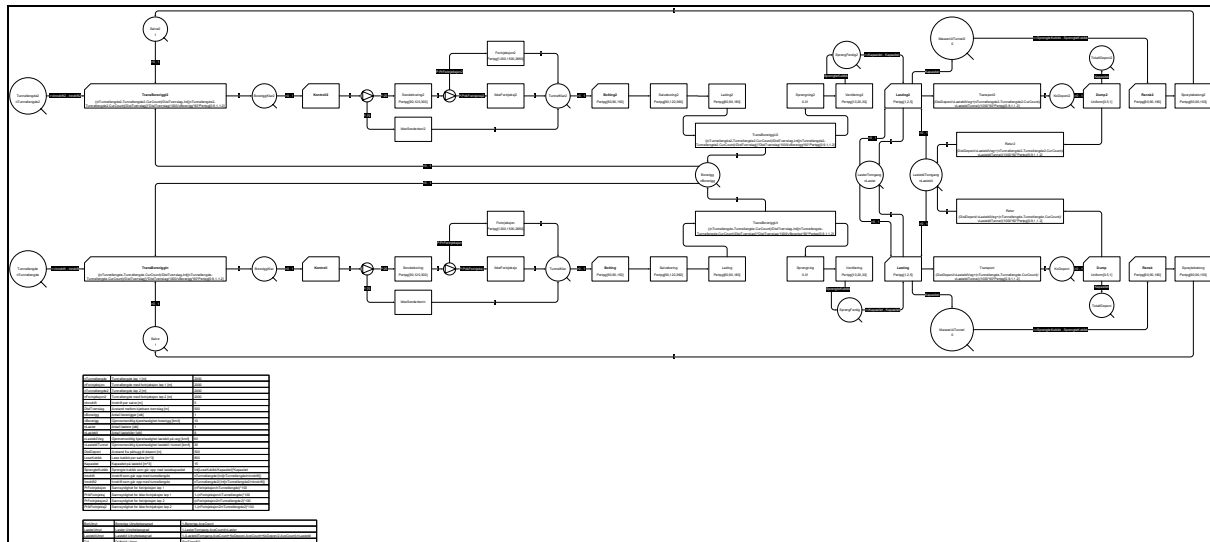
Figur 3.14: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift, Del 5.

Som allerede nevnt vil denne sløyfen av aktiviteter fortsette å gå helt til *Queue-en Tunnellengde* er tom for ressurser, eller med andre ord til man har oppnådd gjennomslag.

Simuleringsmodell – Vekseldrift

I det følgende vil den andre simuleringsmodellen presenteres, *Simuleringsmodell – Vekseldrift*. Simuleringsmodellen i sin helhet kan ses i vedlegg D. Denne har blitt utarbeidet med utgangspunkt i den konseptuelle modellen, *Konseptuell modell – Vekseldrift* og *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift*, med nødvendige tilpasninger for å få modellen til å fungere som ønsket. Kort forklart er *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* doblet, bortsett fra at boreriggen, hjullasteren og lastebilene deles mellom de to systemene, og dermed kobler disse sammen. Ellers er alle aktivitetene de samme, og skilles ved at aktivitetene for tunnellop

nummer to angis med en «2» på slutten av navnet. Noen av aktivitetene kan ha mistet siste bokstav i navnet, siden denne er erstattet med «2». Dette skyldes en begrensning i programmet om antall tegn i navnet. I figur 3.15 vises et oversiktsbilde av modellen.



Figur 3.15: Oversiktsbilde Simuleringsmodell – Vekseldrift.

I figur 3.16 presenteres input-parametere til modellen. Dette er helt likt som for *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift*, bare at enkelte parametere er doblet, siden det er snakk om to tunnellop som kan ha ulike egenskaper. Dette angis ved at det er lagt til «2» på slutten av parameternavnet.

nTunnellengde	Tunnellengde løp 1 [m]	2000
nForinjeksjon	Tunnellengde med forinjeksjon løp 1 [m]	2000
nTunnellengde2	Tunnellengde løp 2 [m]	2000
nForinjeksjon2	Tunnellengde med forinjeksjon løp 2 [m]	2000
nInndrift	Inndrift per salve [m]	5
DistTverrslag	Avstand mellom kjørbare tverrslag [m]	500
nBorerigg	Antall borerigger [stk]	1
vBorerigg	Gjennomsnittlig kjørehastighet borerigg [km/t]	10
nLaster	Antall lastere [stk]	1
nLastebil	Antall lastebiler [stk]	8
vLastebilVeg	Gjennomsnittlig kjørehastighet lastebil på veg [km/t]	60
vLastebilTunnel	Gjennomsnittlig kjørehastighet lastebil i tunnel [km/t]	30
DistDeponi	Avstand fra påhugg til deponi [m]	500
LoseKubikk	Løse kubikk per salve [m ³]	800
Kapasitet	Kapasitet på lastebil [m ³]	15
SprengteKubikk	Sprengte kubikk som går opp med lastekapasitet	$\text{Int}[\text{LoseKubikk}/\text{Kapasitet}] * \text{Kapasitet}$
Inndrift	Inndrift som går opp med tunnellengde	$n\text{Tunnellengde}/(\text{Int}[n\text{Tunnellengde}/n\text{Inndrift}])$
Inndrift2	Inndrift som går opp med tunnellengde	$n\text{Tunnellengde}2/(\text{Int}[n\text{Tunnellengde}2/n\text{Inndrift}])$
PrForinjeksjon	Sannsynlighet for forinjeksjon løp 1	$(n\text{Forinjeksjon}/n\text{Tunnellengde}) * 100$
PrIkForinjeksj	Sannsynlighet for ikke forinjeksjon løp 1	$1 - (n\text{Forinjeksjon}/n\text{Tunnellengde}) * 100$
PrForinjeksjon2	Sannsynlighet for forinjeksjon løp 2	$(n\text{Forinjeksjon}2/n\text{Tunnellengde}2) * 100$
PrIkForinjeksj2	Sannsynlighet for ikke forinjeksjon løp 2	$(1 - (n\text{Forinjeksjon}2/n\text{Tunnellengde}2)) * 100$

Figur 3.16: Skjerm bilde av input-parameter Simuleringsmodell – Vekseldrift.

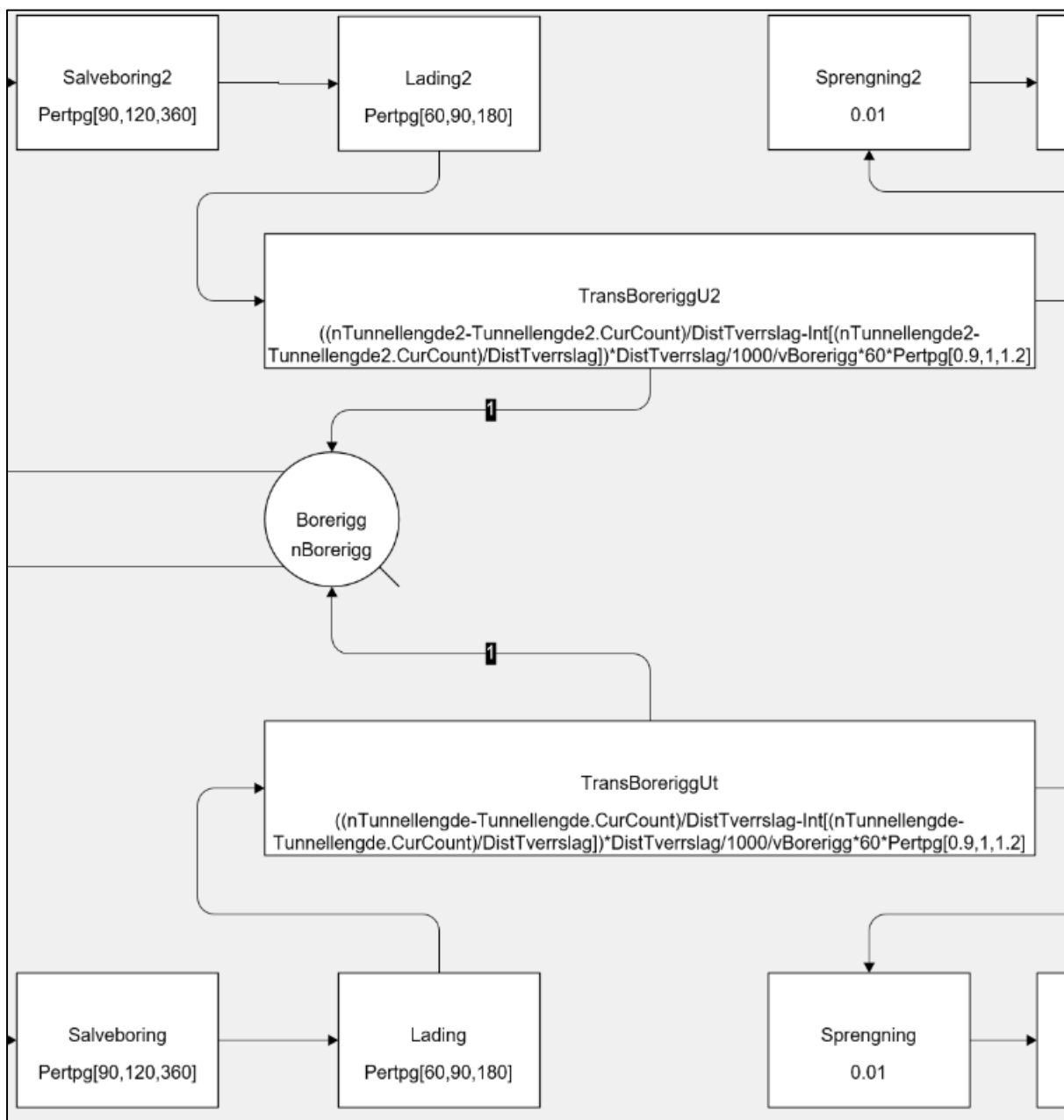
Figur 3.17 viser resultatene som skal beregnes og skrives ut etter en simulering. Dette er likt som for *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift*, bare at det tas høyde for at ressursene deles mellom de to systemene ved at *KoDeponi2* er lagt til i formelen for *LastebilUtnyt*. Det at det er to deponier er rart, men det måtte bli slik for at simuleringsmodellen skulle fungere. Med felles deponi ville det ikke vært mulig å skille mellom potensiell ulik transportlengde for de ulike tunnellopene.

Utskriften av resultatene vil i dette tilfellet bli helt likt som for *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift*, som vist i figur 3.9.

BorUtnyt	Borerigg Utnyttelsesgrad	$1 - \text{Borerigg.AveCount}$
LasterUtnyt	Laster Utnyttelsesgrad	$1 - \text{LasterTomgang.AveCount}/n\text{Laster}$
LastebilUtnyt	Lastebil Utnyttelsesgrad	$1 - (\text{LastebilTomgang.AveCount} + \text{KoDeponi.AveCount} + \text{KoDeponi2.AveCount})/n\text{Lastebil}$
Tid	Driftstid i timer	$\text{SimTime}/60$

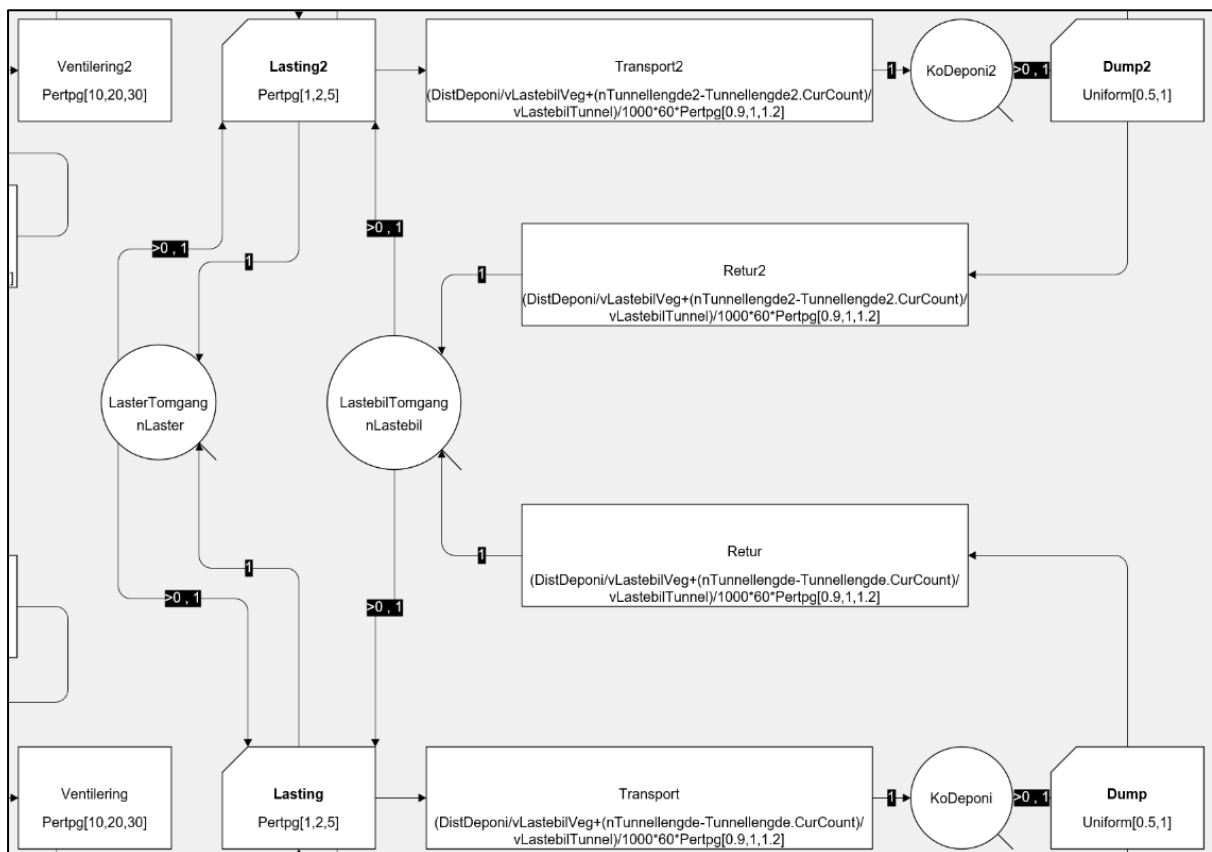
Figur 3.17: Skjerm bilde av resultater Simuleringsmodell – Vekseldrift.

I figur 3.18 vises den delen av modellen der boreriggen sammenkobler systemene. Som allerede nevnt, bindes ressursen *Borerigg* opp fra aktiviteten *TransBoreriggIn* starter til *TransBoreriggUt* avsluttes, eller eventuelt fra *TransBoreriggI2* til *TransBoreriggU2*. At boreriggen deles mellom tunnellopene medfører at det kun kan foregå arbeid som krever borerigg på én stoff av gangen, gitt at det bare er én borerigg. Utover at *Borerigg* deles mellom systemene fungerer resten av denne delen av modellen helt likt som for *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift*.



Figur 3.18: Simuleringsmodell – Vekseldrift, borerigg.

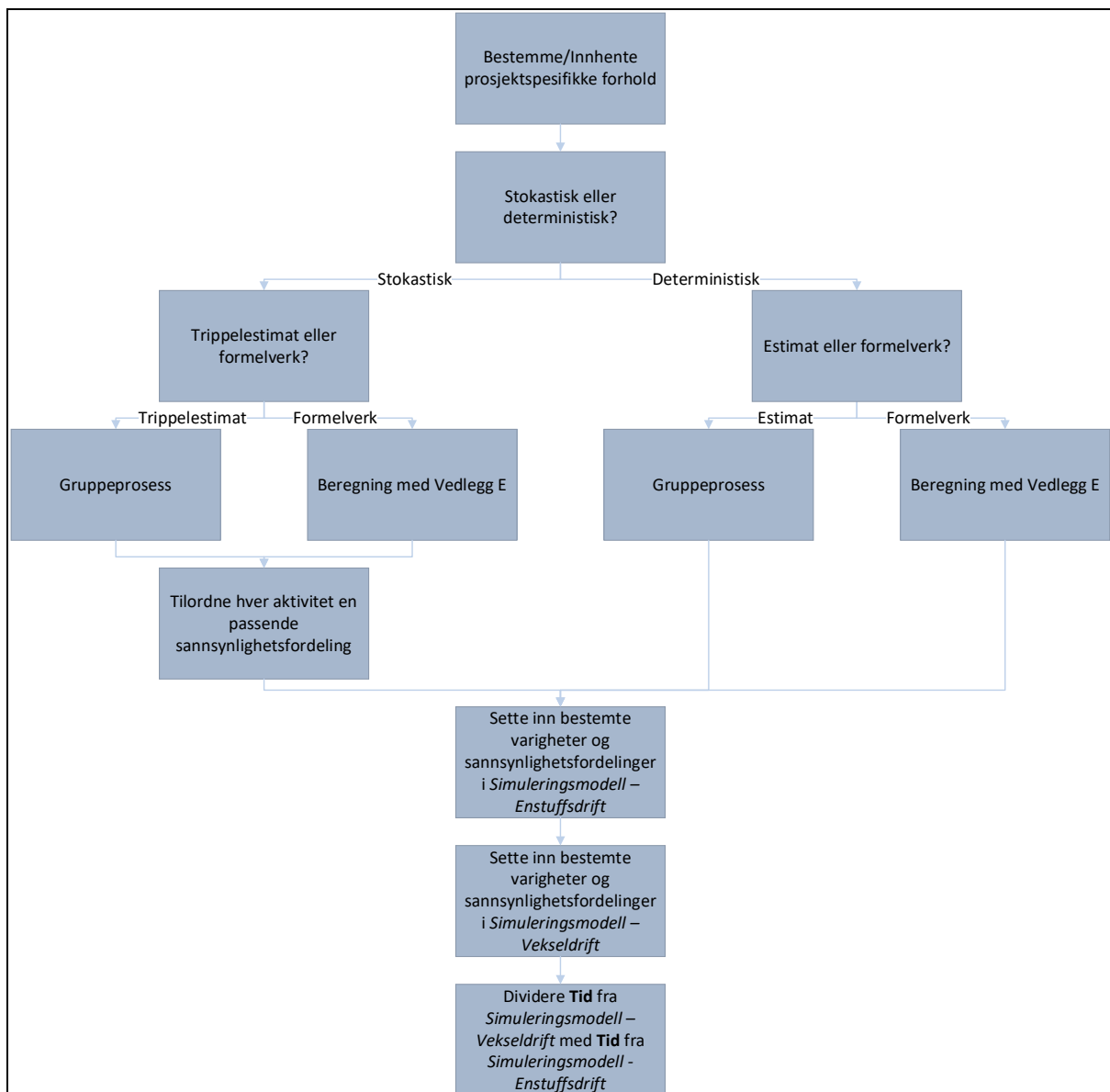
I figur 3.19 presenteres delen av simuleringsmodellen som deler lastesystem. Her deles både hjullasteren og lastebilene mellom begge systemene. For at *Lasting* eller *Lasting2* skal starte må det være tilgjengelige ressurser i *Queue-en LasterTomgang*. Når *Lasting* eller *Lasting2* avsluttes frigjøres hjullasteren til *LasterTomgang*. På samme måte deles lastebilene mellom de to systemene. *LastebilTomgang* inneholder tilgjengelige lastebiler, og disse frigjøres til *Lasting* eller *Lasting2*. Deretter vil lastebilen være bundet opp frem til den har returnert fra deponiet, representert gjennom at *Retur* eller *Retur2* avsluttes, og ressurs frigjøres til *LastebilTomgang*. Utover at *LasterTomgang* og *LastebilTomgang* deles mellom systemene, fungerer resten av denne delen av modellen helt likt som for *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift*.



Figur 3.19: Simuleringsmodell – Vekseldrift, lastesystem.

Rammeverk – Vekseldriftfaktor

Med utgangspunkt i de to simuleringsmodellene var det også behov for en fremgangsmåte disse kunne bli benyttet på, sammen med blant annet prosjektspesifikke forhold. I figur 3.20 presenteres en foreslått fremgangsmåte for hvordan vekseldriftfaktoren kan bestemmes ved hjelp av simuleringsmodellene.



Figur 3.20: Rammeverk – Vekseldriftfaktor.

3.3.5 Gjennomføre testsimuleringer

For å kontrollere at simuleringsmodellen var gyldig har det hele tiden vært ønskelig å utføre testsimuleringer. Dette har både blitt gjort både for å se at endrede betingelser gir logiske endringer i byggetiden. Slike betingelser kan være alt fra endret varighet på en aktivitet, til endrede mengder ressurser. Dermed har testsimuleringer sørget for en iterativ prosess i utviklingen av simuleringsmodellene, med mange steg tilbake og nedturer, men også fremskritt og oppturer.

EZStrobe innehar muligheten for å stegvis animere flyten i simuleringsnettverket, noe som har vært et viktig hjelpemiddel for å fange opp feil og mangler i modellen. Uten denne

funksjonen hadde man kun hatt sluttresultatene å forholde seg til, og ut ifra disse måtte man forsøkt å finne feilene i modellen.

3.3.6 Validering av simuleringsmodell

Når man etter hvert ble fornøyd med resultatene fra testsimuleringene gjensto det et behov for å kunne validere simuleringsmodellen. Som definert, er validering prosessen med å bestemme hvorvidt en simuleringsmodell er en nøyaktig representasjon av systemet, for målene ved studien.

Målet med studien er å bestemme vekseldriftfaktoren under usikkerhet, og for å gjøre dette må man bestemme tunnelbyggetiden for et system med regulær enstuffsdrift og et system med vekseldrift. Følgelig vil valideringen omhandle å avdekke om simuleringsmodellene er nøyaktige representasjoner av de overnevnte systemene.

For å raskt kunne sjekke flere situasjoner ble det besluttet at valideringen skulle gjøres gjennom sammenligning med en annen kjent tunnelbyggetidsmodell. *Tunnelbyggetid 2021* er en byggetidsmodell som forfatterne er kjent med fra før, og denne ble valgt til valideringen. Siden *Simuleringsmodell – Veksel drift* kun er en utvidelse av *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift*, og *Tunnelbyggetid 2021* benytter seg av forhåndsbestemte vekseldriftfaktorer fremfor å simulere vekseldrift, vil fokuset ligge på å validere *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift*. Hvis denne er valid, vil trolig også *Simuleringsmodell – Veksel drift* være det.

I det følgende vil resultater fra noen av simuleringene fra *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* sammenlignes med resultater fra *Tunnelbyggetid 2021*, der det er lagt inn tilsvarende forhold. Disse forholdene samsvarer med standardtilfellet, eksklusive sonderboring og forinjeksjon, som presenteres i tabell 4.4, og det som varieres er tunnallengden. Det må påpekes at det ikke er et mål å få nøyaktig lik byggetid fra de ulike modellene, men å vise at de ligger i samme størrelsesorden. Det er mange ulike forutsetninger som spiller inn i de ulike modellene, og modellene er utviklet med ulik hensikt. *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* og *Simuleringsmodell – Veksel drift* er utviklet for å bestemme vekseldriftfaktor under usikkerhet, og for å se hvordan den endrer seg med endrede betingelser, ikke for å beregne en mest mulig korrekt byggetid.

Med bakgrunn i standardtilfellet, men ekskludert sonderboring og forinjeksjon, har det blitt beregnet byggetid både i *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* og i *Tunnelbyggetid 2021* for

ulike tunnallengder, for å sammenligne modellene. I tabell 3.2 vil resultatene i uker, med 101 timer arbeidsuke, fra de ulike modellen presenteres, samt forskjellen mellom dem.

Tabell 3.2: Sammenligning Simuleringsmodell – Enstuffsdrift og Tunnelbyggetid 2021.

Tunnallengde [m]	Byggetid fra <i>Simuleringsmodell – Enstuffsdrift</i> [uker]	Byggetid fra <i>Tunnelbyggetid 2021</i> [uker]	Avvik	
			[uker]	[%]
2 000	37,75	41,43	3,68	9,7
4 000	77,76	82,87	5,11	6,6
6 000	121,99	124,30	2,31	1,9

Fra tabell 3.2 er det tydelig at *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* og *Tunnelbyggetid 2021* gir byggetid i samme størrelsesorden. Det er litt forskjell, men dette avtar med økende tunnallengde. Siden *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* og *Simuleringsmodell – Vekseldrift* ikke er utviklet for mest mulig korrekt å bestemme byggetiden, men for å kunne bestemme vekseldriftfaktoren under usikkerhet, anses dette som godt nok.

3.3.7 Design av eksperimentene

Frem til nå har det blitt presentert en metode for å bestemme vekseldriftfaktoren under usikkerhet. Videre har det vært ønskelig å finne ut hvordan vekseldriftfaktoren påvirkes av endrede betingelser. Dette kan bestemmes ved å beregne vekseldriftfaktoren fra det overnevnte rammeverket, for ulike betingelser.

De ulike eksperimentene

Det har vært ønskelig å se hvordan usikkerhet i varigheten på aktivitetene påvirker vekseldriftfaktoren. Av den grunn vil det først gjøres en simulering med deterministiske verdier på varighetene for standardtilfellet, og deretter en simulering med stokastiske verdier for varighetene for standardtilfellet. I de videre simuleringene vil det benyttes stokastiske verdier.

Før betingelsene varieres vil det også gjøres en simulering med bakgrunn i de innhentede tripplestimatene, for å sjekke om simuleringsmodellen vil kunne fungere i en gruppeprosess. Disse tripplestimatene ble anslått med utgangspunkt i et tilfelle tilsvarende standardtilfellet.

Avslutningsvis vil det gjennomføres flere simuleringer der betingelsene varierer. De ulike betingelsene, eller prosjektspesifikke forholdene, som er valgt å variere er: (1) tunnallengde; (2) tunneltverrsnitt; (3) bolte- og sprøytebetongmengder; og (4) injeksjonsmengde. Variasjonene vil gjøres med utgangspunkt beregninger ved hjelp av vedlegg E, der varighetene beregnes for de ulike betingelsene med teorien fra kapittel 2.3.4 *Enhetstider for rigg, boring, lading, ventilasjon, rensk og utlasting*, samt 2.3.5 *Enhetstider for sikring* som grunnlag. Det første Excel-arket i vedlegg E, *Bor.,lad.,vent.,utl.,rensk*, er beregningene tilknyttet boring, lading, ventilasjon, utlasting og rensk. Det andre Excel-arket, *Sikring*, er beregningene tilknyttet sikringsaktivitetene bolting, sprøytebetong, sonderboring og injeksjon. Det tredje Excel-arket, *Matrise*, er beregninger for skalering av varighetene slik at de kan brukes i Pert-beregninger. Det fjerde og siste Excel-arket, *Rammeverk*, er et oppsett for beregningene.

Valg i EZStrobe

I EZStrobe er det mulig å velge hvor mange simuleringer man ønsker å kjøre for en gitt situasjon. Én simulering vil tilsvare drivingen av en tunnel, enten ettløps eller toløps. Det er kjent at for ti verdier gjør sentralgrenseteoremet seg gyldig med god tilnærming, men det skal gjerne være over 30 verdier. Siden EZStrobe enkelt muliggjør mange simuleringer, og at det går relativt raskt, er det valgt å gjennomføre 100 simuleringer for hver situasjon. Dette betyr at for hver situasjon drives 100 tunneler.

Det er også mulig i EZStrobe å velge mellom følgende sannsynlighetsfordelinger: Beta-, skalert Beta-, Erlang-, Eksponential-, Gamma-, Normal-, Pert-, Pertpg-, Trekant- og Uniformfordeling. Siden det ikke lot seg gjøre å samle inn tilstrekkelig med data for å kunne bestemme sannsynlighetsfordelingen til hver aktivitet i salvesyklusen, har Pertpg-fordelingen blitt satt som standard. Dette ble gjort siden Pertpg-fordelingen er en fordeling som muliggjør tripplestimat, og den muliggjør en høyreskjev sannsynlighetsfordeling.

Videre var det behov for å bestemme de tre parameterne i Pertpg-fordelingen. Siden det ikke var et tilstrekkelig datagrunnlag tilgjengelig, ble dette løst gjennom skalering. I prosjektoppgaven ble det gjennomført et intervju der det ble innhentet tripplestimat på varighetene i salvesyklusen. Med utgangspunkt i dette ble det gjennomsnittlige forholdet mellom P_5 og m , og det gjennomsnittlige forholdet mellom m og P_{95} bestemt. De gjennomsnittlige forholdstallene ble henholdsvis 0,7 og 2,0. For de simuleringene som kjøres

med bakgrunn i beregninger fra vedlegg E, er dermed skalering vist i tabell 3.3 gjort for å få verdier til parameterne i Pertpg-fordelingen.

Tabell 3.3: Skalering av beregnet varighet.

Parameter	Skalering
P_5	Satt til: $P_5 = (0,7 \cdot m)$.
m	Satt til beregnet verdi fra vedlegg E.
P_{95}	Satt til: $P_{95} = (2,0 \cdot m)$.

3.3.8 Gjenbruk av simuleringsmodellen fra prosjektoppgaven

I prosjektoppgaven ble det også utviklet en simuleringsmodell. Erfaringer fra dette arbeidet er tatt med videre til arbeidet med masteroppgaven, men det har hverken blitt gjenbrukt data eller tekst fra prosjektoppgaven.

3.3.9 Evaluering av metoden

Simuleringsstudie som metode har vært krevende, men også lærerik. Ved å ta utgangspunkt i stegene i en simuleringsstudie var det lettere å systematisere prosessen med å gjennomføre en simuleringsstudie. En stor styrke med metoden har vært at den har muliggjort det å kunne eksperimentere med ulike varianter av et tunnelprosjekt, noe som ville vært krevende og veldig kostbart i den virkelige verden. Denne metoden, sammen med EZStrobe, har ikke kostet noe annet enn tid, og i så måte har gevinsten vært stor.

En svakhet med å gjennomføre simuleringer har vært at alle beregninger og lignende skjer i et dataprogram, og har derfor gjort det vanskelig å kunne avdekke feil i simuleringene. Selv om resultatene fra simuleringene stemmer overens med andre modeller, kan det fortsatt ligge større logiske brister skjult som kan komme til syne ved senere anledninger. Grunnet systemets kompleksitet kan det fort være sammenhenger og avhengigheter som er feil eller som mangler.

Programmene EZStrobe og Stroboscope har fungert utmerket til sin hensikt. Dog gjelder dette først når man har programmene på PC-en. Prosessen med nedlasting og installering av de to programmene var relativt lite brukervennlig, noe som øker barrieren for lavterskel og kommersiell bruk. Likevel har programmene gjort jobben, og de har vært sentrale for å besvare forskningsspørsmålene.

3.4 Gjenbruk av materiale fra prosjektoppgaven

Utvalgt materiell fra prosjektoppgaven til forfatterne, «*Vekseldrift i tunnel og tidsplanlegging under usikkerhet i tunnelbygging*», skrevet høsten 2021, er blitt gjenbrukt i denne masteroppgaven.

Som beskrevet i detalj i kapittel 3.1.2 *Gjenbruk av litteraturstudien fra prosjektoppgaven*, er store deler av 2. *Teori* basert på litteraturstudien fra prosjektoppgaven.

Som beskrevet i detalj i kapittel 3.2.2 *Gjenbruk av intervjuene fra prosjektoppgaven*, er ett av fem intervju blitt utført i forbindelse med prosjektoppgaven.

Som beskrevet i kapittel 3.3.8 *Gjenbruk av simuleringsmodellen fra prosjektoppgaven*, har ingenting blitt gjenbrukt fra prosjektoppgaven.

4. Resultat

Dette hovedkapittelet presenterer resultatene fra intervjuene og simuleringene utført i simuleringmodellene.

4.1 Intervju

Intervjuobjektene har ulike tilhørigheter, men alle har tilknytning til tunnel på en eller annen måte. I tabell 4.1 fremkommer hvert intervjuobjekt og vedkommende sin stilling og tilhørighet.

Tabell 4.1: Intervjuobjektene.

Intervjuobjekt	Stilling og tilhørighet
Intervjuobjekt 1	Driftsleder hos en norsk entreprenør.
Intervjuobjekt 2	Styreleder hos en norsk entreprenør.
Intervjuobjekt 3	Prosjektleder hos en norsk entreprenør.
Intervjuobjekt 4	Prosjektleder hos en norsk byggherre
Intervjuobjekt 5	Driftsleder hos en norsk entreprenør.

I det følgende fremstilles spørsmål og sammenskrevne svar fra intervjuene, sortert på tema. Svarene gitt som følge av oppfølgingsspørsmål er innbakt i primærspørsmålene og vises dermed ikke eksplisitt. Eventuelle digresjoner som ikke har direkte verdi og sammenheng med spørsmålet fremkommer ikke her, men foreligger i transkripsjonen. Se vedlegg B for transkriberte intervju.

4.1.1 Kontrakt

Her fremstilles spørsmål og sammenskrevne svar fra intervjuene vedrørende kontrakt.

- *I norske tunnelprosjekter er det vanlig med enhetspriskontrakter, der enhetsprisene er justerbare i tillegg til at det kan suppleres med løst anslåtte mengder. Hvordan opplever du at dette fungerer i praksis?*

Intervjuobjektene har stort sett gode erfaringer med enhetspriskontraktene, men påpeker i tillegg at utviklingen de siste årene har gått i retning av totalentrepriser med regulerbare sikringsmengder.

Intervjuobjekt 2 peker på at man ikke har anledning til å foreta grunnundersøkelser som prøveboring i totalentrepriser, og at dette skaper en forhøyet risiko. Generelt mener vedkommende det er en dårlig risikopolicy og ta risiko på elementer man ikke kan påvirke. Den aktøren som ligger på høyeste nivå i kontraktspyramiden må ta den eventuelle upåvirkbare risikoen, og gjelder både i forholdet mellom byggherre og entreprenør, og mellom entreprenør og underentreprenør. Ved å ta risikoen på høyest mulig nivå, unngås risikopåslag i alle leddene nedover i kontraktspyramiden. Ellers blir det mye kostnader tilknyttet risikopåslag på risiko ingen av aktørene kan påvirke, og medfører ekstrakostnader for vedkommende som finansierer prosjektet.

Intervjuobjekt 4 mener begge kontraktsformene fungerer bra, og legger til at vedkommende sammen med arbeidsgiver har praktisert ekvivalenttidsregnskapet i mange år, for å redusere risikoen for at milepæler og lignende ikke nås. Ekvivalenttidsregnskapet medfører at entreprenøren får tidstillegg for en del aktiviteter som går på boring, injeksjonstid og utført sikring. Da får entreprenøren justert byggetiden som er tilgjengelig basert på faktisk utført mengde.

- ***Hvordan opplever du fordelingen av risiko i disse kontraktene? Er den fordelt på en rimelig måte?***

Det er rimelig bred enighet blant intervjuobjektene om at risikoen er fordelt på en god måte, for både byggherre og entreprenør.

Intervjuobjekt 3 legger dog til at det betinger at entreprenøren faktisk får betalt for medgåtte mengder. Spørsmålet som melder seg, omhandler hva som skjer med tid og økonomiske konsekvenser når man havner utenfor de anslåtte mengdene.

Intervjuobjekt 2 presiserer at det som gjør at risikoen er fordelt rimelig, er at risikoen er forutsigbar. Det er uproblematisk å ta risiko man ikke kan påvirke, så lenge det er klart hvem som skal ta den. Vedkommende er i den forbindelse kritisk til nye kontraktsmodeller der partene ikke forstår kontrakten på den samme måten. Tydelighet i kontrakt og risikobilde er særdeles viktig. På generelt grunnlag er det mye erfaring med dette i hovedentrepriser, og da er forventningene og presedensen for hvordan dette håndteres veldig god.

Intervjuobjekt 4 mener det er opp til entreprenøren å organisere arbeidene slik at vedkommende får nyttiggjort seg av fordelene med et ekvivalenttidssystem. Da får

entreprenøren tillegg i tid for utførte operasjoner, men kompenseres ikke på noen måte for dødtid mellom operasjonene. Entreprenøren må da etterstrebe minst mulig dødtid, eksempelvis ved å legge opp til hensiktsmessig vekseldrift.

- ***Variierende mengder i kontrakten reguleres med «100 %-regelen» og «ekvivalenttidsregnskapet». Hvordan mener du dette fungerer, og er det noen utfordringer i denne forbindelse?***

Intervjuobjekt 2 mener det fungerer godt, så lenge mengdene er faktiske og ikke taktiske. Dersom mengdebeskrivelsen inneholder såpass store mengder at entreprenøren knapt nok har tid til å utføre bare sikringsmengdene innenfor byggefristen, når det i tillegg skal drives tunnel, blir det en umulig situasjon. Derfor bør det også være et ekvivalenttidssystem for driving. Ekvivalenttidsregnskapet er et bra verktøy, men det betinger at det brukes på korrekt måte. Det er flere byggherrer som har jukset med dette, og lagt inn eksempelvis taktisk store mengder sikring og kun benyttet ekvivalenttidsregnskapet på sikringsarbeider slik at summen av ekvivalenttidene relatert til sikringsmengdene i seg selv overskrider byggefristen. Da blir resultatet at det ikke gjenstår tid til selve tunneldrivingen innenfor byggefristen. Byggherren må da beskrive hvor mye av den totale byggetiden som er satt av til de ulike mengdene for at ekvivalenttidsregnskapet skal være brukt på korrekt måte. For eksempel dersom byggetiden er 18 måneder, og byggherren kommuniserer at åtte av disse 18 månedene kan påregnes å gå med til sikring, mens resterende ti måneder kan påregnes å gå med til ren tunneldriving.

Vedkommende legger til at reguleringsformer som dette ikke aksepteres blindt av entreprenøren, da det må kunne forventes at situasjoner med signifikant avvikende grunnforhold hensyntas av byggherren uten at entreprenøren sitter med risikoen. I utgangspunktet er det byggherren som er ansvarlig for grunnforholdene, men i denne forbindelse er den geologiske rapporten og tolkningen av denne viktig. Entreprenøren vurderer blant annet topografi, vegetasjon og vann og kombinerer denne informasjonen med kunnskapen om aktuelle krav, for deretter å gjøre seg opp en mening om potensielt forløp. Er det stor avstand mellom entreprenørens og byggherrens tolkninger, bør dette diskuteres i samråd med byggherren. Feiltolker dog entreprenøren rapporten og rapporten stemmer overens med virkeligheten, tilfaller den aktuelle risikoen entreprenøren.

Intervjuobjekt 3 er kritisk til reguleringsformene, og hevder ekvivalenttidsregnskapet ikke har fungert godt nok. Vedkommende grunngir dette med at ekvivalenttidsregnskapet tradisjonelt

ikke har tatt for seg alle aspekter ved drivingen, der kun sikringsaktiviteter inkluderes i den teoretiske tidsberegningen. Enkelte kontrakter har innehatt mye større mengder enn det som er anslått og rimelig å forvente, men fortsatt vært lagt innenfor den byggetiden som er estimert med bakgrunn i de anslåtte mengdene. Dermed har det ikke vært samsvar mellom mengdene i kontrakten og den estimerte byggetiden. I tillegg må entreprenøren ha fleksibilitet på x antall uker innenfor dette igjen. Selv om entreprenøren blir oppgjort med enhetsprisene og godkjente mengder, har ikke ekvivalenttidsregnskapet fungert etter hensikten med hensyn på faktisk byggetid. Derfor tror vedkommende at ekvivalenttidsregnskapet har vært kimen til mange tvister.

Intervjuobjekt 3 følger opp «100 %-regelen» og hevder den er totalt urimelig, og eksemplifiserer dette med egen erfaring fra et spesifikt prosjekt. I aktuelt prosjekt gikk det et ras på ene stoffen, slik at tunnelen måtte plugges og entreprenøren ble stående på samme stoffen et helt år. Vedkommende spør da hvordan entreprenøren skal forholde seg til enhetsprisene satt på sikring og injeksjon. Skal da enhetsprisene bære alle kostnadene når sprengning uteblir? For at kompensasjonen da skal bli riktig må alle kostnadene prises inn i hver enkelt enhetspris, og det er naturligvis ikke praksis, for da holder ingen anslag hos byggherren i anbudsfasen. I slike ekstremtilfeller blir enhetsprisene ubrukbare, og «100 %-regelen» urimelig.

Intervjuobjekt 4 har gode erfaringer, der det stort sett har vært enighet om at innlagte ekvivalenttider er rimelige, altså at kapasitetene er rettferdige og oppnåelige for entreprenøren. Ved spesielle krav til utførelse av sikring, har vedkommende erfart tilfeller med diskusjoner omkring kapasitetene, men ved standard sikringsmateriell og omfang har det fungert greit.

- ***Hvordan vurderer dere risikoen i tunnelprosjekter, og hvordan forholder dere dere til risikoen?***

Intervjuobjekt 2 og aktuell entreprenør benytter en risikostyringsmodell de har utviklet selv, som anvendes på alle prosjekter fra mangemilliardersklassen ned til forholdsvis små prosjekter. Det viktigste elementet er deres egen, men også kunden, sin organisasjon. I den forbindelse gjøres grundige vurderinger, der det vurderes om de har nok folk og med riktig kompetanse til å håndtere de enkelte prosjektene.

Vedkommende følger opp risikoelementet med at det foretas vurderinger omkring både påvirkbar og upåvirkbar risiko, og tar opp arbeidssikringen som eksempel. Den kan entreprenøren stort sett styre, og derfor er det viktig å ikke ha taktisk prising i den forstand at dersom eventuell kunde inkluderer arbeidssikringen i mengdene, blir dette et incitament for å øke fremdriften. Dette resulterer i enkelte tilfeller i dårligere sikkerhet, og er modeller vedkommende og entreprenør ikke vil ha. Man må kompenseres for kostnadene, både i form av penger og tid. Dersom entreprenøren tar risikoen på injeksjon og sikring, der injeksjon er mer eller mindre én-til-én på timebruk og kompensasjon, mens øvrige sikringsaktiviteter har ekvivalenttider, vil det fortsatt være restrisiko på borbarhet og lignende. Følgelig er ekvivalenttidsmodellene fornuftige og viktige for at entreprenøren skal få nødvendig kompensasjon. I tillegg vil et slikt system gjøre at kunden kan måle entreprenøren på produksjonen, slik at entreprenøren kan følges opp. Da kan tiltak finnes for at entreprenøren skal kunne levere innenfor den tidsrammen vedkommende har forpliktet seg til.

Videre sier intervjuobjekt 2 at mye av risikoen i tunnelprosjekter kan knyttes til geologi og tunnelbyggetid. Selv om kunden i utgangspunktet er ansvarlig for bergets beskaffenhet og kvalitet, er som nevnt store deler av kostnadene tidsavhengige. Dersom det bores med en viss fart per meter, eller dobbel fart per meter, kan begge tilfellene være innenfor det som kan påregnes som relevante bergforhold ut ifra beskrivelsen. Etter hvert som drivingen forløper, vil mer informasjon om forholdene fremskaffes, og justeringer kan foretas underveis.

Intervjuobjekt 3 sier de gjør egne vurderinger av forholdene ved utarbeidelse av fremdriftsplaner og kalkyle. Da utfører de beregninger i «best case», normalsituasjon og «worst case». Byggherren har ansvaret for grunnforholdene, men egne kontraktsvilkår i tillegg til standarden kan forekomme. Her kan det være beskrevet at det må være vesentlige eller markante endringer i grunnforholdene for at aktuell byggherre skal ta risikoen, mens det i standarden kun står at endrede grunnforhold er byggherrens ansvar. Utfordringen for entreprenøren blir da å finne hvor dette nullpunktet for endring blir, og det blir en vesentlig forskjell for entreprenøren om det er standarden eller tillegget om markante endringer som legges til grunn for kontrakten. Entreprenøren må kunne forholde seg til gitte opplysninger og de kartlagte forholdene. I den forbindelse trekker vedkommende frem at grunnlaget for faktadelen i den geologiske rapporten i mange tilfeller kan være begrenset, og ikke nødvendigvis være helt representativ for forholdene i tunnelen.

Intervjuobjekt 4 sier at siden byggherren står ansvarlig for grunnforholdene og tilhørende risiko, brukes mye tid på vurdering av bergkvalitet og løsmasser for å oppnå oversikt over denne risikoen. Deretter forholder byggherren seg til hva de tror er den reelle risikoen, og utarbeider kontrakter som skal ta høyde for eventuelle variasjoner. Kontraktene må i tillegg være korrekte, slik at kart og terreng stemmer overens med virkeligheten. Byggherren kan utarbeide kontrakter som tar høyde for alt, men vedkommende mener det blir feil med hensyn på entreprenøren sin planlegging av ressursbruk, riktig utstyr og lignende. Det tilstrebes fra byggherren sin side å få oversikt over risikoen og at den stemmer overens med det de forventer etter hvert som tunnelen drives.

- ***Hvordan opplever du at konfliktnivået er i tunnel-/anleggsbransjen i dag, med utgangspunkt i tunnelbyggetid?***

Intervjuobjekt 2 opplever det har vært en bedring i konfliktnivået, og relaterer dette hovedsakelig til kundene, og policyen kundene har i forbindelse med holdninger og kompetanse. Kompetente kunder medfører stort sett et bedre samarbeidsmiljø. I tillegg har komprimert byggetid i samferdselsprosjekter vært en årsak til turbulens. Det blir tatt mange dårlige beslutninger basert på at tid er penger, men tiden er ikke så mye verdt at man kan tillate seg å ta dårlige beslutninger.

Intervjuobjekt 3 mener det er mye bra på gang i bransjen, og peker på samhandling og tidligere involvering av entreprenør som faktorer. I løpet av de siste årene har nye former for involvering i tidlig fase blitt introdusert, og har vært en positiv utvikling. Vedkommende mener denne måten å arbeide på reduserer konfliktnivået betydelig. Tradisjonelt er det kun pris som har vært utvelgelseskriteriet, mens det nå spiller inn andre forhold som gjennomføringsevne, kvalitet, HMS, ledelse og organisasjon. Totalt sett tror vedkommende dette reduserer konfliktnivået.

Intervjuobjekt 4 har ikke vært ute for store konflikter mellom byggherre og entreprenør i forbindelse med rene tunnelarbeider på mange år. Vedkommende tror generelt det er unødvendig at konflikten eskalerer til det punktet at de havner i retten. Aktuelle uenigheter kunne kanskje vært løst på tidligere stadier.

Videre tror Intervjuobjekt 4 at uoverensstemmelse mellom kart og terreng er en av grunnene til at konflikter mellom entreprenør og byggherre oppstår. Et annet element er at entreprenører som ikke planlegger godt nok, samt sliter med gjennomføring, konstruerer

konflikter og henger problemene på grunnforholdene som er byggherren sitt ansvar. Følgelig må man ha en kontrakt som omhandler det arbeidet som faktisk skal utføres, og at det er en gjensidig forståelse for dette. I den forbindelse er det viktig med god dialog underveis og å følge opp hvordan prosjektet forløper seg. Er kontrakten feil, eller at byggherren ser at entreprenøren utfører arbeidet uhensiktsmessig, må man ha åpen dialog om dette fra starten, og begge parter må bidra til løsning.

4.1.2 Vekseldrift

Her fremstilles spørsmål og sammenskrevne svar fra intervjuene vedrørende vekseldrift.

- *Hvordan vil du definere vekseldrift i konvensjonell tunneldriving?*

Alle intervjuobjektene er samlet i synet om at vekseldrift er vekselvis drift på to stuffer, der intervjuobjekt 3 legger til at det kan dreie seg om to eller flere stuffer.

Vekseldrift defineres av intervjuobjekt 1 som en driftsform der det ikke bemannes opp på begge stoffene det skal drives på. Det bores og skytes salve på en stoff, mens det ifølge intervjuobjekt 3 foregår andre aktiviteter som sikring eller utlasting på den andre stoffen, før enten kun mannskap eller både mannskap og utstyr flyttes over og bytter stoff. Da oppnås en drift uten stopp, altså drift uten ventetid. Intervjuobjekt 4 legger vekt på viktigheten av høy utnyttelse av maskinparken for å forhindre at denne potensielle ventetiden på ressursene oppstår.

Intervjuobjekt 2 forenkler vekseldrift til å dreie seg om at man har en alternativ stoff å drive på. Etter skyting på den ene stoffen sendes enten kun mannskapet eller både mannskapet og utstyret over til den alternative stoffen. Avstanden vil være en begrensende faktor, og vil bestemme hvor mye av ressursene man får flyttet. I enkelte tilfeller kan det i den forbindelse være mer hensiktsmessig å flytte kun folkene, da flytting av boreriggen er det tregeste alternativet. Derfor er det ofte dobbelt opp av boreriggen. En løsning er også å drive veksel på enkelte av aktivitetene, men ikke alle.

Vedkommende legger til kostnadselementet i vurderingen om det lønner seg med to borerigger kontra oppbemanning. Dette vil avhenge av flere forhold, blant annet transporten av borerigg fra stoff til stoff og hvor omstendelig denne transporten blir. Dersom boreriggen må fraktes på offentlig veg for å transporteres til neste stoff, burde driftsopplegget heller vært

designet på en måte som muliggjør mer kontinuerlig utnyttelse av det samme utstyret og det samme mannskapet, sett bort fra boreriggen. Selv om boreriggen har en stor kostnad i seg selv, vil denne kostnaden bli liten totalt sett, dersom man sammenligner med nødvendig tilleggsutstyr som pigmaskin og bakstuffedbiler, samt ekstra mannskap.

Muligheten for vekseldrift identifiseres på et tidlig stadium av kunden, samt av konkurrerende entreprenører. Følgelig blir jobben for den enkelte entreprenør å arbeide med optimalisering av vekseldrift og øvrig opplegg, eksempelvis med hensyn på lastenisjer og deponi. Når alle elementene er identifisert og vurdert, settes konseptet opp ut ifra dette.

- ***Hvilke varianter finnes det av vekseldrift?***

Det er bred konsensus om at vekseldrift kan variere stort, der størrelse på både utstyrspakke og mannskap velges basert på behov.

Intervjuobjekt 2 presiserer at vekseldriften bør designes på en måte som medfører mest mulig kontinuerlig utnyttelse av mannskap og utstyr.

Intervjuobjekt 1 mener det særlig er utstyrspakken som kan settes sammen etter behov.

Eksempelvis kan det være to borerigger der mannskapet flyttes mellom, mens det kan være tilstrekkelig med én hjulmaskin til pigging da denne lettere kan kjøres mellom stuffene.

Valget munner i stor grad ut i hvilket utstyr det ønskes mer av, men uansett kreves det en viss bemanning for å betjene et visst sett utstyr.

Intervjuobjekt 3 sier at vekseldriften vurderes med hensyn på hvordan stuffene er plassert, og trekker inn følgende muligheter for hvordan stuffene er plassert: ved siden av hverandre i hver sin tunnel som går parallelt; i samme løp dersom det benyttes tverrslag for å oppnå flere stuffer lenger inn i hovedtunnelen(e); eller eventuelt i to helt forskjellige tunneler hvis det kun er en liten dagsone mellom.

Intervjuobjekt 4 sier at graden av vekseldrift varierer med flere forhold og hvor mange aktiviteter som skal inn i salvesyklusen, men særlig vil injeksjon spille inn. Ved systematisk injeksjon legges en ekstra aktivitet til salvesyklusen og driftsopplegget blir et helt annet i forhold til situasjonen uten systematisk injeksjon. Behovsprøvd injeksjon medfører en rotete vekseldrift.

- ***Hva mener du må være på plass for å sikre rasjonell vekseldrift, med hensyn på fremdrift og kostnader?***

Viktige aspekter som trekkes frem er: planlegging; utstyr; tilrettelegging av infrastruktur som vann, strøm og ventilasjon; arbeidstider; og transportavstand av utstyr.

Uavhengig av om det drives veksel- eller regulær enstuffsdrift, trekkes planleggingen frem som det viktigste punktet av intervjuobjekt 1. Dersom den ene stuffen blir stående å vente grunnet uferdige aktiviteter på den alternative stuffen, stopper hele systemet opp.

Intervjuobjekt 3 trekker frem viktigheten av tilstrekkelig ventilasjon, strøm og vann, samt utstyr. Størrelsen på utstyrspakken avhenger av hvor mye utstyr det ønskes eller er behov for. Vanligvis er det tilstrekkelig med ett sett utstyr, men ved særskilte tilfeller som systematisk forinjeksjon kan det blant annet være aktuelt med en ekstra borerigg som går fast på injeksjonsboring og injisering. I likhet med intervjuobjekt 1, legger vedkommende i denne forbindelse vekt på at det må være et godt apparat rundt reparasjon og vedlikehold. Utstyret slites hardt når det ikke er pauser mellom salvene, og må til enhver tid være i god stand.

Intervjuobjekt 4 følger opp utstyrsaspektet med at utstyrstype, utstyrsmengde og mannskap avhenger av operasjonene som utføres og tilpasses situasjonen slik at det aldri er stillstand i salvesyklusen. Organiseringen er i den forbindelse viktig. Vedkommende trekker i tillegg frem arbeidstider som en begrensende faktor, i form av eksempelvis skytetider, begrensninger omkring tider til massetransport og arbeidstid til hver enkelt person. Slike begrensninger vil kunne vanskeliggjøre rasjonell og god drift uansett hvilken driftsform som benyttes, og det er følgelig viktig å planlegge godt med gjeldende begrensninger. Likevel sier vedkommende at vekseldrift vil kunne medføre ekstra fleksibilitet i tilfeller hvor begrensninger av denne typen er til stede.

Intervjuobjekt 2 understreker at avstanden mellom stuffene, altså transporttiden av utstyr fra stuff til stuff, er avgjørende for rasjonell vekseldrift.

- ***Hvilke forberedelser gjøres i prosjekter med vekseldrift? Hvilke vurderinger gjør dere som entreprenør/byggherre?***

Intervjuobjekt 1 og 3, som representerer hver sin entreprenør, legger vekt på rigg. Herunder: et godt apparat for service av maskiner og utstyr; infrastruktur som vann, strøm og ventilasjon; og lager. Intervjuobjekt 3 trekker i tillegg frem at ressursene får et større press,

både på støttefunksjoner i funksjonærstaben og fagarbeidere i tunnelen. Følgelig bør det bemannes noe opp, eksempelvis med et par ekstra arbeidere per skift.

Byggherrerepresentanten, intervjuobjekt 4, trekker frem vekseldrift som et verktøy for å forkorte byggetiden, og at det dermed er ønskelig å benytte vekseldrift så mye som mulig. Vedkommende mener at totalsummen går ned ved å ha kortest mulig byggetid, slik at etterarbeider kan påbegynnes så snart som mulig. I den forbindelse legges det opp til flere angrepspunkter som muliggjør vekseldrift. Flere angrepspunkter oppnås eksempelvis ved bruk av tverrslag.

- ***Hva mener du har størst innvirkning på vekseldriftsfaktoren? Hvordan håndteres dette i prosjektene?***

Det er bred enighet blant intervjuobjektene om at sikringsmengder, og særlig forinjeksjon, vil påvirke vekseldriftsfaktoren.

Intervjuobjekt 1 sier at problemene oppstår når det blir skjevfordeling mellom stoffene, slik at den ene stoffen blir stående på vent. Dette kan eksempelvis skje dersom det er forbolting på den ene stoffen og boreriggen heftes her, mens den alternative stoffen blir stående. Skjer dette gjentagende, vil vekseldriftsfaktoren kunne økes betydelig. Når denne skjevfordelingen først har oppstått er løsningen å dele opp mannskapet for å kompensere for skjevfordelingen. Dette kan dog ikke gjøres på fast basis, da det medfører ekstra slitasje på mannskapet. Er det fare for at skjevfordeling oppstår ofte er det nødvendig å ta grep, som oppbemanning eller anskaffelse av mer utstyr.

Intervjuobjekt 3 mener geologi, sikring og injeksjon potensielt kan ødelegge hele opplegget med vekseldrift, da effekten av vekseldrift reduseres dersom mesteparten av tiden brukes i forbindelse med dette. Vedkommende tar også opp skjevfordelingen som en faktor. Den beskrevne sikringen og injeksjonen må utføres, men det er aktuelt å øke ressursene for å forhindre at stoffene blir avhengige av hverandre. Da kan det drives videre på den stoffen som står ledig.

Intervjuobjekt 2 vektlegger avstanden mellom stoffene, og dermed transporttiden fra stoff til stoff. Sikringsmengden vil også ha betydning, men forinjeksjonen blir helt avgjørende dersom tetthetskravene er strenge. Sikringen kan deles inn i arbeidssikring og permanentsikring, mens det vedrørende injeksjon deles inn i forinjeksjon og etterinjeksjon.

Vedkommende hevder at etterinjeksjon er uhensiktsmessig og fungerer dårlig i praksis, da det risikeres at vannet kommer igjen på andre steder i tunnelen. Ved bruk av full utstøpning oppnås større kontroll på vannet, men i råsprengte tunneler med tradisjonell norsk sikring i form av bolter og sprøytebetong bør det injiseres foran stoffen slik at det er noe å pumpe mot. Ved strenge tetthetskrav vil da ofte tiden som medgår til forinjeksjonsskjermene styre drivingen.

I forlengelsen av aspektet med forinjeksjon, mener intervjuobjekt 2 at det muligens ikke har betydning om det er vekseldrift eller regulær enstuffsdrift. Ved mye boring vil behovet for borerigger være større, eksempelvis ved store tverrsnitt og lange injeksjonsskjermer, der en injeksjonsskjerm kan ta opp mot et døgn og den andre stoffen blir stående på vent. Da bør det etterstrebes å oppfylle kriteriet om å ha en større andel av de kostnadsbærende elementene i aktivitet og ikke på vent. Tidene til de kostnadsbærende elementene kan summeres opp, og deretter kan det vurderes om det er nødvendig med ekstra ressurser, som en ekstra borerigg eller annet utstyr.

Videre mener intervjuobjekt 2 at det med hensyn på bergets beskaffenhet, vil være usikkerhet tilknyttet tidsbruk på eksempelvis injeksjonsskjermer og øvrig sikring før neste salve kan påbegynnes. Graden av vekseldrift kan uansett varieres ut fra behovet, fra ren vekseldrift med en enkel utstyrspakke, opp til tostuffsdrift med dobbel utstyrspakke. Særlig i samferdselstunneler for veg og bane vil det i den forbindelse være uheldig å operere med et veldig flytende driftsopplegg, der det er helt andre tetthetskrav enn i råsprengte vanntunneler. I råsprengte vanntunneler kan det tillates et mer flytende opplegg med sjablongregler der man vurderer avstanden mellom stoffene fortløpende. I slike tilfeller kan det drives veksel i starten, før avstanden mellom stoffene blir såpass stor at vekseldrift blir uhensiktsmessig, og det skiftes til regulær enstuffsdrift.

Følgelig sier intervjuobjekt 2 at vekseldrift bør designes og tilpasses fortløpende, slik at en i utgangspunktet god løsning ikke blir dårlig med tiden og går utover hele prosjektet. Tidsavhengige kostnader er fort opp på mellom 60 og 70 % for mange av aktivitetene i salvesyklusen, og da er det viktig at det produseres mens utstyr og mannskap først er til stede. Risikovurderinger bør utføres og mulighetene for hvordan situasjonen kan løses bør utredes og være klart, dersom opprinnelig driftsopplegg ikke fungerer.

Intervjuobjekt 4 vektlegger den store variasjonen injeksjonsarbeidene kan ha i tidsbruk, og som vil påvirke salvesyklusen og vekseldriften, i tillegg til økte sikringsmengder.

Vedkommende vurderer også tunnallengden som en faktor. I korte tunneler er det tunnallengden som påvirker vekseldriftfaktoren mest, mens det i lengre tunneler vil være injeksjon. Dette skiller seg fra intervjuobjekt 1, som har erfart at tunnallengden har liten betydning. Utlasting kan ifølge intervjuobjekt 4 effektiviseres med omlastestasjoner slik at resterende arbeider ikke avhenger av utlastingen, og dermed ikke påvirke vekseldriftfaktoren.

- ***Hvilke erfaringer har du med vekseldrift?***

Alle intervjuobjektene har erfaring med vekseldrift på en eller annen måte.

Intervjuobjekt 1 har blant annet erfaring med en form for vekseldrift der det var dobbelt sett borerigger, men vanlig bemanning. Mannskapet ble da flyttet fra stuff til stuff ved behov. Dette medfører ekstrakostnader på utstyr, men besparelser på kostnader knyttet til bemanning. Slike driftsløsninger krever god kontroll på fremdriftsplanen, siden det er mindre spillerom på tiden.

Vedkommende har også vært på et større tunnelprosjekt der det på det meste var 21 stuffer fordelt på fire borerigger. Her ble det kjørt vekseldrift på flere stuffer samtidig, og grunnet store variasjoner på injeksjon i prosjektet var det ikke et fast system på hvilken borerigg som skulle til hvilken stuff. Boreriggene ble sendt til den første stufferen som ble ledig.

Intervjuobjekt 2 har både regnet på og gjennomført prosjekter med vekseldrift som leder. Ved regning på slike prosjekter bedrives ressurskalkulasjon, med utgangspunkt i entreprenørens egne erfaringstall. Kalkylen settes opp ved hjelp av erfaringstall på eksempelvis hvor lang tid det tar å bore, hvor mange lastebiler som kreves, hvor stor lastekapasitet hjullasteren har og så videre. Deretter sammenlignes kalkylen med kundens fremdriftsplan. Er det ikke overensstemmelse må det undersøkes om det er noe entreprenøren har misforstått, noe kunden har misforstått eller noe begge har misforstått.

Intervjuobjekt 3 har det meste av vekseldrifterfaringen fra toløpstunneler. Vekseldriften løses der ved at enkelte av tverrforbindelsene mellom tunnellopene gjøres kjørbare for utstyr. Da transporteres utstyret fra stuff til stuff via tverrforbindelsene. I vanlige vegtunneler dimensjonert for en viss trafikk, vil det være 250 meter mellom tverrforbindelsene, der vanligvis annenhver tverrforbindelse gjøres kjørbare for utstyr, altså hver 500 meter. Tverrforbindelsene har typisk et tverrsnitt på omtrent T4,5, og for å kunne transportere det store og tunge utstyret må dette utvides til omtrent T8,5. Med annenhver tverrforbindelse

kjørbar, blir maksimal transportavstand på utstyret 1 000 meter. Ved høyere frekvens på hvilke tverrforbindelser man utvider til et tverrsnitt som muliggjør transport, blir kostnadene større i forbindelse med tetting til slutt, da tverrforbindelsene kun skal ha en dør for gangtrafikk. Transporttiden til utstyret er ikke så lang at det er økonomisk forsvarlig at hver tverrforbindelse gjøres kjørbare. Derfor er det vanlig å gjøre maksimalt hver andre tverrforbindelse kjørbare, men det kan også være aktuelt å begrense kjørbare tverrslag til hvert tredje. Det vil si hver 750 meter, og maksimal transportavstand 1 500 meter.

Intervjuobjekt 4 har vært med på vekseldrift i alle prosjekter så lenge vedkommende har hatt aktuell byggherre som arbeidsgiver. De forsøker å legge opp til vekseldrift så mye som mulig.

- ***Når er vekseldrift hensiktsmessig, når er det ikke hensiktsmessig og hvilke fordeler kan oppnås med vekseldrift kontra regulær enstuffsdrift?***

Intervjuobjekt 1 mener vekseldrift er hensiktsmessig så lenge det er mulig med tverrslag eller andre tilkomsttunneler til hovedtunnelen, slik at det kan drives begge veger. I lange tunneler med driving kun på hver side, vil ikke vekseldrift tjene til hensikten. Videre vektlegger vedkommende det økonomiske aspektet i forbindelse med ressursutnyttelsen som oppnås med vekseldrift. Kostnadene kan kuttes betraktelig med hensyn på bemanning og leie av utstyr, og trekkes frem som den største fordel med vekseldrift. Det kan drives med en mindre utstyrspakke og et mindre mannskap. Med de korte fristene som er i det norske markedet, er det nødvendig å ha full drift til enhver tid, så lenge det er mulig. Her kommer vedkommende med skytetider som en begrensende faktor. Dersom det ikke kan skytes etter et visst tidspunkt, er det uhensiktsmessig med eksempelvis to fulle skift gående på natt.

Intervjuobjekt 4 viser til at byggetiden kan forkortes som en fordel, og legger til at vekseldrift alltid vil være hensiktsmessig, så lenge topografien tillater tverrslag med passelig lengde. Må det drives lange tverrslag for å muliggjøre vekseldrift vil gevinsten avta betydelig, og det kan heller være gunstig å drive fra hver side av tunnelen. Følgelig vil det være et skjæringspunkt mellom tverrslaglengde og tunnellengde for utnyttelse av potensiell vekseldrift.

Intervjuobjekt 3 peker på at ressursutnyttelsen blir bedre med vekseldrift, og at fremdriften øker. I toløpstunneler relaterer vedkommende denne fremdriftsmessige gevinsten også til etterarbeider i tunnelen, i tillegg til selve drivingen. Etterarbeidene kan starte opp, og masse- og utstyrstransport kan dirigeres ut via tverrforbindelsene mellom hovedløpene forbi

etterarbeidene mens det drives veksel på de to stuffene. Dette kan forkorte byggetiden betraktelig, gitt at kvaliteten på resultatet av etterarbeidene ikke forringes av dette opplegget.

- ***Kreves det mer av dere som entreprenør/byggherre ved vekseldrift enn i prosjekter med vanlig enstuffsdrift?***

Intervjuobjekt 1 sier vekseldrift krever mer av mannskapet, særlig arbeidsledere, driftsledere og baser. Disse må i større grad være «på hugget» og ha oversikt og kontroll på den stuffen det ikke er salveboring på, slik at alt er klart når det veksles. Driften avhenger av at alt fungerer for at driften ikke skal stoppe opp, men samtidig vil det være venting på noe av utstyret når det ventes på at neste stuff blir klar for salve. Denne ekstra tiden kan utnyttes til service og vedlikehold av det aktuelle utstyret som venter. Intervjuobjekt 3 istemmer dette, da det kreves mer planlegging og flere folk. I tillegg legger vedkommende til HMS-aspektet, ved at det er mer som skjer, og at det følgelig må tas ekstra hensyn for at uønskede hendelser ikke skal oppstå.

Intervjuobjekt 4 sier at det ikke kreves noe mer av byggherreorganisasjonen, annet enn at det kan bli noe mer hektisk å følge opp prosjekter med vekseldrift. Det er de samme systemene som er virksomme omkring prosjektene uansett hvilke driftsformer som er aktuelle.

4.1.3 Salvesyklus

Her fremstilles spørsmål og sammenskrevne svar fra intervjuene vedrørende salvesyklus.

- ***Vi har satt opp salvesyklusen på følgende måte***
 - 1. forinjeksjon (ikke alltid)***
 - 2. boring***
 - 3. lading***
 - 4. sprengning***
 - 5. ventilering***
 - 6. utlasting (lasting og transport)***
 - 7. rensk***
 - 8. sikring***

Er dette en fornuftig inndeling ved tidsstudier?

Tilbakemeldingene fra intervjuobjektene viser at dette er vanlig praksis i norsk målestokk.

Intervjuobjekt 3 påpeker at dersom det ikke er systematisk injeksjon, vil det foregå sonderboring for å kartlegge eventuell innlekkasje. Dersom det er innlekkasjer utføres det forinjeksjon. Vedkommende sier også at bolting er det første som skjer før ny salveboring påbegynner, men at det da avhenger av hvor man kommer inn i salvesyklusen om man setter opp bolting først eller sist. Ofte vil det ved vekseldrift stort sett være ferdigsprøytet når boreriggen kjøres på stuff, og deretter blir det systematisk bolting på sprøytebetongen. Videre legger vedkommende til at man i de fleste tilfeller er avhengig av at boreriggen er tilgjengelig under lading, slik at man kan stikke opp igjen borehull.

Vedkommende anslår også realistisk varighet, m, til aktivitetene i salvesyklusen gitt T9,5, se tabell 4.2. Videre anslås vanlig syklustid på salvesyklusen på T9,5 og T10,5 til å være 6-8 timer, eksklusive forinjeksjon.

Tabell 4.2: Intervjuobjekt 3 – anslag på realistisk varighet til aktiviteter i salvesyklusen.

Aktivitet	m
Forinjeksjon [min]	660
Boring [min]	90
Lading [min]	60
Ventilering [min]	15
Sprengning [min]	0,05
Utlasting [min]	70
Rensk (maskinell) [min]	60
Sikring [min]	60

Intervjuobjekt 4 presiserer at det er hensiktsmessig å dele opp forinjeksjon i skjermboring og injisering, da disse aktivitetene kan variere uavhengig. I veldig dårlig berg kan tiden på skjermboring øke, men muligens ikke tiden til injisering. Motsatt kan borbarheten være god, men vanninntrengningen medfører vanskeligheter med å få injisert og tettet skikkelig. Sistnevnte varierer også med tetthetskrav. Øvrige aktiviteter går x antall ganger før neste forinjeksjon, der det vanlige er tre salver mellom hver skjerm. 24 meter lange injeksjonshull har plass til tre salver før det er én salve, pluss litt ekstra, som overlapp til neste skjerm. Dette vil også avhenge av tetthetskrav. Ved mindre strenge tetthetskrav kan skjermene strekkes lenger, mens det med veldig strenge krav kan utføres skjerm på hver salve. Etter

sikring/sprøytebetong i salvesyklusen, er det hensiktsmessig med sonderboring for å kontrollere.

Intervjuobjekt 5 anslår P₅, m og P₉₅ for de ulike aktivitetene gitt T10,5 tverrsnitt, se tabell 4.3.

Tabell 4.3: Intervjuobjekt 5 – anslag på varigheter til aktivitetene i salvesyklusen.

Aktivitet	P₅	m	P₉₅
Forinjeksjon [min]	1 200	1 500	2 880
Boring [min]	90	120	360
Lading [min]	60	90	180
Sprengning [min]	-	0,1	-
Ventilering [min]	10	20	30
Utlasting [min]	75	90	120
Rensk [min]	60	90	180
Sikring – sprøytebetong [min]	-	60	-
Sikring – bolting [min]	60	90	210

- ***Er aktivitetene etterfølgende, er det overlapp mellom aktiviteter, eller er noen aktiviteter eventuelt parallelle? Varierer dette?***

Stort sett vil aktivitetene i salvesyklusen være etterfølgende.

Intervjuobjekt 1 sier det i enkelte tilfeller lades mens salveboring pågår, men foregår kun dersom tverrsnittet er stort nok til at det er forsvarlig.

Intervjuobjekt 3 sier at salveboring og boring og montering av bolt foregår samtidig, utenom i prosjekter hos enkelte byggherrer, der man ikke får bevege seg foran bomfestene ved boring, bortsett fra ved skjermboring for forinjeksjon. Regelen er da hos disse byggherrene at boreriggen må være avslått ved boltmontering. I tillegg er det vanlig med overlapp mellom ventilasjonspausen og utlasting. Dette er en konsekvens av at emulsjonssprengstoffet som brukes i dag produserer mindre farlige avgasser enn dynamitt og ANFO som ble benyttet før.

Intervjuobjekt 4 legger til at det i tilfeller med god bergkvalitet kan være aktuelt å skyte en ny salve rett etter rensk, slik at det ikke sikres før to salver er skutt. Dette avhenger dog av både bergkvalitet og tverrsnitt. Større tverrsnitt med større spenn og høyde krever mer sikring. Det er ikke alltid denne løsningen lønner seg heller, dersom det må sprøytes betong over lengre avstander, som tar ekstra tid.

- *Vil disse hovedaktivitetene i salvesyklusen være de kritiske aktivitetene med tanke på tidsbruk, eller kan andre mindre aktiviteter være styrende?*

Hovedsakelig er det de oppsatte aktivitetene som styrer alt.

Intervjuobjekt 1 har erfart hvor mye injeksjon kan spille inn på tidsbruken, særlig med hensyn på lekkasjekrav. I et prosjekt med systematisk forinjeksjon vedkommende har tatt del i, gikk vedkommende og entreprenør fra å bore og pumpe én injeksjonsskjerm før de fikk drive videre, til at de måtte pumpe to til tre skjermene før de fikk drive videre. Da gikk tidsbruken opp fra rundt ett døgn til fire døgn til forinjeksjon før neste salve kunne påbegynnes.

Intervjuobjekt 4 legger til at andre faktorer som arbeidstider kan påvirke i tillegg.

Eksempelvis begrensninger som legger føringer for om det kan kjøres ut masser på nattestid eller om det er tillatt med mellomlagring.

4.2 Simuleringsmodellene

Simuleringsmodellene *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* og *Simuleringsmodell – Vekseldrift* med det tilhørende rammeverket *Rammeverk – Vekseldriftfaktor* er i stor grad denne masteroppgaven sitt hovedresultat. Ved å benytte seg av dette har man mulighet til å simulere utallige reelle og konseptuelle tunnelprosjekter, og videre bestemme vekseldriftfaktoren for de aktuelle prosjektene. Ellers fungerer modellene også som et utgangspunkt for videre utvikling, der mer spesielle, reelle eller konseptuelle tunnelprosjekter kan simuleres.

Det er disse modellene som har muliggjort neste del av resultatet, nemlig det å analysere endringer i betingelser sin påvirkning på vekseldriftfaktoren.

Simuleringsmodell – Enstuffsdrift kan ses i vedlegg C, *Simuleringsmodell – Vekseldrift* kan ses i vedlegg D og *Rammeverk – Vekseldriftfaktor* kan ses i figur 3.20.

Som nevnt, må man laste ned Stroboscope og EZStrobe fra EZStrobe (2022) sin nettside for å kunne kjøre simuleringsmodellene. I fanen til venstre på denne nettsiden velger man *Stroboscope* og deretter *Installation*, og der ligger det en detaljert installeringsguide. For å kjøre EZStrobe kreves også Microsoft Visio, som må installeres separat. Microsoft Visio installeres på samme måte som alle andre Office-program, fra Microsoft Visio (2022) sin nettside.

Når disse programmene er installert kan *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* åpnes fra vedlegg C, og *Simuleringsmodell – Vekseldrift* kan åpnes fra vedlegg D. I disse vedleggene vil varigheter for standardtilfellet være lagt inn, og simuleringsmodellene kan kjøres ved å høyreklikke hvor som helst utenfor modellen, og deretter velge *Run Simulation*. Ønsker man å eksempelvis endre antall simuleringer kan dette gjøres ved å høyreklikke på samme måte, og velge *Edit model parameters*. Ønsker man å endre varigheten til en aktivitet dobbeltklikker man på aktiviteten, og legger inn en ny varighet under *Duration*. Her kan det også tilordnes sannsynlighetsfordelinger til varigheten ved å klikke på boksen til høyre for fritekst-feltet. Ellers kan øvrige endringer, slik som å endre antallet ressurser for en gitt ressurs, tunnallengden eller behovet for forinjeksjon, utføres ved å dobbeltklikke på det man ønsker å endre.

4.3 Vekseldriftfaktorer

Simuleringsmodell – Enstuffsdrift og *Simuleringsmodell – Vekseldrift* kombinert med *Rammeverk – Vekseldriftfaktor*, gir mulighet for beregning av vekseldriftfaktorer. Videre vil det presenteres resultater der simuleringsmodellene og rammeverket benyttes for beregning av vekseldriftfaktorer for ulike prosjektspesifikke forhold. Varighetene til de ulike aktivitetene i salvesyklusen for de ulike forholdene er beregnet ved hjelp av vedlegg E, og disse varighetene mates så manuelt inn i simuleringsmodellene. Beregningene av varighetene legger til grunn teorien om driving og sikring fra kapittel 2.3.4 *Enhetstider for rigg, boring, lading, ventilasjon, rensk og utlasting*, samt kapittel 2.3.5 *Enhetstider for sikring*.

Et standardtilfelle av et tunnelprosjekt er blitt utviklet for å ha et referansegrunnlag for simuleringene. Parametere som inngår presenteres i tabell 4.4, samt i figur 4.1. Beskrevne parametere tilordnes de aktivitetene hvor de er nødvendige for at beregning av varigheter skal kunne utføres. Enkelte parametere fremkommer derfor flere steder. Det forutsettes dårlige lasteforhold, da det teoretiske grunnlaget er hentet fra dagbruddsdrift, og det antas dårligere forhold i en tunnel enn i et dagbrudd.

Tabell 4.4: Forutsetningene i standardtilfellet.

Aktivitet	Parameter	Valgt forutsetning
Boring	Tverrsnitt [m ²]	74,6
	DRI	49
	Sprengbarhet	Middels
	Slitasje	Middels
	Antall grovhull [stk]	4
	Antall ladde hull [stk]	109
	Antall borhammere [stk]	3
	Bormaskin	COP 1800-serien
	Borhulldiameter grovhull [mm]	102
	Borhulldiameter ladde hull [mm]	48
	Boret lengde [cm]	550
	Antall operatører [stk]	1
Lading	Sprengstofftype	Emulsjon
	Antall ladde hull [stk]	109
Ventilasjon	Tverrsnitt [m ²]	74,6
Lasting per bil	Lastekapasitet per bil [m ²]	15
	Lastemaskin	Hjullaster
	Skuffestørrelse [m ²]	7
	Lastemaskinvekt [tonn]	50
	Lasteforhold	Dårlige
	Omregningsfaktor masser [-]	1,60
Rensk	Sprengbarhet	Middels
	Rigg	Egen rigg til rensk
	Boret lengde [cm]	550
Bolting	Boltelengde [m]	3
	Boltemønster [c/c m]	2
	Tidspunkt for boltemontering	Etter bolteboring
	Inndrift [m]	5
	Buelengde vederlag til vederlag [m]	14,97
	Tidsbestemmende faktor [-]	1
Sprøytebetong	Inndrift / sprøytet lengde [m]	5
	Tidspunkt for sprøyting	Etter hver salve, og i ordinær skifttid
	Sprøytebetongtykkelse [cm]	8
	Buelengde [m]	22,13
	Tidsbestemmende faktor [-]	1

Tabell 4.4 – Fortsettelse fra forrige side.

Aktivitet	Parameter	Valgt forutsetning
Sonderboring	Antall sonderhull per gang [stk]	3
	Overlapp mellom hull [m]	10
	Lengde sonderhull [m]	30
	Antall bormaskiner [stk]	1
Injeksjon	Antall pumpelinjer [stk]	2
	Antall bormaskiner [stk]	2
	Antatt mengde tørrsement [kg/lm]	580
	Pumpekapasitet [kg/t]	310

Figur 4.1 er et skjermbilde fra *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* som presenterer parameterne i simuleringsmodellen ved standardtilfellet.

nTunnellengde	Tunnellengde løp 1 [m]	4000
nForinjeksjon	Tunnellengde med forinjeksjon [m]	4000
nInndrift	Inndrift per salve [m]	5
DistTverrslag	Avstand mellom kjørbare tverrslag [m]	500
nBorerigg	Antall borerigger [stk]	1
vBorerigg	Gjennomsnittlig kjørehastighet borerigg [km/t]	10
nLaster	Antall lastere [stk]	1
nLastebil	Antall lastebiler [stk]	8
vLastebilVeg	Gjennomsnittlig kjørehastighet lastebil på veg [km/t]	60
vLastebilTunnel	Gjennomsnittlig kjørehastighet lastebil i tunnel [km/t]	15
DistDeponi	Avstand fra påhugg til deponi [m]	500
LoseKubikk	Løse kubikk per salve [m ³]	600
Kapasitet	Kapasitet på lastebil [m ³]	15

Figur 4.1: Standardtilfellet i simuleringsmodellene.

4.3.1 Deterministisk versus stokastisk

I første omgang beregnes byggetider i simuleringsmodellene basert på standardtilfellet i tabell 4.4 og figur 4.1, med både deterministiske og stokastiske verdier. Dette gjøres for å vurdere om, og eventuelt hvordan, usikkerhet i varighetene til aktivitetene påvirker vekseldriftfaktoren.

De stokastiske verdiene er de samme som for de deterministiske verdiene, bare at det benyttes en Pertpg-fordeling ved hjelp av en skalering som beskrevet i 3.3.7 *Design av eksperimentene*. Dette presenteres i tabell 4.5. Vanligvis presenteres verdiene i Pertpg-

fordelingen som $Pertpg[P_5, m, P_{95}]$, men for å øke lesbarheten i tabellen når det skal benyttes desimaltall på varighetene vil det presenteres som $Pertpg[P_5 | m | P_{95}]$. Varighet til aktiviteten *Rigg*, beskrevet i teorien og i beregningene i vedlegg E, legges til varigheten til salveboring.

Tabell 4.5: Deterministiske versus stokastiske varigheter.

Aktivitet	Deterministisk	Stokastisk
Sonderboring [min]	132,3	Pertpg[92,6 132,3 264,6]
Forinjeksjon [min]	1 554,0	Pertpg[1 087,8 1 554,0 3 108,0]
Bolting [min]	69,0	Pertpg[48,3 69,0 138,0]
Salveboring [min]	169,9	Pertpg[118,9 169,9 339,8]
Lading [min]	52,5	Pertpg[36,8 52,5 105,0]
Sprengning [min]	0,1	0,1
Ventilasjon [min]	15,0	Pertpg[10,5 15,0 30,0]
Lasting (lastetid per bil) [min]	2,5	Pertpg[1,7 2,5 5,0]
Tipping / dump [min]	0,90	Pertpg[0,6 0,9 1,8]
Rensk [min]	57,8	Pertpg[40,4 57,8 115,5]
Sprøytebetong [min]	103,6	Pertpg[72,5 103,6 207,1]

Resultatene fra simuleringsmodellene fremgår av tabell 4.6.

Tabell 4.6: Resultater fra deterministisk versus stokastisk.

Resultater	Deterministisk	Stokastisk
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	13 438,7	16 725,8
Byggetid – Vekseldrift [t]	19 111,1	24 234,9
Vekseldriftfaktor [-]	1,422	1,449

4.3.2 Tripplestimat

I denne simuleringen vil tripplestimatene innhentet fra intervjuobjekt 5, tabell 4.3, benyttes i beregningene i simuleringsmodellene. Der tripplestimat ikke er gitt vil verdier fra standardtilfellet benyttes, og der deterministiske verdier er gitt vil disse benyttes. I tabell 4.7 presenteres varighetene fra tripplestimatet som benyttes i simuleringsmodellene.

Tabell 4.7: Varigheter fra tripplestimat.

Aktivitet	Tripplestimat [min]
Sonderboring [min]	-
Forinjeksjon [min]	Pertpg[1 200,0 1 500,0 2 880,0]
Bolting [min]	Pertpg[60,0 90,0 210,0]
Salveboring [min]	Pertpg[90,0 120,0 360,0]
Lading [min]	Pertpg[60,0 90,0 180,0]
Sprengning [min]	0,1
Ventilasjon [min]	Pertpg[10,0 20,0 30,0]
Lasting (lastetid per bil) [min]	-
Tipping / dump [min]	-
Rensk [min]	Pertpg[60,0 90,0 180,0]
Sprøytebetong [min]	60,0

Resultatene fra simuleringsmodellene fremgår av tabell 4.8.

Tabell 4.8: Resultater fra tripplestimat.

Resultater	Tripplestimat
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	17 082,3
Byggetid – Vekseldrift [t]	25 152,5
Vekseldriftfaktor [-]	1,472

4.3.3 Variasjon i betingelsene

Avslutningsvis varieres tre ulike betingelser, med tre tilhørende variasjoner, altså totalt ni ulike situasjoner med utgangspunkt i beregningene i vedlegg E. Her oppnås da ulike enhetstider for de ulike situasjonene. De tre betingelsene som varieres er: (1) tunneltverrsnitt; (2) bolte- og sprøytebetongmengder; og (3) injeksjonsmengder. Hver betingelse varieres deretter med lav, middels og høy. I tillegg varieres tunnallengden i simuleringsmodellen, men dette tas ikke til følge i beregningene i vedlegg E, da tunnallengden ikke har betydning for enhetstidene. Totalt gir dette 12 ulike situasjoner, og tabell 4.9 illustrerer dette. *Middels* betegner standardtilfellet, slik at *Lav* og *Høy* er relativt dette.

Tabell 4.9: Ulike situasjoner.

	Lav	Middels	Høy
Tunnellengde	2 000 m	4 000 m	6 000 m
Bolte- og sprøytebetongmengde	Reduserte mengder	Standard mengder	Økte mengder
Injeksjonsmengde	Reduserte mengder	Standard mengder	Økte mengder
Tverrsnitt	T5,5	T10,5	T12,5

Vegnormal N500 *Vegtunneler* av Statens vegvesen (2022) er utgangspunktet for anslag av bolte- og sprøytebetongmengder. Reduserte mengder er anslått med bakgrunn i sikringsklasse I tilhørende en god bergmassekvalitet med bergmasseklasse A. Middels mengder er anslått med bakgrunn i sikringsklasse II tilhørende en middels bergmassekvalitet med bergmasseklasse C. Økte mengder er anslått med bakgrunn i sikringsklasse IVa tilhørende en dårlig bergmassekvalitet med bergmasseklasse E.

Variasjon i tunnellengde

Variasjon i tunnellengde medfører ingen endring i parametere utover tunnellengde i simuleringsmodellen. Varighetene for de ulike tunnellengdene fremgår av tabell 4.10.

Tabell 4.10: Varigheter til aktivitetene for ulike tunnallengder.

Aktivitet	Tunnellengde		
	2 000 m	4 000 m	6 000 m
Sonderboring [min]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]
Forinjeksjon [min]	Pertpg[1 087,8 1 554,0 3 108,0]	Pertpg[1 087,8 1 554,0 3 108,0]	Pertpg[1 087,8 1 554,0 3 108,0]
Bolting [min]	Pertpg[48,3 69,0 138,0]	Pertpg[48,3 69,0 138,0]	Pertpg[48,3 69,0 138,0]
Salveboring [min]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]
Lading [min]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]
Sprengning [min]	0,1	0,1	0,1
Ventilasjon [min]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]
Lasting [min]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]
Tipping/dump [min]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]
Rensk [min]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]
Sprøytebetong [min]	Pertpg[72,5 103,6 207,1]	Pertpg[72,5 103,6 207,1]	Pertpg[72,5 103,6 207,1]

Resultatene fra varierende tunnallengde fremkommer i tabell 4.11.

Tabell 4.11: Resultater fra varierende tunnallengde.

Resultater	2 000 m	4 000 m	6 000 m
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	8 248,3	16 725,8	25 868,2
Byggetid – Vekseldrift [t]	12 069,6	24 234,9	37 111,4
Vekseldriftfaktor [-]	1,463	1,449	1,435

Variasjon i tverrsnitt

Variasjon av tverrsnitt medfører endringer i betingelsene i forhold til standardtilfellet, og fremkommer i tabell 4.12.

Tabell 4.12: Endret tverrsnitt - parameterendringer.

Parameter	T5,5	Standardtilfellet (T10,5)	T12,5
Antall ladde hull [stk]	72	109	125
Buelengde vederlag til vederlag [m]	9,94	14,97	17,2
Buelengde [m]	17,12	22,13	24,32
Tverrsnitt [m ²]	39,10	74,59	91,32
Massemengde [m ³]	315	600	735

Varigheter til aktivitetene for ulike tverrsnitt fremgår av tabell 4.13.

Tabell 4.13: Varigheter til aktivitetene for ulike tverrsnitt.

Aktivitet	Tverrsnitt		
	T5,5	Standardtilfellet (T10,5)	T12,5
Sonderboring [min]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]
Forinjeksjon [min]	Pertpg[1 176,0 1 680,0 3 360,0]	Pertpg[1 087,8 1 554,0 3 108,0]	Pertpg[999,6 1 428,0 2 856,0]
Bolting [min]	Pertpg[31,5 45,0 90,0]	Pertpg[48,3 69,0 138,0]	Pertpg[52,5 75,0 150,0]
Salveboring [min]	Pertpg[85,2 121,8 243,6]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]	Pertpg[133,3 190,4 380,8]
Lading [min]	Pertpg[26,5 37,8 75,6]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]	Pertpg[41,2 58,8 117,6]
Sprengning [min]	0,1	0,1	0,1
Ventilasjon [min]	Pertpg[5,6 8,0 16,0]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]	Pertpg[12,6 18,0 36,0]
Lasting [min]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]
Tipping/dump [min]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]
Rensk [min]	Pertpg[26,5 37,8 75,6]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]	Pertpg[47,8 68,3 136,5]
Sprøytebetong [min]	Pertpg[71,2 101,7 203,4]	Pertpg[72,5 103,6 207,1]	Pertpg[76,6 109,4 218,9]

Resultatene fra simuleringmodellene fremgår av tabell 4.14.

Tabell 4.14: Resultater fra varierende tverrsnitt.

Resultater	T5,5	Standardtilfellet (T10,5)	T12,5
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	14 359,1	16 725,8	17 540,9
Byggetid – Vekseldrift [t]	22 166,7	24 234,9	24 463,3
Vekseldriftfaktor [-]	1,544	1,449	1,395

Variasjon i bolte- og sprøytebetongmengder

Variasjon i bolte- og sprøytebetongmengder medfører endringer i betingelsene i forhold til standardtilfellet, og fremkommer i tabell 4.15.

Tabell 4.15: Endret bolte- og sprøytebetongmengde - parameterendringer.

Parameter	Reduserte mengder	Standardtilfellet	Økte mengder
Boltelengde [m]	2,4	3,0	4,0
Boltemønster [m]	Spredd bolting	c/c 2	c/c 1,5
Sprøytebetongtykkelse [cm]	8,0	8,0	150,0

Varigheter til aktivitetene for ulike bolte- og sprøytebetongmengder fremgår av tabell 4.16.

Tabell 4.16: Varigheter til aktivitetene for ulike bolte- og sprøytebetongmengder.

Aktivitet	Bolte- og sprøytebetongmengder		
	Reduserte mengder	Standardtilfellet	Økte mengder
Sonderboring [min]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]
Forinjeksjon [min]	Pertpg[1 087,8 1 554,0 3 108,0]	Pertpg[1 087,8 1 554,0 3 108,0]	Pertpg[1 087,8 1 554,0 3 108,0]
Bolting [min]	Pertpg[11,8 16,9 33,8]	Pertpg[48,3 69,0 138,0]	Pertpg[66,2 94,5 189,1]
Salveboring [min]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]
Lading [min]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]
Sprengning [min]	0,1	0,1	0,1
Ventilasjon [min]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]
Lasting [min]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]
Tipping/dump [min]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]
Rensk [min]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]
Sprøytebetong [min]	Pertpg[72,5 103,6 207,1]	Pertpg[72,5 103,6 207,1]	Pertpg[65,4 93,4 186,7]

Resultater fra simuleringsmodellene vises i tabell 4.17.

Tabell 4.17: Resultater fra varierende bolte- og sprøytebetongmengder.

Resultater	Reduserte mengder	Standardtilfellet	Økte mengder
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	15 834,7	16 725,8	17 308,8
Byggetid – Vekseldrift [t]	23 071,6	24 234,9	25 021,5
Vekseldriftfaktor [-]	1,457	1,449	1,446

Variasjon i injeksjonsmengde

For variasjon i injeksjonsmengde er det valgt å se på to situasjoner. Den første varianten er endret mengde tørrsement per løpemeter tunnel, og den andre varianten er endret forekomst av injeksjonsbehov langs tunnelen.

Variasjon i injeksjonsmengder medfører i denne sammenhengen endringer i antatt mengde tørrsement per løpemeter tunnel. Endringer i forhold til standardtilfellet fremgår av tabell 4.18.

Tabell 4.18: Endret injeksjonsmengde - parameterendring.

Parameter	Reduserte mengder	Standardtilfellet	Økte mengder
Mengde tørrsement [kg/lm]	125	580	1 000

Varigheter for aktivitetene for ulike injeksjonsmengder fremgår av tabell 4.19.

Tabell 4.19: Varigheter til aktivitetene for ulike injeksjonsmengder.

Aktivitet	Injeksjonsmengder		
	Reduserte mengder	Standardtilfellet	Økte mengder
Sonderboring [min]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]	Pertpg[92,6 132,3 264,6]
Forinjeksjon [min]	Pertpg[239,3 341,9 683,8]	Pertpg[1 087,8 1 554,0 3 108,0]	Pertpg[1 871,0 2 672,9 5 345,8]
Bolting [min]	Pertpg[48,3 69,0 138,0]	Pertpg[48,3 69,0 138,0]	Pertpg[48,3 69,0 138,0]
Salveboring [min]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]	Pertpg[118,9 169,9 339,8]
Lading [min]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]	Pertpg[36,8 52,5 105,0]
Sprengning [min]	0,1	0,1	0,1
Ventilasjon [min]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]	Pertpg[10,5 15,0 30,0]
Lasting [min]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]	Pertpg[1,7 2,5 5,0]
Tipping/dump [min]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]	Pertpg[0,6 0,9 1,8]
Rensk [min]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]	Pertpg[40,4 57,8 115,5]
Sprøytebetong [min]	Pertpg[72,5 103,6 207,1]	Pertpg[72,5 103,6 207,1]	Pertpg[72,5 103,6 207,1]

Resultater fra varierende injeksjonsmengder presenteres i tabell 4.20.

Tabell 4.20: Resultater fra varierende injeksjonsmengder.

Resultater	Reduserte mengder	Standardtilfellet	Økte mengder
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	11 724,7	16 725,8	21 426,7
Byggetid – Vekseldrift [t]	14 286,4	24 234,9	33 609,4
Vekseldriftfaktor [-]	1,219	1,449	1,569

I den andre varianten vil, som nevnt, forekomsten av injeksjonsbehov langs tunnelen endres. Med andre ord, hvor mange meter av tunnelen det forventes at har behov for forinjeksjon vil varieres. I standardtilfellet er dette satt til 4000 meter med injeksjon av 4000 meter tunnel. De to andre variantene det er ønskelig å se på er: (1) en 4000 meter lang tunnel med 0 meter injeksjon; og (2) en 4000 meter lang tunnel med 2000 meter injeksjon. Alle betingelser og dermed varigheter vil være helt like, med unntak av forekomsten av injeksjonsbehov. Dette legges direkte inn i simuleringmodellene. Resultatene fra dette presenteres i tabell 4.21.

Tabell 4.21: Resultater fra varierende injeksjonsmengde og tunnallengde.

Resultater	0 meter injeksjon	2000 meter injeksjon	4000 meter injeksjon
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	10 328,7	13 536,2	16 725,8
Byggetid – Vekseldrift [t]	11 461,0	17 800,4	24 234,9
Vekseldriftfaktor [-]	1,110	1,315	1,449

4.3.4 Variasjon i både tunnallengde og injeksjonsmengde

Opprinnelig var det en mistanke om at injeksjonsmengdene ville påvirke vekseldriftfaktoren i stor grad. Dette ble bekreftet fra intervjuene, og kan også se ut til å stemme fra simuleringene.

Fra intervjuene ble det etablert en tanke om at tunnallengde ville ha en effekt på vekseldriftfaktoren, og at ved kortere tunnallengde ville effekten på vekseldriftfaktoren domineres av tunnallengde over effekten fra injeksjon. I motsatt fall, ved større tunnallengder, ville injeksjon dominere effekten på vekseldriftfaktoren over effekten fra tunnallengde. Fra simuleringene har det kommet frem at økende tunnallengde gir avtakende

vekseldriftfaktor. Med utgangspunkt i dette oppstod det et ønske om å se hvordan tunnallengde og injeksjonsmengde varierte sammen.

I det følgende vil det presenteres vekseldriftfaktorer for tre ulike tunnallengder, der hver tunnallengde kombineres med tre ulike grader av injeksjonsbehov. De utvalgte tunnallengdene er de samme som tidligere: (1) 2000 meter; (2) 4000 meter; og (3) 6000 meter. De ulike gradene av injeksjonsbehov er: (1) 0 % av total tunnallengde; (2) 50 % av total tunnallengde; og (3) 100 % av total tunnallengde. Varigheten for aktivitetene er akkurat som for standardtilfellet, og endringene gjøres kun i simuleringsmodellen. For injeksjon betyr dette at det er forekomsten av injeksjonsbehov som varieres, ikke mengden tørrsement per løpemeter tunnel.

Resultatene for en 2000 meter lang tunnel, med et injeksjonsbehov på henholdsvis 0 meter, 1000 meter og 2000 meter, presenteres i tabell 4.22.

Tabell 4.22: Resultater fra 2 000 meter tunnallengde med varierende injeksjonsmengde.

2000 meter			
Resultater	0 % injeksjon	50 % injeksjon	100 % injeksjon
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	4 990,4	6 625,8	8 208,6
Byggetid – Vekseldrift [t]	5 631,4	8 825,5	12 072,4
Vekseldriftfaktor [-]	1,129	1,332	1,471

Resultatene for en 4000 meter lang tunnel, med et injeksjonsbehov på henholdsvis 0 meter, 2000 meter og 4000 meter, presenteres i tabell 4.23.

Tabell 4.23: Resultater fra 4 000 meter tunnallengde med varierende injeksjonsmengde.

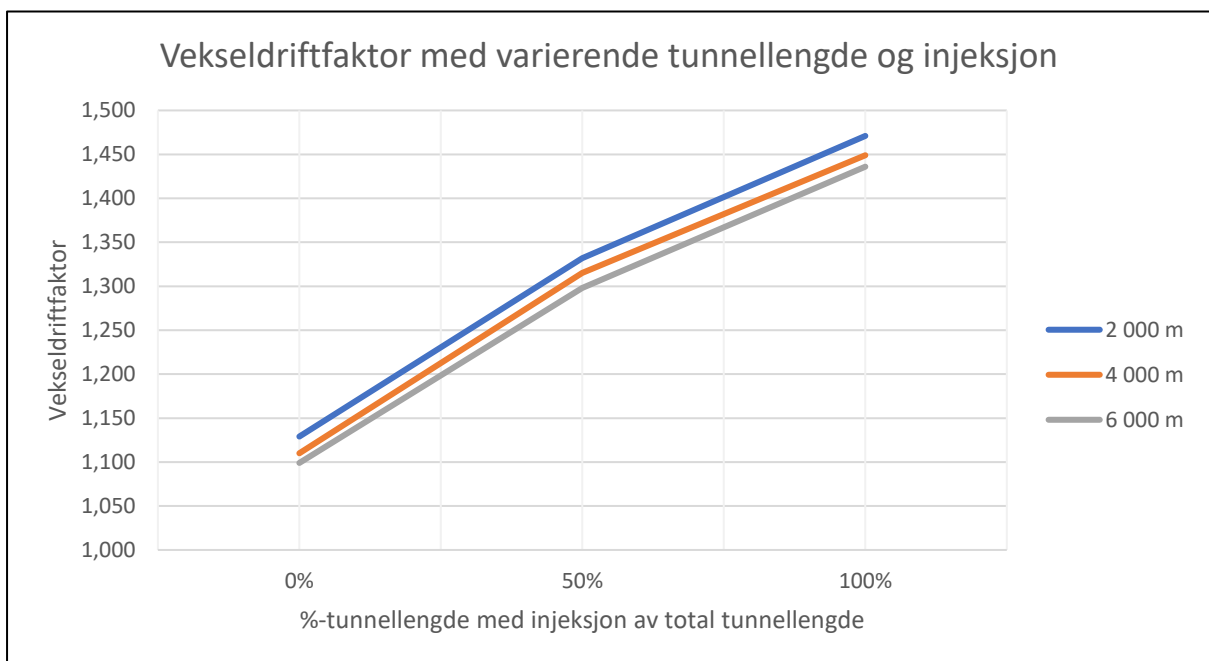
4000 meter			
Resultater	0 % injeksjon	50 % injeksjon	100 % injeksjon
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	10 328,7	13 536,2	16 725,8
Byggetid – Vekseldrift [t]	11 461,0	17 800,4	24 234,9
Vekseldriftfaktor [-]	1,110	1,315	1,449

Resultatene for en 6000 meter lang tunnel, med et injeksjonsbehov på henholdsvis 0 meter, 3000 meter og 6000 meter, presenteres i tabell 4.24.

Tabell 4.24: Resultater fra 6 000 meter tunnallengde med varierende injeksjonsmengde.

6000 meter			
Resultater	0 % injeksjon	50 % injeksjon	100 % injeksjon
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	16 217,6	21 091,3	25 830,7
Byggetid – Vekseldrift [t]	17 814,2	27 367,1	37 089,4
Vekseldriftfaktor [-]	1,099	1,298	1,436

I figur 4.2 presenteres de sammenstilte resultatene fra variasjon i tunnallengde og injeksjon.



Figur 4.2: Vekseldriftfaktor med varierende tunnallengde og injeksjon.

5. Diskusjon

Dette hovedkapittelet knytter sammen teori og resultater, og funnene skal utbroderes og diskuteres.

5.1 Kontraktuelle elementer

I dette underkapittelet diskuteres teori og resultatene i forbindelse med forskningsspørsmålet:

(1) Hvilke kontraktuelle elementer er særlig utfordrende i forbindelse med vekseldrift og tunnelbyggetid?

5.1.1 Generelt

Kontrakten ligger til grunn for alle byggeprosjekter, og tegner rammeverket for samarbeidet mellom kontraktspartene, samt fordeler ansvaret og styringsmulighetene. I Norge har det i tunnelkontrakter tradisjonelt vært benyttet enhetspriskontrakter med justerbare enhetspriser, i tillegg til at det kan suppleres med løst anslåtte mengder. Tunnelbygging forutsetter bergmassen som et byggemateriale, og dermed er undersøkelsene av bergmassen en sentral del av kontrakter i alle undergrunnsprosjekter. Disse undersøkelsene er grunnlaget for estimering av mengder og kostnader, og danner også grunnlaget for anslaget av total tunnelbyggetid i kontrakten.

5.1.2 Risiko

Risiko er et sentralt kontraktuelt element i alle tunnelprosjekter, og kan i stor grad knyttes til grunnforhold og tunnelbyggetid. Hvordan risikoen da fordeles og håndteres er viktig for alle involverte parter. Den norske risikofordelingsmodellen har i den anledning vist seg å medføre lavest mulig prosjektkostnad, og har potensial for en samfunnsmessig gevinst. Det fremkommer av intervjuene at risikoen er fordelt på en rimelig måte mellom byggherre og entreprenør i kontraktene så lenge risikoen er forutsigbar, og entreprenøren faktisk får betalt for medgåtte mengder. Forutsigbarhet og tydelighet i risikobildet er viktig, slik at det er godt kjent hvilken part som skal ta på seg hvilken risiko i tunnelprosjekter.

Særlig kan det i forbindelse med vekseldrift være mye risiko for entreprenøren, da vekseldrift forutsetter mindre utstyr og medfører da et større press på mannskapet og utstyret. Den ene stoffen kan bli stående på vent uten aktivitet hvis boreriggen på den andre stoffen blir heftet

av eksempelvis aktiviteter tilknyttet økte sikringsmengder eller tyngre sikring. Denne skjevfordelingen i mengder mellom stoffene ødelegger potensielt hele driftsopplegget, og kan redusere fremdriften betraktelig og til slutt ha innvirkning på byggetiden.

Fremdriften reduseres selvfølgelig også ved både enstuffsdrift og tostuffsdrift i slike tilfeller. Til forskjell fra vekseldrift benyttes det dog komplette utstyrspakker på hver stoff i tostuffsdrift. Den stoffen som ikke opplever økte mengder eller tung sikring i tostuffsdrift, kan da fortsette drivingen med vanlig fremdrift med den utstyrspakken som er tilordnet aktuell stoff. Sammenlignes vekseldrift og enstuffsdrift, kan fremdriften holdes noe høyere i vekseldrift dersom det blir økte sikringsmengder eller tung sikring, siden deler av utstyrspakken kan utnyttes på den alternative stoffen. Det forutsettes den samme størrelsen på utstyrspakken, og stort sett den samme bemanningen i vekseldrift som i enstuffsdrift, men drivingen foregår altså på to stuffer. Dette medfører et økt press på utstyr og mannskap, slik at utstyr og mannskap slites mer, og sannsynligheten for driftsstopp kan være økt. Risikoen tilknyttet utstyr og bemanning er da høyere i vekseldrift sammenlignet med enstuffsdrift.

I vekseldrift skal det sammenlignet med enstuffsdrift gjøres mer, men med samme utstyrspakke, og sammenlignet med tostuffsdrift skal det samme gjøres, men med mindre utstyrspakke. Oppsummert kan det hevdes at risikoen er høyere i vekseldrift enn ved andre driftsopplegg, og mer kan gå galt da det er mer som skjer men med dårligere forutsetninger.

Et annet aspekt ved risiko det pekes på i intervjuene er at risiko på generelt grunnlag bør tilstrebes å ikke tas på elementer vedkommende aktør ikke kan påvirke. Noe upåvirkbar risiko vil det dog alltid være, og da bør den aktøren som ligger på høyeste nivå i kontraktspyramiden ta den upåvirkbare risikoen, slik at det unngås risikopåslag for hvert ledd. Ellers kan dette medføre betydelige summer på risikopåslag på elementer ingen av de involverte aktørene kan påvirke, og føre til u hensiktsmessig store kostnader for vedkommende som sitter på toppen av kontraktspyramiden og finansierer prosjektet. I tillegg må det være enighet om hva som skjer med byggetid og økonomiske konsekvenser dersom de stipulerte mengdene skulle overgå. Dette ikke alltid har vært like klart.

Mye av risikoen i alle tunnelprosjekter, uavhengig av driftsopplegg, kan altså generelt knyttes opp mot grunnforhold og tunnelbyggetid. Byggherren er etter standarden ansvarlig for bergets beskaffenhet og kvalitet, men store deler av kostnadene i tunneldriving er tidsavhengige. Ut fra beskrivelsen i kontrakten kan da flere forskjellige enhetstider, eksempelvis hvor fort det bores, være innenfor det som kan påregnes som relevante

bergforhold. Dette medfører da en viss usikkerhet for entreprenøren i forbindelse med hvordan vedkommende skal forholde seg til videre fremdrift, men etter hvert som tunneldrivingen forløper vil mer informasjon om forholdene tilgjengeliggjøres. Justeringer kan da gjøres underveis slik at entreprenøren kan utføre arbeidet på en hensiktsmessig måte ut fra beskrivelsen og fristene som er satt.

De senere årene har utviklingen dog gått fra de diskuterte enhetspriskontraktene mot totalentrepriser med justerbare mengder. Disse totalentreprisekontraktene medfører den ulempen at entreprenøren ikke har anledning til å foreta grunnundersøkelser som prøveboring før oppstart av arbeidene, og dette skaper en forhøyet risiko for entreprenøren. Risiko koster, og dersom byggherren, i tillegg til å redusere sin egen risiko, også tilstreber å redusere entreprenørens risiko, kan total prosjektkostnad reduseres uansett kontraktsform.

5.1.3 Håndtering av mengder og tunnelbyggetid

Håndtering av endrede mengder er et sentralt kontraktuelt element, og håndteres i dag med «100 %-regelen» og ekvivalenttidsregnskapet, henholdsvis for regulering av priser og regulering av byggetid.

«100 %-regelen» sitt formål er å regulere enhetsprisene dersom det forekommer endrede sikringsmengder i forhold til de stipulerte mengdene i kontrakten som følge av endring i grunnforhold. I intervjuene pekes det på at et problem med denne reguleringsformen melder seg dersom sikringsmengdene øker såpass at fremdriften reduseres i et slik omfang at sprengning potensielt uteblir. I tilfeller hvor stoffen nærmest blir stående stille som følge av dårlig bergmasse og påfølgende økte sikringsmengder, vil entreprenøren kun kompenseres for de utførte sikringsmengdene, selv om entreprenøren har betydelige kostnader utover sikringsarbeidene.

I definisjonen av «100 %-regelen» ligger det i tillegg at enhetsprisene ikke kan justeres med mer enn 20 % i forhold til enhetsprisene i kontrakten. For at entreprenøren i tilfeller med minimal fremdrift, slik som beskrevet i forrige avsnitt, skal kunne kompenseres rimelig og få dekket nødvendige kostnader, må vedkommende prise slike ekstremsituasjoner inn i hver enkelt enhetspris i anbudet. Da blir enhetsprisene på sikringsarbeidene kostnadsbærende for hele tunneldriften. Disse enhetsprisene blir da sannsynligvis av en størrelsesorden som medfører at entreprenørens tilbud forkastes av byggherren allerede i anbudsprosessen.

Ekvivalenttidsregnskapet er et godt verktøy for regulering av byggetid så lenge det brukes på korrekt måte og mengdene i kontrakten stemmer overens med den kontraktsfestede byggefristen. Problemene melder seg når mengdene i mengdebeskrivelsen i kontrakten er så omfattende at summen av ekvivalenttidene relatert til sikringsmengdene blir så stor at det ikke gjenstår nok tid til selve tunneldrivingen innenfor byggefristen.

Den nevnte potensielt forhøyede risikoen tilknyttet grunnforholdene for vekseldrift sammenlignet med tostuffsdrift kan medføre særlige utfordringer med hensyn på håndtering av mengder og byggetid. Skjevfordeling kan som nevnt medføre redusert fremdrift på begge stoffene som følge av økte sikringsmengder eller tung sikring. Fremdriften kan sannsynligvis bli enda lavere ved økte sikringsmengder og tung sikring i vekseldrift enn i tostuffsdrift, siden vekseldrift i mange tilfeller forutsetter kun én utstyrspakke slik at den ene stoffen blir stående brakk når sikringsmengdene øker på den ene stoffen. Det kan medføre at det blir behov for enda større reguleringer av byggetiden for at entreprenøren skal kunne levere innenfor den fristen vedkommende har forpliktet seg til. Sammenlignet med enstuffsdrift er dog fremdriften høyere og tidsbruken lavere i vekseldrift, og slik sett blir det et mindre behov for reguleringer av byggetid.

Utfordringen blir ikke mindre ved at det er økte mengder på begge stoffene, da boreriggen først må håndtere økte mengder og potensiell tyngre sikring, samt salveboring, på den ene stoffen, før dette gjentas på den alternative stoffen ved veksling. Dette kan medføre ytterligere behov for å få justert byggetiden med ekvivalenttidssystemet, da begge stoffene rammes av redusert fremdrift og tidsbruken øker enda mer enn ved skjevfordeling. I slike tilfeller er det særdeles viktig at det er enighet mellom byggherre og entreprenør om hva tiltakene skulle bli og hvem som sitter med risikoen vedheftet dette. Ved tostuffsdrift er det to borerigger, og fremdriften kan da generelt holdes høyere og tidsbruken på et lavere nivå enn i vekseldrift når sikringsmengdene øker eller når det blir nødvendig med tung sikring.

Det hevdes i intervjuene at hovedårsaken til utfordringen med at mengdene i mengdebeskrivelsen blir av et omfang som medfører vanskeligheter med å få tunneldrivingen innenfor den satte byggefristen, kan være at ekvivalenttidsregnskapet kun inkluderer sikringsaktivitetene i den teoretiske tidsberegningen. En løsning det pekes på er å inkludere selve drivingen i ekvivalenttidsregnskapet, slik at også drivingen inngår i justeringene av byggetid i henhold til mengdeendringene. Det er heller ikke alltid tilfellet at alle aktiviteter

tilknyttet økte mengder som følge av endrede grunnforhold er inkludert i kontrakten, og det er en forutsetning for at ekvivalenttidsregnskapet skal fungere etter hensikten.

Når det brukes riktig er systemer for justering av byggetid, som ekvivalenttidsregnskapet, hensiktsmessig både for byggherre og entreprenør. Entreprenøren får kompensert for de medgåtte mengdene, og byggherren får nyttiggjort seg av et system som gjør at entreprenørens produksjon enkelt kan måles. Dersom entreprenøren kommer skjevt ut, kan partene enes om tiltak som sikrer at entreprenøren skal kunne levere innenfor tidsrammen. Da kommer prosjektet over på riktig kurs, og er positivt for begge parter, da det i de fleste tilfeller er i begge sin interesse at prosjektet går så godt som mulig.

Byggherrerepresentanten fra intervjuene peker på en annen fordel med ekvivalenttidsregnskapet, som er at det stimulerer til god og hensiktsmessig fremdrift. Entreprenøren har ansvar for selv å tilrettelegge for utnyttelse av ekvivalenttidsregnskapet, da vedkommende kun kompenseres for utførte mengder, og ikke for dødtid mellom operasjonene. Dette medfører at entreprenøren må sørge for at det er jevn fremdrift med minst mulig dødtid, slik at vedkommende får utnyttet fordelene med et ekvivalenttidssystem. Likevel vil sannsynligvis ikke denne fordelene være til særlig hjelp, dersom sikringsmengdene er uforholdsmessig store i forhold til mengdene i kontrakten i utgangspunktet.

5.1.4 Uenigheter og konflikter

Teorien viser til et problem som har forekommet i forbindelse med mengdene, der byggherren legger taktisk inn større mengder enn hva som er forventet, slik at enhetsprisene presses ned. Dette bekreftes også i intervjuene. På den andre siden av bordet kan det også forekomme taktisk prising gjort av entreprenøren i tilbudsfasen, der svakheter i konkurransegrunnlaget utnyttes av entreprenøren. Begge disse faktorene kan bidra til uenigheter og dårlig arbeidsmiljø mellom partene. Det kan også forekomme at det oppstår uenigheter omkring kapasitetene i ekvivalenttidsregnskapet når det er spesielle krav til sikring.

Videre kan uenigheter mellom byggherre og entreprenør oppstå i forbindelse med hvem som er ansvarlig for de økte mengdene. Byggherren er generelt ansvarlig for grunnforholdene, slik at entreprenøren ikke sitter med risikoen dersom drivingen skulle avdekke signifikant avvikende grunnforhold fra kontrakten. I denne forbindelse spiller den geologiske rapporten og tolkningen av denne en viktig rolle. Entreprenøren vurderer blant annet topografi,

vegetasjon og vann, og kombinerer denne informasjonen med sin kunnskap om aktuelle krav, og gjør seg deretter opp en mening om potensielt driveforløp. Hvis partene blir uenige om hvor skjæringspunktet går, mellom hva som er signifikant avvikende grunnforhold og ikke, kan uenigheter oppstå. Videre enes de ikke om hvem som skal ta denne risikoen for de aktuelle grunnforholdene som avdekkes. Byggherren kan på sin side hevde det ikke er snakk om signifikant avvikende grunnforhold, mens entreprenøren på sin side kan mene det motsatte. Det forekommer også at grunnlaget for faktadelen i den geologiske rapporten er mangelfullt, slik at rapporten ikke er representativ for forholdene i den aktuelle tunnelen. Av den grunn kan det også oppstå diskusjoner om hvilken aktør som skal ha risikoen som avdekkes tilknyttet dette.

En annen årsak til konflikter kan være at entreprenører som ikke planlegger godt nok, eller har dårlig fremdrift, forsøker å skyldte byggherren for problemene som oppstår. Entreprenøren bedriver da ansvarsfrakrivelse og henger problemene på grunnforholdene slik at byggherren skal stå ansvarlig, siden det er byggherren som i utgangspunktet sitter med risikoen tilknyttet grunnforholdene.

Byggherrerepresentanten fra intervjuene peker på at mange konflikter sannsynligvis kunne vært løst på et tidligere stadium, slik at de ikke eskaleres til det punktet at saken havner i retten. Hensiktsmessige kontrakter som omhandler alt arbeidet som faktisk skal utføres, og en dialog mellom partene som er åpen og konstruktiv helt fra start, er viktige punkter som bør etterleves for å oppnå et fruktbart samarbeid uten konflikter.

Mangel på gyldighet til dagens vekseldriftfaktorer har potensial til å være konflikt drivende. Ved bruk av feil vekseldriftfaktorer, kan tunnelbyggetiden beregnes på feil grunnlag i utgangspunktet. Følgelig er det muligheter for at tunnelbyggetiden som settes i kontrakten er feil, og medføre et konfliktgrunnlag som kan koste partene, og samfunnet, store summer.

5.1.5 Potensielle løsninger

De mest utfordrende kontraktuelle elementene i forbindelse med vekseldrift og tunnelbyggetid er altså identifisert til å være: risiko tilknyttet grunnforhold, utstyr og mannskap; og måter og metoder for håndtering av endrede mengder og byggetid. Uenigheter, som senere kan eskalere til konflikter, oppstår ofte når det er strid om aspekter tilknyttet denne risikoen og håndteringen av endrede mengder og byggetid. Konflikter kan også ha sin

bakgrunn i det at det er benyttet feil vekseldriftfaktorer som fører til at byggetiden er satt feil i utgangspunktet.

Generelt har uenigheter omkring tunnelbyggetid vært kimen til flere konflikter og dårlig arbeidsklima i tunnelprosjekter, særlig når det er snakk om komprimert byggetid.

Komprimert byggetid medfører at flere dårlige beslutninger tas basert på at tid er penger, og dette vil være kostbart i lengden. Det ligger dermed et stort potensial i tunnelbyggetidsmodeller som i større grad beregner tunnelbyggetiden korrekt, slik at det beregnes en tunnelbyggetid som stemmer bedre overens med mengdene i kontrakten. Mengdene i kontrakten vil da ikke kunne medføre en tidsbruk som ikke står i stil til den kontraktsfestede byggefristen. Da kan sannsynligvis penger spares og konfliktnivået reduseres i aktuelle prosjekter.

Fem elementer kan da avslutningsvis trekkes frem som mulig hensiktsmessige i arbeidet med å skape gode og lønnsomme prosjekter med lavt konfliktnivå:

- **Tunnelbyggetidsmodeller.** Beregningsmodeller som beregner tunnelbyggetiden med større presisjon.
- **Risikofordeling.** Det må til enhver tid være kjent hvilken part som skal ta på seg hvilken risiko, og det må være gjensidig forståelse og aksept for dette.
- **Ekvivalenttidsregnskap for driving.** Et system for regulering av byggetid som følge av endrede mengder, som også omfatter driving.
- **God kompetanse og holdninger i både entreprenørens og byggherrens organisasjon.** Kompetente organisasjoner med kunnskap og vilje til å løse problemer når de oppstår i prosjektet.
- **Kontraktsformater med samspill og tidligere involvering av entreprenør.** Tradisjonelt har pris vært et styrende utvelgelseskrITERIUM, mens de nye samspillsmodellene legger større vekt på andre forhold som gjennomføringsevne, kvalitet, HMS, ledelse og organisasjon. Tunnelbyggetid kan diskuteres i de tidlige fasene, slik at de involverte aktørene i større grad er enige om dette tidligere.

5.2 Vekseldrift og usikkerhet

I dette underkapittelet diskuteres teori og resultatene i forbindelse med forskningsspørsmålet:

(2) Hvordan kan vekseldriftfaktoren bestemmes under usikkerhet, og har denne usikkerheten eventuelt noen betydning?

For at dette spørsmålet skal kunne besvares, er det først nødvendig med diskusjon omkring vekseldrift, slik at det oppnås en forståelse for grunnlaget for vekseldriftsfaktoren. Dette foregår i de tre første delkapitlene.

5.2.1 Definisjon av vekseldrift

Vekseldrift i konvensjonell tunneldriving defineres i teorien som å drive vekselvis på to stuffer med én utstyrspakke. Det innebærer at mens det eksempelvis bedrives salveboring på den ene stoffen, lastes det ut masser eller sikres på den andre stoffen, før det veksles og utstyret og eventuelt mannskapet bytter plass. Av intervjuene fremkommer det at vekseldrift i praksis er mer flytende, og graden av vekseldrift varieres fra vekseldrift med én utstyrspakke og ett enkelt mannskap opp til doble utstyrspakker og økt mannskap helt opp mot tostuffsdrift på to stuffer med dobbel utstyrspakke. Vekseldrift er heller ikke nødvendigvis betinget å dreie seg om to stuffer, men flere stuffer kan være involvert. Da kan drivingen inneholde flere sett utstyr og mannskap, slik at flere stuffer deler på det utstyret som er hensiktsmessig og den nødvendige mengden mannskap. Graden av vekseldrift baseres på behovet, og vekseldrift vil være en designøvelse som pågår kontinuerlig mens drivingen forløper. Det viktigste punktet er uansett å legge opp til en vekseldrift som medfører mest mulig kontinuerlig utnyttelse av mannskap og utstyr, slik at utnyttelsesgraden på utstyr og mannskap blir høyest mulig, som i bunn og grunn er god økonomi.

Prosjektspesifikke forhold kan legge føringer for hvilken grad av vekseldrift det satses på. Avstanden mellom og plasseringen av stoffene, og hvordan transporten mellom stoffene foregår vil være begrensende faktorer. Ved store avstander og vanskeligheter med transport av utstyr, eksempelvis via offentlig vei, kan det være hensiktsmessig med to borerigger, og muligens to hjullastere for lasting, mens resten av utstyret kan være felles, samt en minimumsbemannning. I slike tilfeller veksles det mer på mannskapet enn utstyret. En slik variant av vekseldrift er sannsynligvis ikke bærekraftig i lengden, siden mannskapet presses maksimalt, og det kan etter hvert være nødvendig å bemanne noe opp for å lette på arbeidstrykket for den enkelte. Plasseringer av stuffer som muliggjør vekseldrift kan være

- parallelle stuffer i toløpstunnel
- i samme løp, der det drives tverrslag inn på midten av tunnelen for deretter at det drives vekselvis til hver side fra midten
- to forskjellige tunneler, så lenge det kun er en liten dagsone mellom

Det understrekes i intervjuene at særlig injeksjonsmengder vil påvirke graden av vekseldrift som velges, siden systematisk forinjeksjon medfører en ekstra aktivitet i salvesyklusen som må hensyntas, mens behovsprøvd forinjeksjon medfører en rotete og uoversiktlig vekseldrift. Injeksjonsarbeidene har potensial til å være totalt styrende for fremdriften. I enkelte tilfeller kan det da eksempelvis være hensiktsmessig å ha en ekstra borerigg som kan gå fast på injeksjonsboring og injisering. Etterinjeksjon er en øvelse som fungerer dårlig i praksis, siden man ved å forsøke å tette bak, risikerer at vannet kommer igjen på andre steder slik at problemet bare flyttes på. Derfor er ikke etterinjeksjon tatt til følge som en mulighet i modellen.

Som nevnt er det utallige varianter av vekseldrift, men i forbindelse med simuleringsmodellen er det tatt utgangspunkt i en vekseldriftvariant der to stuffer deler borerigg og lastesystem, mens annet utstyr som pigmaskin er eget for hver stoff.

5.2.2 Fremdrift og kostnader

Vekseldriftens rasjonalitet med hensyn på fremdrift og kostnader avhenger av flere faktorer. Planlegging trekkes frem som muligens den viktigste faktoren, uavhengig av om det er snakk om vekseldrift, enstuffsdrift eller tostuffsdrift. Dersom den ene stoffen blir stående brakk grunnet uferdige aktiviteter på den andre stoffen, stopper hele systemet opp. Hvilket utstyr som skal til hvilken stoff, og hvem som skal operere aktuelt utstyr, må det være full kontroll på. Det vil være særlig viktig ved vekseldrift grunnet knappheten på ressurser. Dette legger et forhøyet press på arbeidsstokken, særlig på mannskap med lederansvar som bas, formann og driftsleder, samt støttefunksjoner som stikkere. Disse ressursene har ansvaret for oppfølging, dokumentasjon og planlegging, og vil presses mer ved vekseldrift enn ved vanlig enstuffsdrift. Det må etterstrebtes full kontroll på den stoffen det ikke bedrives salveboring på, slik at alt er klart når vekslingen skjer. Det vil da være en forhøyet risiko med hensyn på denne delen av organisasjonen. Følgelig kan det være aktuelt å bemanne noe opp i disse posisjonene, og ikke minst sørge for at organisasjonen har tilstrekkelig kompetanse.

Den nevnte forhøyede utnyttelsesgraden på utstyr og mannskap krever et godt og potent apparat med hensyn på reparasjon og vedlikehold. Utstyret er stort og tungt, og vil slites ekstra mye ved vekseldrift siden det stort sett ikke er pauser mellom salvene. Gode rutiner og tilstrekkelig kompetanse relatert til utstyret er da viktig for å holde sannsynligheten for driftsstopp som følge av utstyrsproblemer nede. Noe venting på noe av utstyret vil dog

uansett forekomme når det ventes på at neste stuff blir klar for salveboring, siden det ikke er et én-til-én-forhold mellom varighetene til sprengningsaktivitetene salveboring, lading og sprengning, og sikring- og lasteaktiviteter. Denne ekstra tiden bør da utnyttes til service og vedlikehold på det ventende utstyret. Vekseldrift legger også et større press på HMS, sammenlignet med enstuffsdrift, siden det skjer mye til enhver tid og ressursene flyttes mer frem og tilbake. Følgelig må det tas ekstra hensyn for at uønskede hendelser ikke skal oppstå.

Alle driftsformer krever tilstrekkelig med strøm, vann, ventilasjon og lagerplass for god drift, men dette krever sannsynligvis enda bedre oppfølging i vekseldrift. Den forhøyede aktiviteten legger ekstra press på denne infrastrukturen, i tillegg til øvrig utstyr og mannskap.

Faktorer som kan virke begrensende på alle driftsformer, deriblant vekseldrift, kan være skytetider, begrensninger omkring massetransport og arbeidstider til den enkelte arbeider. Ofte kan slike begrensninger inntreffe i relasjon til tunneldriving i tettbygde strøk. Da kan det eksempelvis være forbudt å skyte salve mellom klokken 23:00 og 06:00, eller at det ikke kan bores nære tunnelmunningene, eller at massetransport ute i dagen ikke kan foregå. Da bør det planlegges slik at man ikke står med ferdigladet salve 23:15 som man ikke får skutt. Det er heller ikke hensiktsmessig med flere fulle skift gående på natt når situasjonen er som beskrevet over.

Planleggingen blir i slike tilfeller veldig viktig, og det bør legges opp til arbeider igjennom natten som ikke medfører brudd på de gjeldende restriksjonene. For å ta eksempelet over, kan en løsning være at det tilstrebes at utlastingen er ferdig til klokken 23:00, slik at rensk, eventuell ettersikring og påføring av sprøytebetong kan skje i løpet av natten. Da er det klart for ny salveboring 06:00. Alternativt kan det være tillatt med mellomlagring av masser, slik at dersom det skytes 23:00, kan massene lastes vekk fra stuff og flyttes til et mellomlager. Da kan både utlasting fra stuff, rensk, eventuell ettersikring og påføring av sprøytebetong foregå på natt. Vekseldrift kan medføre en ekstra fleksibilitet i denne forbindelse, blant annet siden det stort sett er mindre utstyr på plassen, som gjør at det er enklere å utnytte det utstyret som faktisk er der best mulig, innenfor gjeldende restriksjoner.

5.2.3 Hensiktsmessighet og fordeler

Vekseldrift er hensiktsmessig og medfører flere fordeler så lenge de prosjektspesifikke forholdene muliggjør en fornuftig transport mellom stuffene det skal veksles på. I en ettløpstunnel betyr dette i de fleste tilfeller at det er snakk om adkomst via et tverrslag inn

mot midten av tunnelen, slik at det kan drives vekselvis fra side til side på de to stuffene som oppnås. Massetransporten foregår da via tverrslaget. Hvorvidt byggingen av tverrslag er mulig, avhenger i stor grad av topografien i området. Dersom topografien er slik at lengden på tverrslaget blir av en viss lengde i forhold til hovedtunnelen, kan vinningen gå opp i spinningen, ved at det brukes i overkant mye tid og ressurser på drivingen av tverrslaget. Jo kortere tunnel, jo kortere bør tverrslaget være for at det skal være økonomisk forsvarlig. Det blir dermed her et skjæringspunkt mellom tunnellengde og lengde på tverrslag som angir hvor langt tverrslaget kan være før gevinsten med vekseldrift begynner å avta.

I toløpstunneler er det fornuftig å utnytte tverrforbindelsene mellom tunnelene til transport av utstyret fra stuff til stuff. I vegtunneler dimensjonert for en viss trafikk, er det krav om tverrforbindelser til rømning hver 250. meter. Da kan eksempelvis hver andre tverrforbindelse gjøres kjørbare for det tunge utstyret. Dette må dog vurderes grundig, siden det er en ekstrakostnad knyttet til dette, både med tanke på å drive tverrforbindelsene med et større tverrsnitt, og ekstrakostnadene som følge av at tverrforbindelsene må tettes til slutt. Tverrforbindelsene skal kun bestå av en passasje med dør i begge ender for gående, og tettejobben vil koste penger. Disse kjørbare tverrforbindelsene kan dog også utnyttes ved at etterarbeidene i tunnelen kan starte opp mens det fortsatt pågår driving. Da kan eksempelvis vegbygging og rørlegging påbegynne før drivingen er avsluttet, ved at massetransporten dirigeres via tverrforbindelsene slik at det ikke blir konflikter mellom driving og etterarbeid.

Generelt kan vekseldrift medføre store fordeler i relasjon til økonomi og fremdrift. Den høye ressursutnyttelsen og fleksibiliteten fører til mindre kostnader til bemanning og leie av utstyr, siden det kan drives med en mindre utstyrspakke og et mindre mannskap sammenlignet med tostuffsdrift. Fremdriften kan økes ved bruk av vekseldrift sammenlignet med enstuffsdrift, og dermed forkortes potensielt byggetiden. Som en konsekvens av både fordelene med både forkortet byggetid og besparelser med hensyn på økonomi, vil de fleste byggherrer legge opp til at entreprenøren kan benytte vekseldrift i tunnelprosjekter. Det kan også tenkes at det i større prosjekter er ønskelig med kombinasjoner. Generelt kan det sies at vekseldrift tar de største fordelene med enstuffsdrift og tostuffsdrift. Man får lavere kostander tilknyttet utstyr og mannskap, og fremdriften holdes på et relativt høyt nivå. Risikoen vil dog bli større.

5.2.4 Simuleringsmodellen

Tradisjonell planlegging og styring av fremdrift i byggeprosjekter har foregått med deterministiske planleggingsteknikker langs den kritiske vegen. Det har ikke vært vanlig å hensynte usikkerhet i tidsplanleggingen. På 60-tallet ble PERT utviklet for å kunne hensynte usikkerhet i tidsplanlegging. PERT lyktes med å tilordne varigheten til aktivitetene usikkerhet, men også PERT bestemmer varigheten og usikkerheten langs den kritiske vegen. Det medfører en stor svakhet, siden parallelle nærkritiske veger ikke hensyntas. Med denne teknikken er man altså ikke sikker på hvilken veg gjennom nettverket som blir den kritiske, gitt at man har parallelle nærkritiske veger.

PERT, sammen med Suksessiv tidsplanlegging, Møllers metode og PNET, er eksempel på det som kalles analytiske metoder for å inkludere usikkerhet i anslagene. Analytiske metoder er en av to hovedretninger for å inkludere usikkerhet i anslagene, eller med andre ord utføre stokastisk anslag. Den andre hovedretningen for stokastiske anslag er simuleringsmetoder. Eksempel på simuleringsmetoder er Monte Carlo-simulering og diskret hendelsessimulering.

Denne masteroppgaven går ut på å studere et system, der systemet er et tunnelprosjekt. Det finnes mange ulike metoder for å studere et system på, og man må blant annet velge mellom å

- eksperimentere med det faktiske systemet eller eksperimentere med en modell av systemet
- ha en fysisk modell av systemet eller en matematisk modell
- løse systemet analytisk eller gjennom en simulering

Ganske åpenbart falt valget på en modell av systemet, gjennom en matematisk modell som løses ved simulering. Det ville blitt uforholdsmessig dyrt å skulle eksperimentere med et ekte tunnelprosjekt, så valget ble en modell av systemet. Å skulle lage en ny fysisk modell for hver variasjon i betingelsene ville trolig blitt både dyrt og tidkrevende, så valget falt på en matematisk modell av systemet. Siden et tunnelprosjekt er relativt komplekst, sammen med at et av målene med masteroppgaven er å se hvordan usikkerhet påvirker vekseldriftfaktoren, var simulering det korrekte valget. Dette valget støttes også av teorien, som sier at når man ønsker å modellere ikke-deterministiske hendelsesforløp er simuleringer nødvendig.

I søken etter et simuleringsverktøy som kunne simulere det aktuelle systemet, ble det konkludert med at det rette var diskret hendelsessimulering. Siden det allerede var bestemt at det var ønskelig å hensynte usikkerhet, måtte det bli en stokastisk modell. Det måtte også bli

en dynamisk simuleringsmodell siden tunnelprosjektet er et system der tilstanden endrer seg med tiden. Aktivitetene som endrer systemet har også en tydelig definert start og slutt, og kan klassifiseres som diskrete tilstandsendringer.

Ved å utføre en diskret hendelsessimulering muliggjør man å inkludere usikkerhet i anslagene, samtidig som parallelle nærkritiske vegger hensyntas. Dette er en stor fordel sammenlignet med de tradisjonelle metodene.

Intervjuene gav mye av grunnlaget for oppsettet av salvesyklusen som representeres i simuleringsmodellene, og den opprinnelig oppsatte salvesyklusen ble bekreftet. Det er forutsatt systematisk forinjeksjon, med forgående sonderboring for måling av innlekkasjer og bergkvalitet. Varigheten til forinjeksjon varieres basert på ønskede mengder. Ideelt sett burde tyngre sikring vært hensyntatt i starten av salvesyklusen, men siden forbolting forutsetter reduserte salvelengder, som også medfører redusert masseuttak, ble dette sett bort fra. Altså er heller ikke sprøytebetongbuer hensyntatt. Full utstøping er et spesialtilfelle som hadde komplisert simuleringsmodellene ytterligere, og er heller ikke medtatt. Som følge av dette, er sikringsklasse IVa den høyeste aktuelle sikringsklassen, siden høyere sikringsklasser tar med tyngre sikring. Mangelen på muligheten for tyngre sikring vil da være en svakhet ved simuleringsmodellene.

Videre er bolting satt inn som en egen aktivitet, selv om det i praksis foregår under salveboringen. Dette er gjort for at det skal være mulig å tillegge bolting andre mengder, som fører til andre varigheter, uavhengig av varigheten som tilknyttes selve salveboringen. Mengdene hentes typisk ut fra kravene som følger av aktuell sikringsklasse. Når boreriggen er ferdig boret kjører den vekk fra stuff og over på den alternative stuffen. Denne transporten foregår via tverrforbindelsene, som forekommer hver 250. meter, mellom hovedtunnelene. Utgangspunktet i modellen er at hver andre tverrforbindelse gjøres kjørbare for tungt utstyr, som vil si at det er 500 meter mellom hver kjørbare tverrforbindelse.

Etter ventilasjonspausen etter sprengningen kommer lasting. Her har det blitt satt opp en sløyfe som baserer seg på fylling av én bil med hjullaster, samt tilhørende utkjøring, tipping og transport tilbake til stuff. Varigheten til aktiviteten *Lasting* er dermed tiden det tar å fylle en lastebil.

Rett etter lastesløyfen kommer rensk, der både maskinell og manuell driftsrensk er inkludert. Deretter kontrolleres den nylig frilagte bergoverflaten, men dette har ikke blitt tilegnet en egen aktivitet, og kan legges til som ekstra tid i enten rensk eller sprøytebetong i

simuleringsmodellene. Avslutningsvis kommer sprøytebetong, der det forutsettes sprøyting med egen sprøyterigg etter hver salve. Her kan varighetene varieres basert på mengdene som følger av aktuell sikringsklasse, eller andre behov.

I realiteten vil også begrensninger som skiftordninger, skytetider og lignende, spille inn på hvordan driften foregår. Dette lar seg dog ikke hensynta i dataprogrammet, og vil være en svakhet ved simuleringsmodellene i tillegg til utelatelsen av tyngre sikring og kun én vekseldriftvariant.

5.2.5 Deterministisk eller stokastisk

Slik simuleringsmodellene er bygget opp tilordnes hver aktivitet en varighet. Denne varigheten kan være både deterministisk og stokastisk, og nettverket i modellen kan bestå av både deterministiske varigheter og stokastiske varigheter. Dette gir en stor grad av fleksibilitet til å tilordne ulik usikkerhet til ulike aktiviteter. Eksempelvis er aktiviteten *Sprengning* i simuleringsmodellene satt som en deterministisk verdi, siden det antas at varigheten til selve sprengningen ikke er spesielt usikker. De øvrige aktivitetene i simuleringsmodellen er stokastiske, gjennom at de er tilordnet en sannsynlighetsfordeling. I EZStrobe ligger det inn flere sannsynlighetsfordelinger, som enkelt kan tilordnes varigheten til en aktivitet. I tillegg til at man kan kombinere deterministiske og stokastiske varigheter, kan man også for de stokastiske varighetene benytte seg av ulike sannsynlighetsfordelinger for ulike aktiviteter for å beskrive usikkerheten. Det vil si at en aktivitet kan ha deterministisk varighet, en annen aktivitet kan ha en varighet tilordnet en normalfordeling og en tredje aktivitet kan ha en varighet tilordnet av Pertpg-fordelingen.

Denne muligheten til å kombinere deterministiske varigheter og stokastiske varigheter med ulike sannsynlighetsfordelinger er, så vidt forfatterne kjent, ikke del av noen av de tradisjonelle analytiske metodene for å inkludere usikkerhet i anslagene. I så måte kan det argumenteres for at simuleringsmodellene muliggjør å tilordne aktiviteter en mer korrekt usikkerhet, gjennom ulike sannsynlighetsfordelinger for ulike aktiviteter. Dette vil igjen bidra til at usikkerheten i hele nettverket gjenspeiles mer korrekt, og følgelig er det rimelig å anta at byggetiden i større grad hensyntar den reelle usikkerheten.

I resultatet ble det sett på om det å gjennomføre simuleringer med deterministiske varigheter ville gi andre resultater for byggetiden og vekseldriftfaktoren enn simuleringer med stokastiske varigheter. Først og fremst er det helt tydelig at det å ta hensyn til usikkerhet gir

økt byggetid. For enstuffsdrift økte byggetiden fra 13 439 timer til 16 726 timer, kun ved å tilordne aktivitetene usikkerhet. På samme måte økte byggetiden for veksel drift fra 19 111 timer til 24 235 timer ved å inkludere usikkerhet. I tillegg til at byggetiden øker for både enstuffsdrift og veksel drift, øker også veksel driftfaktoren når usikkerhet inkluderes i varighetene. Veksel driftfaktoren økte fra 1,422 til 1,449. Dette vil si at byggetiden ved veksel drift økte mer enn byggetiden ved enstuffsdrift, når usikkerhet inkluderes. Årsaken til at byggetiden til veksel drift øker mer enn byggetiden til enstuffsdrift er ikke nødvendigvis enkel å forstå. En mulig forklaring er at systemet for veksel drift består av dobbelt så mange aktiviteter som systemet for enstuffsdrift, og at når usikkerhet inkluderes betyr dette at det er dobbelt så mange aktiviteter som kan «gå galt». En annen mulig forklaring er at aktivitetene som ser ut til å påvirke veksel driften negativt med hensyn til tid, spesielt forinjeksjon, inneholder en større usikkerhet enn aktivitetene som ikke påvirker veksel driften.

Selv om det i dette tilfellet ikke var snakk om en enorm økning i veksel driftfaktoren og uansett årsaken til økningen, er dette noe som bør tas til etterretning, og fremtidige beregninger av veksel driftfaktorer bør inkludere usikkerhet. I andre tilfeller, med andre betingelser enn standardtilfellet i disse beregningene, vil dette kunne slå ut i større eller mindre grad og dermed bør det hensyntas.

Avslutningsvis må det også rettes litt kritikk mot implementeringen av usikkerhet. Siden tiden ikke strakk til, lot det seg ikke innhente nok data på varigheten til aktivitetene for å kunne bestemme usikkerheten til de ulike aktivitetene. Det optimale hadde vært å ha nok erfaringstall på alle aktivitetene til å bestemme usikkerheten til de ulike aktivitetene basert på erfaringer. Siden tiden ikke strakk til, ble det besluttet å skalere varighetene med bakgrunn i tripplestimatene innhentet fra intervjuet. Fra tripplestimatene ble det bestemt gjennomsnittlig forholdstall mellom P_5 og m , og m og P_{95} . Disse ble henholdsvis 0,7 og 2,0, og ble brukt som skalering. Den beregnede varigheten ble satt til m , og P_5 og P_{95} ble bestemt ved hjelp av skaleringen. Dette er en tilnærming som vurderes som tilstrekkelig i dette tilfellet, men som bør forbedres før denne metoden skal benyttes til presis bestemmelse av veksel driftfaktoren.

Hvor stor usikkerhet en aktivitet har, vil variere fra aktivitet til aktivitet. Eksempelvis er det kjent at forinjeksjon kan ende opp med å ta veldig mye lengre tid i enkelte situasjoner, men at ventilering sjelden tar veldig mye lengre tid. Med tanke på dette kan det være urimelig at aktivitetene forinjeksjon og ventilering skaleres på samme måte. Likevel, grunnet

sannsynlighetsfordelingers natur, vil verdier så ekstreme som P_5 og P_{95} kun opptre i totalt 10 % av tilfellene og det at skaleringen er upresis vil ikke ha så stor effekt. I videre arbeid med simuleringsmodellen og vekseldrift under usikkerhet oppfordres det til innhenting av data, slik at usikkerheten til de ulike aktivitetene kan bestemmes med større presisjon.

5.2.6 Tripplestimat

Tidlig ble det besluttet at det var ønskelig med en simuleringsmodell som la til rette for enkel og praktisk bruk i gruppeprosesser. Dette fordi en slik modell vil ha større verdi i den virkelige verden. Slik modellen er i dag, legger den til rette for dette gjennom ulike sannsynlighetsfordelinger som kan ta inn tripplestimat som anslag på varighetene til en aktivitet. Disse sannsynlighetsfordelingene er Pert-, Pertpg- og trekantfordelingen, der alle tar inn tripplestimat. Forfatterne vil oppfordre til å velge Pertpg-fordelingen, gitt at deltakerne er komfortable med det, i en gruppeprosess. Årsaken til dette er at Pert- og trekantfordelingen begge benytter seg av minimums- og maksimumsverdier for laveste og høyeste verdi. Dette er noe som kan være svært krevende å anslå, siden det eksempelvis kan være vanskelig å se for seg den lengste varigheten en aktivitet kan ha, hvis alt som kan gå galt går galt. I tillegg er det et poeng, som belyses i teorien, at de som skal estimere ikke nødvendigvis vet om de ennå har erfart den høyeste mulige varigheten eller ikke. Videre er det også viktig å skille mellom «normale» stokastiske variasjoner og force majeure-hendelser, men dette er veldig krevende.

Med bakgrunn i utfordringene knyttet til å estimere minimums- og maksimumsverdier oppfordres det dermed til å benytte seg av Pertpg-fordelingen ved tripplestimat i en gruppeprosess. Pertpg-fordelingen benytter seg av P_5 og P_{95} , istedenfor minimums- og maksimumsverdiene, som både vil være lettere å se for seg og lettere å basere på erfaringer.

I forbindelse med intervjuene var det ønskelig å teste om simuleringsmodellen og tripplestimat lot seg kombinere i praksis. Det ble derfor innhentet tripplestimat, som deretter ble benyttet i en simulering. Før tripplestimatene ble utarbeidet av intervjuobjektet ble standardtilfellet forsøkt beskrevet, slik at resultatene kunne sammenlignes med andre simuleringer. Ved hjelp av tripplestimat ble vekseldriftfaktoren beregnet gjennom simulering til 1,472. Til sammenligning ga simulering med beregnede varigheter for standardtilfellet, inkludert usikkerhet, en vekseldriftfaktor på 1,449.

Det er et avvik mellom vekseldriftfaktoren fra tripplestimatene og den fra de beregnede varighetene, men med tanke på at standardtilfellet kun kort ble beskrevet over Teams er det

helt naturlig at disse ikke samsvarer. Sett i ettertid kunne standardtilfellet blitt beskrevet bedre i intervjuet. Uansett viser dette at simuleringsmodellen, etter en kort prosess med innhenting av tripplestimat, er i stand til å levere en vekseldriftsfaktor som er relativt nær den som bestemmes med utgangspunkt i den mer tidkrevende prosessen med beregnede varigheter. I tillegg forenkler bruken av tripplestimat muligheten til å tilordne ulike aktiviteter ulik usikkerhet.

5.3 Vekseldriftsfaktoren

I dette underkapittelet diskuteres teorien og resultatene i forbindelse med forskningsspørsmålet:

(3) Hva påvirker vekseldriftsfaktoren, og hvordan påvirkes størrelsen på den?

5.3.1 Påvirkning av vekseldriftsfaktoren

Vekseldriftsfaktoren påvirkes når det oppstår skjevfordeling mellom stuffene, slik at den ene stuffen blir stående på vent. Gjentakende tilfeller med skjevfordeling vil påvirke vekseldriftsfaktoren betydelig, og potensielt ødelegge hele driftsopplegget. Skjevfordeling kan oppstå hvis det er tyngre sikring eller forinjeksjon på den ene stuffen slik at boreriggen heftes her, mens det ikke foregår aktivitet på den alternative stuffen. En løsning på dette er å dele opp mannskapet for å kompensere for skjevfordelingen. Dette kan dog ikke gjøres på fast basis, siden det medfører betydelig ekstra slitasje på mannskapet grunnet manglende pauser. Oppstår skjevfordelingen ofte, bør det da bemannes opp eller anskaffes mer utstyr. Ved å øke ressursene på denne måten, kan stuffene forhindre fra å bli helt avhengige av hverandre. Da kan det drives på den ledige stuffen, mens sikrings- eller eventuelt injeksjonsarbeidene, kan fortsette på den første stuffen. Det bør generelt etterstrebes å ha en størst mulig andel av de kostnadsbærende elementene i aktivitet og ikke på vent.

Bergets beskaffenhet vil i stor grad påvirke usikkerheten tilknyttet skjermboring og injisering, i tillegg til at tetthetskrav vil spille en viktig rolle. Denne usikkerheten har potensial til å påvirke vekseldriftsfaktoren betydelig. Varighetene til både skjermboring og injisering vil kunne variere stort, og særlig ved strenge tetthetskrav er injeksjonsarbeidene sannsynligvis totalt styrende for fremdriften. Hvorvidt det er hensiktsmessig med vekseldrift i slike tilfeller vil kunne være diskuterbart. Ofte kan det være fornuftig å sette på en ekstra borerigg, og eventuelt annet utstyr, slik at stuffene da kan operere uavhengig. Tidsavhengige kostnader

kan fort komme opp i 60-70 % for mange av aktivitetene i salvesyklusen, og følgelig er det viktig at det produseres mens utstyr og mannskap først er til stede. Risikovurderinger bør utføres, og det bør utredes hvilke muligheter som eksisterer dersom opprinnelig driftsopplegg ikke skulle fungere.

5.3.2 Variasjon i betingelsene

Simuleringsmodellene og det tilhørende rammeverket har laget et utgangspunkt for bestemmelse av vekseldriftfaktoren under usikkerhet. Simuleringsmodellene har vist seg å være veldig fleksible til både det å variere metode for å bestemme varigheter, men også til å simulere ulike prosjekttilfeller. Det lar seg enkelt gjøre å endre betingelsene, som dermed vil gi endrede varigheter og følgelig nye vekseldriftfaktorer. Dette gjør at simuleringsmodellen er et velegnet verktøy for å se hvordan vekseldriftfaktoren endrer seg med endrede betingelser. Per i dag finnes det lite teori om hvilke betingelser som påvirker vekseldriftfaktoren, og hvordan ulike betingelser påvirker vekseldriftfaktoren, spesielt under usikkerhet. Simuleringsmodellene og det tilhørende rammeverket er dermed et stort steg i riktig retningen for å avdekke hvilke betingelser som påvirker vekseldriftfaktoren og hvordan de påvirker den.

Det ble gjort simuleringer som en del av resultatet i masteroppgaven for å se på ulike variasjoner av betingelsene og deres påvirkning på vekseldriftfaktoren, og i det følgende vil disse betingelsene sin effekt diskuteres.

Tunnellengde

Det første som ble variert, var tunnellengden. Dette er en betingelse som enkelt endres i modellen. Det eneste som påvirkes av denne endringen er antall salvesykluser og hvor langt bilene må kjøre i prosessen med utlasting av massene. Slik modellen er bygget opp benyttes det ikke mellomagring for massene, som vil si at avstanden bilene må kjøre øker med økende tunnellengde. Tunnellengdene som ble brukt var 2 000 meter, 4 000 meter og 6 000 meter. Vekseldriftfaktorene ble henholdsvis 1,463, 1,449 og 1,435. Fra dette ser man at det er en reduksjon i vekseldriftfaktoren med økende tunnellengde. Det vil si at byggetiden ved enstuffsdrift øker mer enn byggetiden ved vekseldrift, når tunnellengden øker.

For å forstå hvorfor dette skjer må det først etableres en vesentlig forståelse for systemet. Slik systemet er bygget opp består det i hovedsak av to sløyfer. Den første sløyfen er de

aktivitetene som binder opp boreriggen: inntransport av boreriggen; eventuell sonderboring; eventuell forinjeksjon; bolting; salveboring; lading; og uttransport av boreriggen. Denne sløyfen vil i det videre omtales som boreriggsløyfen. Den andre sløyfen i systemet er sløyfen av aktiviteter som binder opp hjullasteren og lastebilene: lasting; transport av massene til deponi; dump; og transport tilbake fra deponi. Denne sløyfen vil omtales som lastesløyfen. De øvrige aktivitetene binder ikke opp noen ressurser, og vil dermed heller ikke være like vesentlige for å forstå endringene i vekseldriftfaktoren.

Slik modellen er bygget opp er varigheten til transport av masser til deponi og retur fra deponi en funksjon av distansen fra stuff til deponi. Det vil si at jo lenger inn i fjellet man har kommet, jo lenger varighet får disse aktivitetene. Det vil også si at den høyeste varigheten denne aktiviteten tar i løpet av én simulering vil være høyere for en lengre tunnel, siden det tar lenger tid å kjøre. Som en konsekvens av dette vil den gjennomsnittlige varigheten til transport av masser til deponi og retur fra deponi være høyere for en lengre tunnel. Altså, ved å øke tunnallengden vil lastesløyfen inneholde aktiviteter som får økt varighet.

Hvis man ser på aktivitetene i boreriggsløyfen, påvirkes ingen av disse med økende tunnallengde. Varigheten til inn- og uttransport av boreriggen er bygget opp slik at boreriggen aldri kan kjøre lenger enn avstanden til nærmeste kjørbare tverrslag. Hvis det ikke er etablert tverrslag enda, kjører boreriggen ut av tunnelen, men dette blir altså ikke lengre enn avstanden mellom kjørbare tverrslag. Dette betyr at transporten av boreriggen er uavhengig av tunnallengden, og ingen av aktivitetene i boreriggsløyfen er avhengig av tunnallengden.

Reduksjonen i vekseldriftfaktoren skyldes altså at varigheten til aktiviteter i lastesløyfen øker med økende tunnallengde, og at det er ingen økning i varigheten til aktiviteter i boreriggsløyfen. Grunnen til at dette reduserer vekseldriftfaktoren skyldes at det brukes mere tid i lastesløyfen, som medfører at boreriggen får «bedre tid» til å gjøre seg ferdig med boreriggsløyfen i den andre tunnelen. Eller med andre ord, siden lastesløyfen bruker lengre tid reduseres tiden til venting på at boreriggen skal bli ledig.

Dette kan også ses fra utnyttelsesgraden til de ulike ressursene i tabell 5.1. Disse tallene beregnes og hentes ut fra *Simuleringsmodell – Vekseldrift*.

Tabell 5.1: Utnyttelsesgrad - Vekseldrift ved varierende tunnallengde.

Utnyttelsesgrad [%]			
	2 000 meter	4 000 meter	6 000 meter
Borerigg	98,1	97,3	95,7
Hjullaster	13,7	13,6	13,3
Lastebiler	8,5	13,9	19,0

Fra tabell 5.1 kommer det tydelig frem at utnyttelsesgraden på lastebilene øker med økende tunnallengde, noe som underbygger påstanden om at det er økt varighet i lastesløyfen som bidrar til redusert vekseldriftfaktor. Fra tabell 5.1 ser man også at utnyttelsesgraden på boreriggen er nesten 100 %, som vil si at den er den kritiske ressursen i systemet. Med kritisk ressurs menes at det er boreriggen som skaper ventingen i systemet. Utnyttelsesgraden til boreriggen avtar svakt når utnyttelsesgraden på lastebilene øker. Det vil si at boreriggen blir en mindre kritisk ressurs, selv om den fortsatt er kritisk, og dette reduserer vekseldriftfaktoren.

Selv om resultatet ved første øyekast ser fornuftig ut, er det betimelig å spørre seg om dette egentlig er en reell situasjon. Først og fremst ville man trolig i en situasjon der lastebiler begynner å påvirke fremdriften, gått til anskaffelse av flere lastebiler, siden dette er relativt billige ressurser. Realiteten er at selv om vekseldriftfaktoren går ned, er disse resultatene forbundet med økt byggetid, og at byggetiden ved enstuffsdrift øker mer enn byggetiden ved vekseldrift. I et slikt tilfelle er det, som nevnt, naturlig å sette på flere lastebiler for å få ned byggetiden. Resultatet av dette vil bli en høyere vekseldriftfaktor, siden utlasting av masser vil gå raskere, og dermed får boreriggen «dårligere tid» på den andre stoffen. Dette kan også vises ved å sette inn 16 lastebiler, istedenfor 8 som i standardtilfellet, i simuleringsmodellen og bestemme vekseldriftfaktoren med dette. Dette presenteres i tabell 5.2.

Tabell 5.2: Byggetid for ulike tunnallengder og antall lastebiler.

Resultater	2 000 m	4 000 m	6 000 m
Byggetid – Enstuffsdrift [t]	8 192,4	16 397,8	24 809,7
Byggetid – Vekseldrift [t]	12 092,3	23 954,9	36 166,5
8 lastebiler			
Vekseldriftfaktor [-]	1,463	1,449	1,435
16 lastebiler			
Vekseldriftfaktor [-]	1,463	1,461	1,458

Fra tabell 5.2 ser man at vekseldriftfaktoren har gått opp i samtlige tilfeller med 16 lastebiler, bortsett fra for situasjonen med 2 000 meter tunnallengde der den er lik. Det man også kan se er at vekseldriftfaktoren i stor grad blir uavhengig av tunnallengden når det er nok lastebilressurser. I tillegg kan man, ved å sammenligne med tabell 4.11 i resultatene, se at byggetiden har gått ned i samtlige tilfeller. Dette illustrerer poenget med at resultatene trolig ikke er reelle, og viser at hvis driftsopplegget er hensiktsmessig planlagt vil vekseldriftfaktoren være uavhengig av tunnallengden.

Det andre som kan være problematisk med resultatene er at en 6 000 meter lang to-løps tunnel er et såpass stort prosjekt at både tverrslag og arbeid på hver sin side av fjellet er alternativer som hadde blitt vurdert. I slike tilfeller ville den totale tunnallengden blitt uvesentlig, og vekseldriftfaktoren ville igjen blitt uavhengig av tunnallengden.

Dermed kan det konkluderes med at ved et hensiktsmessig driftsopplegg vil vekseldriftfaktoren være uavhengig av tunnallengden. Likevel viser dette resultatet at det er et forhold mellom tidsbruken i boreriggsløyfen og tidsbruken i lastesløyfen som påvirker vekseldriftfaktoren. Det viser også at økende tidsbruk i lastesløyfen i dette tilfellet bidrar til redusert vekseldriftfaktor.

Tunneltverrsnitt

Den andre betingelsen som ble valgt å variere var tunneltverrsnittet. Tunneltverrsnittene som ble benyttet var T5,5, T10,5 og T12,5. Endringer i tunneltverrsnittet medførte endrede varigheter på følgende aktiviteter: eventuell forinjeksjon; bolting; salveboring; lading; ventilasjon; rensk; og sprøytebetong. For tunneltverrsnittene T5,5, T10,5 og T12,5 ble vekseldriftfaktorene henholdsvis 1,544, 1,449 og 1,395.

Fra dette ser man at det er en reduksjon i vekseldriftfaktoren med økende tunneltverrsnitt. Det vil si at byggetiden ved enstuffsdrift øker mer enn byggetiden ved vekseldrift, når tunneltverrsnittet øker. Igjen kan dette forklares ved å se på de to sløyfene, boreriggsløyfen og lastesløyfen. Av de to sløyfene er det kun aktiviteter i boreriggsløyfen som får endrede varigheter, og det er aktivitetene: eventuell forinjeksjon; bolting; salveboring; og lading.

Hvis man ser på endringen i summen av de mest sannsynlige varighetene for aktivitetene i boreriggsløyfen relativt til standardtilfellet, vil man se at varigheten reduseres med økende tunneltverrsnitt. Dette presenteres i tabell 5.3.

Tabell 5.3: Endring i mest sannsynlige varighet for boreriggsløyfen.

Endring i mest sannsynlige varighet for boreriggsløyfen [t]		
T5,5	T10,5	T12,5
39,2	0	-93,2

Fra tabell 5.3 ser man at tidsbruken i boreriggsløyfen er høyere for små tverrsnitt, og reduseres med økende tverrsnitt. Dette kan virke ulogisk, spesielt siden alle aktivitetene som endrer varighet får økt varighet med økende tverrsnitt, bortsett fra forinjeksjon. Faktum er det at forinjeksjon, slik det er beregnet, tar såpass mye lenger tid i små tverrsnitt at det dominerer varigheten til boreriggsløyfen. På samme måte tar også forinjeksjon såpass mye kortere tid ved større tverrsnitt at det dominerer.

Resultatet av dette er at økende tverrsnitt gir redusert varighet på boreriggsløyfen, som gjør at boreriggen er «raskere ferdig» på den andre stoffen, og vekseldriftfaktoren reduseres med økende tverrsnitt. I tillegg vil større tverrsnitt gi økte mengder masser som skal lastes ut. Dette vil bety at lastesløyfen må gjennomføres flere ganger, med økende tverrsnitt, for å få ut alle massene. Resultatet av dette er at boreriggen får bedre tid på den andre stoffen, som også vil bidra til å redusere vekseldriftfaktoren.

Oppsummert tar altså boreriggsløyfen kortere tid med økende tunneltverrsnitt, og lastesløyfen tar lengre tid med økende tunneltverrsnitt. På samme måte som for tunnallengden er det altså forholdet mellom tidsbruken i boreriggsløyfen og lastesløyfen som påvirker vekseldriftfaktoren. I dette tilfellet bidrar begge sløyfene til at «belastningen» på boreriggen går ned med økende tunneltverrsnitt, og følgelig reduseres også vekseldriftfaktoren med økende tunneltverrsnitt. Dette kan også tolkes som at boreriggen blir en mindre kritisk ressurs med økende tunneltverrsnitt.

For tunneltverrsnittet kan det følgelig konkluderes med at økende tunneltverrsnitt reduserer vekseldriftfaktoren. Det bør også poengteres den dominerende effekten forinjeksjon har, siden dette er den eneste varigheten som øker med synkende tverrsnitt, og flere andre aktiviteter får økt varighet. Likevel er det nok til å dominere den mest sannsynlige varigheten til boreriggsløyfen.

En viktig bemerkning med denne konklusjonen er at den er dratt med utgangspunkt i at det er forinjeksjon. Siden forinjeksjon er såpass dominerende, er det rimelig å anta at det har en stor effekt på vekseldriftfaktoren og at uten dette ville ikke bildet nødvendigvis blitt like tydelig.

Likevel, siden lastesløyfen også bidrar til synkende vekseldriftfaktor ville trolig trenden blitt den samme uten forinjeksjon, dog noe svakere.

Bolte- og sprøytebetongmengder

Bolte- og sprøytebetongmengdene ble også variert, for å se hvordan dette påvirker vekseldriftfaktoren. De ulike variasjonene er her benevnt som: reduserte mengder; standardtilfellet; og økte mengder. Nærmere beskrivelse av hva dette innebærer kan ses i *4.3.3 Variasjon i betingelsene*. For de ulike mengdene, fra reduserte til økte mengder, ble vekseldriftfaktorene henholdsvis 1,457, 1,449 og 1,446.

Dette viser en svak tendens til at økende bolte- og sprøytebetongmengder fører til redusert vekseldriftfaktor. For denne variasjonen er det kun varigheten til to aktiviteter som endres med endrede mengder. Den første aktiviteten er bolting, som inngår i boreriggsløyfen. Den andre aktiviteten er sprøytebetong. Slik det tidligere er definert, inngår ikke sprøytebetong i noen av sløyfene, og dette skyldes at sprøytebetong hverken binder opp boreriggen eller hjullasteren og lastebilene. Likevel vil aktiviteten med sprøytebetong i stor grad påvirke systemet på samme måte som lastesløyfen. Ved økt tidsbruk i en aktivitet som ikke binder opp boreriggen får boreriggen «bedre tid» på den andre stoffen, og vekseldriftfaktoren går ned. I motsatt fall vil redusert tidsbruk i en aktivitet som ikke binder opp boreriggen gir boreriggen «dårligere tid», og vekseldriftfaktoren går opp.

Med økende bolte- og sprøytebetongmengder får bolting økt varighet, og dermed får boreriggsløyfen økt varighet. Sprøytebetong får også økt varighet for økende mengder, bortsett fra for reduserte mengder som er likt som standardtilfellet.

Som beskrevet ovenfor vil dette medføre to motstridende effekter. Økt varighet i boreriggsløyfen bidrar til økt vekseldriftfaktor. Økt varighet utenfor boreriggsløyfen gir boreriggen «bedre tid», og dermed lavere vekseldriftfaktor. I dette tilfellet ble effekten av økt varighet utenfor boreriggsløyfen, altså for sprøytebetongen, svakt dominerende over effekten fra boreriggsløyfen.

Ut fra dette er det ikke mulig å trekke en konklusjon, annet enn at økte bolte- og sprøytebetongmengder påvirker vekseldriftfaktoren på en motstridende måte og i stor grad nuller ut hverandre. Vekseldriftfaktorene er såpass like, at med små justeringer på betingelsene kunne tendensen vært motsatt, eller de kunne tatt samme verdier.

Det som er interessant med dette resultatet er at det indikerer at alle aktiviteter som ikke inngår i boreriggsløyfen påvirker vekseldriftfaktoren på samme måte som lastesløyfen, som er diskutert tidligere. Det vil si at for aktiviteter utenfor boreriggsløyfen gir økt varighet redusert vekseldriftfaktor, og vice versa. Dette kan forklares, som gjort tidligere, med at en økning i varigheten alle aktiviteter som ikke binder opp boreriggen gir boreriggen «bedre tid» til å utføre arbeidet på den andre stuffen.

Injeksjonsmengder

For forinjeksjon ble det simulert to ulike varianter. Den første tok for seg en variasjon i mengden tørrsement per løpemeter tunnel. De ulike mengdene tørrsement per løpemeter ble 125 kg, 580 kg, og 1 000 kg, og ga vekseldriftfaktorer på henholdsvis 1,219, 1,449 og 1,569.

Den andre varianten tok for seg variasjon av forekomsten av injeksjonsbehov lang tunnelen. Dette ble gjort med utgangspunkt i en tunnallengde på 4 000 meter, og ble variert mellom et behov på: 0 meter med forinjeksjon eller 0 %; 2 000 meter med forinjeksjon eller 50 %; og 4 000 meter forinjeksjon eller 100 %. Vekseldriftfaktorene ble henholdsvis 1,110, 1,315 og 1,449. Den observante leser har fanget opp at vekseldriftfaktoren på 1,449 forekommer i begge variasjonene, og dette er fordi de beskriver samme situasjon, nemlig standardtilfellet.

For begge variantene er det helt tydelig at injeksjonsmengder har en tydelig effekt på vekseldriftfaktoren. Økte injeksjonsmengder gir økt vekseldriftfaktor, uten tvil.

Den første varianten medfører at varigheten til aktiviteten forinjeksjon øker med økende mengde tørrsement per løpemeter, og det ganske mye. For de ulike mengdene tørrsement på 125 kg, 580 kg og 1 000 kg ble mest sannsynlige varighet for forinjeksjon henholdsvis 341,9 timer, 1 554,0 timer og 2 672,9 timer. Dette er en stor økning i varigheten, og det vil medføre en stor økning i varigheten til boreriggsløyfen. Som det er vist flere ganger tidligere, vil en økning i varigheten til boreriggsløyfen medføre en økning i vekseldriftfaktoren. Dette bekrefter nok en gang dette, og viser at forinjeksjon alene kan endre vekseldriftfaktoren fra 1,219 og helt til 1,569.

Den andre varianten endrer ikke på varigheten til forinjeksjon, men ser i stedet på hvordan forekomsten eller hyppigheten av forinjeksjon påvirker vekseldriftfaktoren. Slik standardtilfellet er satt opp er det behov for forinjeksjon i hele tunnelen, altså 100 % forekomst med 580 kg tørrsement per løpemeter. Det vil si at aktiviteten forinjeksjon skjer hver fjerde salve, siden én injeksjonsskjerm dekker de tre neste salvene pluss én salve

overlapp. Hvis man i stedet reduserer behovet til forinjeksjon til halvparten av tunnelen, eller 50 %, vil aktiviteten forinjeksjon i snitt inntreffe hver åttende salve. På samme måte vil aktiviteten aldri inntreffe hvis det ikke er behov for forinjeksjon, eller 0 % forekomst.

Forekomsten eller hyppigheten til forinjeksjon påvirker altså ikke varigheten til forinjeksjonen, men det vil påvirke varigheten til boreriggsløyfen de gangene det oppstår et behov for forinjeksjon. Derfor vil økt forekomst eller hyppighet av forinjeksjon gi økt gjennomsnittlig varighet for boreriggsløyfen, og dermed medføre en økning i vekseldriftfaktoren. I denne variasjonen vises det igjen hvor mye forinjeksjon kan påvirke vekseldriften. Fra 0 % forinjeksjon i tunnelen til 100 % forinjeksjon i tunnelen endres vekseldriftfaktoren fra 1,110 til 1,449.

Begge disse variantene viser hvor stor påvirkning injeksjonsmengdene har på vekseldriftfaktoren. De som husker godt, husker at dette også var tilfellet for endringen i tunneltverrsnitt. Selv om de fleste aktivitetene i boreriggsløyfen fikk økt varighet med økende tunneltverrsnitt gikk den totale varigheten til boreriggsløyfen ned, da varigheten til forinjeksjon virket motsatt og ble dominerende. Dette bekrefter den store effekten forinjeksjon har på vekseldriftfaktoren.

Variasjon i både tunnellengde og injeksjonsmengde

I et intervju ble det etablert en tanke om at ved kortere tunnellengder ville tunnellengden dominere vekseldriftfaktoren over effekten fra forinjeksjon. I motsatt fall, ved større tunnellengder, ville forinjeksjon dominere effekten fra tunnellengden på vekseldriftfaktoren.

Fra tidligere er det etablert at vekseldriftfaktoren er avtakende med økende tunnellengde, men at dette kun er tilfellet ved et uhensiktsmessig driftsopplegg med for få lastebiler. Altså er det allerede konkludert med at, gitt et hensiktsmessig driftsopplegg, vekseldriftfaktoren er uavhengig av tunnellengden. Men før denne konklusjonen falt, ble det gjennomført simuleringer der tunnellengden og injeksjonsmengden ble variert sammen.

Med utgangspunkt i konklusjonen om at vekseldriftfaktoren er uavhengig av tunnellengden, kan det virke meningsløst å fortsatt beholde disse resultatene. Grunnen til at dette fortsatt presenteres, selv om det er et uhensiktsmessig driftsopplegg, er at dette likevel representerer en situasjon med variasjoner som har motstridende effekt på vekseldriftfaktoren. Som allerede kjent gir det uhensiktsmessige driftsopplegget redusert vekseldriftfaktor med økende tunnellengde, og også som kjent øker vekseldriftfaktoren med økende mengde forinjeksjon.

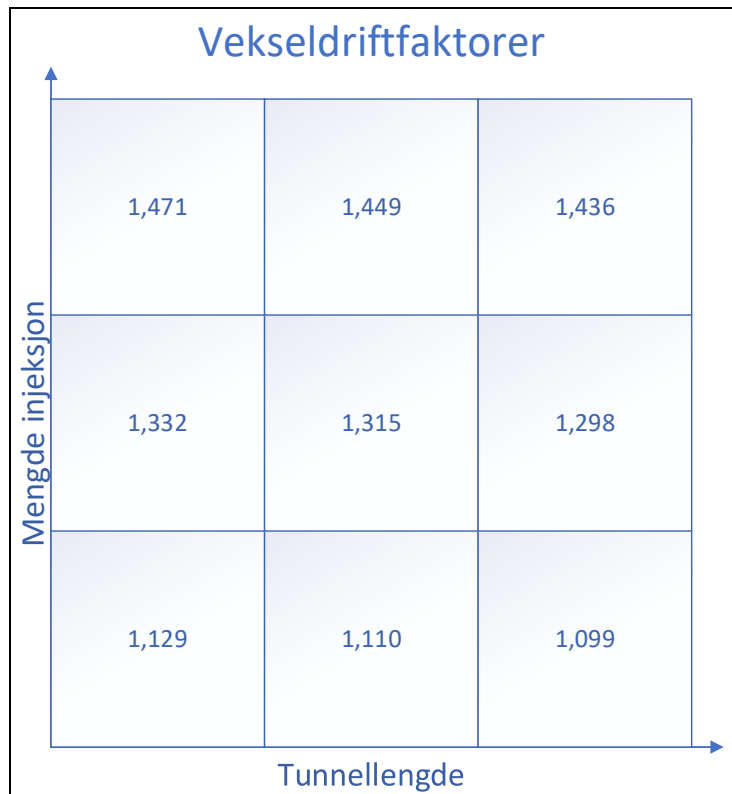
Altså virker endringene i hver sin retning på vekseldriftfaktoren. Så selv om situasjonen ikke nødvendigvis er reell, vil den bidra til å forstå systemet og sammenhengen mellom boreriggsløyfen og lastesløyfen.

Variasjonene ble utført med følgende betingelser, fra minst til størst, for tunnallengdene: 2 000 meter tunnallengde; 4 000 meter tunnallengde; og 6 000 meter tunnallengde.

Injeksjonsmengdene ble variert med utgangspunkt i endret forekomst av injeksjonsbehov, fra minst til størst, med følgende betingelser: 0 % av tunnallengden med forinjeksjon; 50 % av tunnallengden med forinjeksjon; og 100 % av tunnallengden med forinjeksjon. Dette førte til ni simuleringer, og vekseldriftfaktorene ble som det presenteres i figur 5.1.

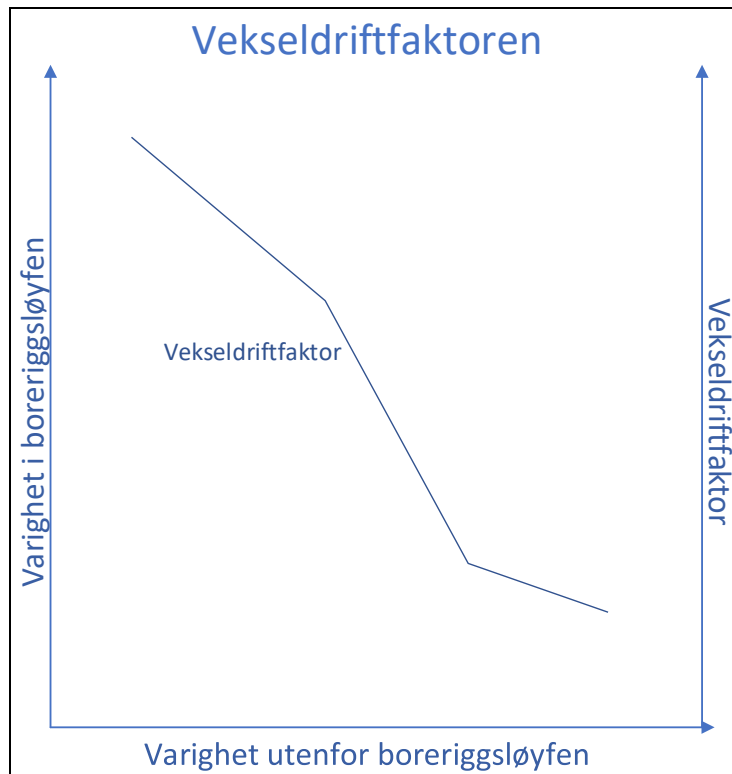
Vekseldriftfaktoren nederst til venstre i figur 5.1 representerer situasjonen med 2 000 meter tunnallengde og 0 % av tunnallengden med forinjeksjon. På samme måte representerer vekseldriftfaktoren øverst til høyre i figur 5.1 situasjonen med 6 000 meter tunnallengde og 100 % forinjeksjon, og videre fungerer det på samme måte for de mellomliggende verdiene.

Det man ser fra figur 5.1 er at situasjonen med høyest tunnallengde og lavest mengde injeksjon er den situasjonen som gir lavest vekseldriftfaktor. Motsatt er det situasjonen med høyest mengde injeksjon og lavest tunnallengde som gir den høyeste vekseldriftfaktoren. Tidligere har alle situasjoner som har bidratt til økt varighet på boreriggsløyfen gitt høyere vekseldriftfaktor. Situasjoner som har bidratt til økt varighet på lastesløyfen, eller på andre aktiviteter som ikke tilhører noen av sløyfene, har gitt redusert vekseldriftfaktor. Denne variasjonen i både tunnallengde og injeksjonsmengde illustrerer nok en gang dette. Videre illustrerer variasjonen nok en gang hvor stor effekt forinjeksjon har på vekseldriften. Uansett hvilken situasjon man tar som utgangspunkt, gir en økning i mengden forinjeksjon en økning på et sted mellom 0,1 og 0,2 i vekseldriftfaktoren.



Figur 5.1: Vekseldriftfaktorer ved variasjon i både tunnallengde og injeksjonsmengde.

Siden økende mengde injeksjon representerer økt varighet i boreriggsløyfen, og økt tunnallengde representerer økt varighet i lastesløyfen kan denne figuren utvides til det mer generelle tilfellet illustrert i figur 5.2. Figuren illustrer at økende varighet for boreriggsløyfen gir økt vekseldriftfaktor, og at økende varighet for lastesløyfen og aktivitetene utenfor begge sløyfene gir redusert vekseldriftfaktor. Det må presiseres at dette kun er en illustrasjon av sammenhengen, og at denne sammenhengen kun er gyldig for vekseldrift der boreriggen er den kritiske ressursen. I eksempelvis et tilfelle der det veksles, eller deles, på lastesystemet, og det benyttes to borerigger ville sammenhengen blitt en helt annen.



Figur 5.2: Sammenheng mellom vekseldriftfaktor og varighet i og utenfor boreriggsløyfen.

Denne måten å forstå vekseldriftfaktoren på, og dens følsomhet for endrede betingelser, der det ses på forholdet mellom varigheten til boreriggsløyfen og varigheten utenfor boreriggsløyfen, skiller seg fra definisjonen for beregning av vekseldriftfaktoren i veilederen for *Tunnelbyggetid 2021*, slik forfatterne forstår det. I veilederen ses det på forholdet mellom sum av tid til sikring og injeksjon, og sum av tid til sprengning, som er en annen forståelse av vekseldriftfaktoren.

Variasjonen med både tunnallengde og injeksjonsmengde har nok en gang vist at forinjeksjon er en aktivitet som har stor effekt på vekseldriftfaktoren. Variasjonen har også bekreftet at det er et forhold mellom varigheten til boreriggsløyfen og varigheten utenfor boreriggsløyfen som bestemmer vekseldriftfaktoren, og at det finnes utallige kombinasjoner av betingelser som igjen betyr at det finnes utallige vekseldriftfaktorer. Økende varighet for boreriggsløyfen gir økt vekseldriftfaktor, og økende varighet utenfor boreriggsløyfen gir redusert vekseldriftfaktor.

Konklusjonen er at det ikke finnes et bestemt sett med universelle vekseldriftsfaktorer som kan anvendes på ethvert prosjekt, men at vekseldriftfaktoren avhenger av forholdet mellom varigheten til boreriggsløyfen og varigheten til aktivitetene utenfor boreriggsløyfen. I tillegg

kan det konkluderes med at forinjeksjon uten tvil er den aktiviteten som påvirker vekseldriftfaktoren mest.

5.3.3 Sammenligning av vekseldriftfaktorer

Vekseldriftfaktorene som er beregnet med simuleringmodellene sammenstilles i tabell 5.4. Det er tydelig at forinjeksjon er det forholdet som har størst innvirkning på vekseldriftfaktoren. *Lav* viser til tunnallengde på 2 000 m, lave bolte- og sprøytebetongmengder, lave injeksjonsmengder, injeksjonsforekomst på 0 % og tverrsnitt på 39,1 m². *Middels* viser til tunnallengde på 4 000 m, middels bolte- og sprøytebetongmengder, middels injeksjonsmengder, injeksjonsforekomst på 50 % og tverrsnitt på 74,6 m². *Høy* viser til tunnallengde på 6 000 m, høye bolte- og sprøytebetongmengder, høye injeksjonsmengder, injeksjonsforekomst på 100 % og tverrsnitt på 91,3 m².

Tabell 5.4: Vekseldriftfaktorer for ulike mengder.

Vekseldriftfaktorer [-]			
	Lav	Middels	Høy
Tunnallengde	1,463	1,449	1,435
Bolte- og sprøytebetongmengde	1,457	1,449	1,446
Injeksjonsmengde	1,219	1,449	1,569
Injeksjonsforekomst	1,110	1,315	1,449
Tverrsnitt	1,544	1,449	1,395

Eksisterende beregnede vekseldriftfaktorer foreligger i *PROSJEKTRAPPORT 2F-99 TUNNELDRIFT Enhetstidssystem for driving, sikring og innredning*, heretter kalt *prosjektrapport*, og vises på nytt i figur 5.3.

Utstys -komb.	Tverrsnitt [m ²]													
	10	16	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	*	1,28	*	1,26	*	1,14	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1,24	*	1,13	*	1,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	1,19	1,15	1,10	1,07	1,09	1,11	1,14	1,16	1,17	1,19
4	-	-	-	-	1,3	1,29	1,31	1,28	1,31	1,28	1,25	1,23	1,21	1,20

Figur 5.3: Eksisterende vekseldriftfaktorer (Hermann et al., 1999).

De vekseldriftfaktorene det er aktuelt å sammenligne med er de som tilhører utstyrskombinasjon 4, som innebærer lasting med hjullaster og utkjøring med lastebiler. De utvalgte vekseldriftfaktorene fra simuleringsmodellen stammer fra variasjonen av tunneltverrsnitt, da det er kun tunneltverrsnittet som varieres i prosjektrapporten, utover utstyrskombinasjoner. Det ses at det er en åpenbar forskjell mellom vekseldriftfaktorene i prosjektrapporten og de fra simuleringsmodellene. Sammenligning av vekseldriftfaktorene for ulike tverrsnitt vises i tabell 5.5. Enkel interpolering er utført for å finne vekseldriftfaktoren for 75 m². Faktorene for de andre aktuelle tverrsnittene tas ut for 40 og 90 m², siden dette er omtrent den samme størrelsen som tverrsnittene til henholdsvis T5,5 og T12,5.

Tabell 5.5: Eksisterende vekseldriftfaktorer og beregnede fra simuleringsmodell.

Vekseldriftfaktorer [-]			
	T5,5 (39,1 m ²)	T10,5 (74,6 m ²)	T12,5 (91,3 m ²)
Prosjektrapport	1,290	1,300	1,250
Simuleringsmodell	1,544	1,449	1,395

Vekseldriftfaktorene fra prosjektrapporten legger dog til grunn kun standard bolting av sikringsaktivitetene, og det tas ikke høyde for forinjeksjon, sonderboring og sprøytebetong. Vekseldriftfaktorene fra simuleringsmodellene tar høyde for alt dette, og dermed kan egentlig ikke vekseldriftfaktorene sammenlignes direkte. Som vist tidligere, påvirker aktiviteter som ligger innenfor boreriggsløyfen vekseldriftfaktoren positivt, og drar den opp. I dette tilfellet vil da sonderboring og forinjeksjon dra opp vekseldriftfaktoren, og da dette ikke hensyntas i prosjektrapporten, er det naturlig at vekseldriftfaktorene fra simuleringsmodellene

blir større. En annen viktig forskjell mellom simuleringsmodellene og de eksisterende vekseldriftfaktorene, er at simuleringsmodellene hensyntar usikkerhet. Denne usikkerheten ligger i hver enkelt aktivitet i salvesyklusen, og vil totalt sett kunne påvirke vekseldriftfaktoren betydelig. Som allerede vist, vil usikkerheten medføre både høyere byggetid og en høyere vekseldriftfaktor.

Det er også vist at forinjeksjon er en stor pådriver for økning av vekseldriftfaktoren, som også kan ses av sammenligningen. Følgelig kan det sies at sonderboring, og særlig forinjeksjon, er aktiviteter som må hensyntas i beregning av vekseldriftfaktoren. Likevel kan det være snakk om prosjekter der det ikke forekommer forinjeksjon, og i slike tilfeller vil vekseldriftfaktoren trolig ligge noe lavere enn resultatene fra simuleringsmodellene. I den forbindelse har det vært aktuelt å se på forekomsten av forinjeksjon i tunneler. Altså ikke variasjon av mengden tørrsement per løpemeter tunnel, men prosentvis andel av tunnelen som forinjiseres, med 580 kg tørrsement per løpemeter tunnel som standard, slik som standardtilfellet illustrerer. Tabell 5.6 viser vekseldriftfaktorene tilhørende 0 %, 50 % og 100 % andel med forinjeksjon, for T10,5-tverrsnitt.

Tabell 5.6: Vekseldriftfaktorer for andel med injeksjon.

Tunnellengde: 4000 meter			
Injeksjonsforekomst [%]	0 %	50 %	100 %
Vekseldriftfaktor [-]	1,110	1,315	1,449

Det er klart at det ikke bare er mengden injeksjon som har betydning, men også forekomsten. Fra en situasjon helt uten forinjeksjon, til en situasjon med systematisk forinjeksjon gjennom hele tunnelen, er det et spenn i vekseldriftfaktoren på 0,339. Vekseldriftfaktoren for 0 % forekomst av forinjeksjon på 1,110, er den mest sammenlignbare verdien med prosjektrapporten. Vekseldriftfaktoren for T10,5 er 1,300 fra prosjektrapporten, men her hensyntas ikke sprøytebetong i salvesyklusen. Som vist tidligere vil aktiviteter som ligger utenfor boreriggsløyfen redusere vekseldriftfaktoren, og er en del av forklaringen på hvorfor simuleringsmodellen kommer ut med en såpass mye lavere vekseldriftfaktor enn prosjektrapporten, med en forskjell på 0,200.

Denne verdien er uansett noe lavere enn hva oppgaveforfatterne forventet. Andre forhold som kan ha påvirket dette utover sprøytebetong, er at det går mer tid i lastesløyfen i simuleringsmodellene, slik at vekseldriftfaktoren reduseres ytterligere. Som vist tidligere er

en tunnallengde på 4 000 m, med standardtilfellets åtte lastebiler, et u hensiktsmessig driftsopplegg og vil gi en lavere vekseldriftfaktorer enn det som er naturlig. Særlig gjør dette seg gjeldende når det ikke er forinjeksjon, siden dette medfører at det går kortere tid i boreriggsløyfen i tillegg til at tunnallengden gjør at det går mer tid i lastesløyfen. Dette elementet gjelder da egentlig alle vekseldriftfaktorene, slik at de beregnede vekseldriftfaktorene fra simuleringsmodellene i realiteten burde vært noe høyere.

Sammenlignet med *Tunnelbyggetid 2021*, der vekseldriftfaktoren anbefales satt til 1,4 eller lavere ved lite sikring og forinjeksjon, og til 1,5 eller høyere ved mye sikring og forinjeksjon, er det også her en forskjell. Lite forinjeksjon i relasjon til simuleringsmodellene betyr lite injeksjonsmengde i form av mengde tørrsement per løpemetertunnel og gir 1,219 og er betydelig lavere enn 1,4. I motsatt ende gir en stor injeksjonsmengde en vekseldriftfaktor på 1,569, og er noe høyere enn 1,5. Usikkerheten tilknyttet byggetidene som er grunnlaget for beregning av vekseldriftfaktorene er i tillegg av en størrelse som kan gi betydelige utslag på vekseldriftfaktoren og trekke den både mer opp, og lengre ned.

Generelt er det tydelig at spennet mellom laveste og høyeste vekseldriftfaktor er høyere enn hva som både er beregnet tidligere i prosjektrapporten og det som anbefales i forbindelse med *Tunnelbyggetid 2021*. Størrelsen til vekseldriftfaktoren vil avhenge av flere forhold, enkelte mer enn andre. Av beregningene fra simuleringsmodellen vises det at vekseldriftfaktoren er mest følsom for endringer i tverrsnitt, injeksjonsmengde og forekomsten av forinjeksjon. Effekten fra endring i tverrsnittet skyldes faktisk hovedsakelig også hvordan varigheten til forinjeksjon endrer seg med tverrsnittet. Så det er helt tydelig at særlig forinjeksjon har potensial til å dra vekseldriftfaktoren mye både opp og ned, og medføre både lavere og høyere vekseldriftfaktorer enn hva som har vært tilfellet frem til i dag. Denne konklusjonen bekrefter også delvis det som ble sagt i intervjuene, der det ble fremhevet at injeksjon har potensial til å være totalt styrende for fremdriften.

Dette viste spennet i vekseldriftfaktoren kan i de fleste tilfeller medføre at tunnelbyggetiden er satt feil i kontrakten, når dagens praksis legges til i estimeringen av tunnelbyggetiden. Naturligvis kan dette medføre kontraktuelle utfordringer, slik at det oppstår uenigheter som kan ende i retten til slutt, og koste partene store summer.

6. Konklusjon

Dette hovedkapittelet presenterer konklusjonene som er gjort med bakgrunn i funnene og svarer ut forskningsspørsmålene.

I det følgende presenteres konklusjonene relatert til det første forskningsspørsmålet:

(1) Hvilke kontraktuelle elementer er særlig utfordrende i forbindelse med vekseldrift og tunnelbyggetid?

Særlig utfordrende kontraktuelle elementer i forbindelse med vekseldrift og tunnelbyggetid er identifisert til å være: forhøyet risiko tilknyttet grunnforhold, utstyr og mannskap; og måter og metoder for håndtering av endrede mengder og byggetid. Disse punktene har potensial til å medføre uenigheter som kan eskalere til konflikter. Feil vekseldriftfaktorer kan føre til tunnelbyggetider som er beregnet på feil grunnlag. Dermed vil ikke disse tunnelbyggetidene være representative, og kan medføre ytterligere konfliktgrunnlag.

Videre besvares det andre forskningsspørsmålet:

(2) Hvordan kan vekseldriftfaktoren bestemmes under usikkerhet, og har denne usikkerheten eventuelt noen betydning?

Vekseldriftfaktor under usikkerhet kan bestemmes ved å utføre diskret hendelsessimulering, som muliggjør å inkludere usikkerhet i anslagene, samtidig som parallelle nærkritiske vegger hensyntas. Dette gjøres gjennom simuleringsmodellene *Simuleringsmodell – Enstuffsdrift* og *Simuleringsmodell – Vekseldrift* med det tilhørende rammeverket *Rammeverk – Vekseldriftfaktor*. Benyttes dette kan utallige reelle og konseptuelle tunnelprosjekter simuleres og vekseldriftfaktorer bestemmes.

Simuleringsmodellene sin mulighet til å kombinere deterministiske varigheter og stokastiske varigheter med ulike sannsynlighetsfordelinger gjør at usikkerheten i hele nettverket gjenspeiles mer korrekt, og følgelig hensyntar byggetiden i større grad den reelle usikkerheten. Simuleringene viste at når usikkerhet inkluderes øker byggetiden og vekseldriftfaktoren i alle tilfeller, og fremtidige beregninger av vekseldriftfaktorer bør følgelig inkludere usikkerhet.

Simuleringsmodellene er også kompatible med tripplestimat. Usikkerheten til aktivitetene tilordnes enklere med denne metoden, men gir fortsatt representative vekseldriftfaktorer.

Avslutningsvis svares det tredje forskningsspørsmålet ut:

(3) Hva påvirker vekseldriftfaktoren, og hvordan påvirkes størrelsen på den?

Vekseldriftfaktoren påvirkes når det oppstår skjevfordeling mellom stoffene, slik at den ene stoffen blir stående på vent. Simuleringsmodellene og det tilhørende rammeverket er et steg i riktig retning for å avdekke hvilke betingelser som påvirker vekseldriftfaktoren og hvordan de påvirker den. De ulike betingelsene påvirker vekseldriftfaktoren på følgende måte:

- Ved et hensiktsmessig driftsopplegg vil vekseldriftfaktoren være *uavhengig av tunnallengden*.
- For variasjon i tunneltverrsnittet kan det konkluderes med at *økt tunneltverrsnitt reduserer vekseldriftfaktoren*. En viktig bemerkning med denne konklusjonen er at den er dratt med utgangspunkt i at det er forinjeksjon.
- For bolte- og sprøytebetongmengder er det ikke mulig å trekke en konklusjon, annet enn at *økte bolte- og sprøytebetongmengder påvirker vekseldriftfaktoren på en motstridende måte og i stor grad nuller ut hverandre*.
- For forinjeksjon ble det simulert to ulike varianter: mengde tørrsement per løpemeter; og forekomst av injeksjonsbehov. *For begge varianter gir økte mengder forinjeksjon økende vekseldriftfaktor*.

Vekseldriftfaktoren er uten tvil mest følsom for endrede mengder forinjeksjon, og de to variantene av forinjeksjon kan alene endre vekseldriftfaktoren henholdsvis fra 1,219 til 1,569 og fra 1,110 til 1,449. Generelt er det tydelig at spennet mellom laveste og høyeste vekseldriftfaktor er høyere enn hva som både er beregnet tidligere i prosjektrapporten og det som anbefales i forbindelse med *Tunnelbyggetid 2021*.

Variasjonen med både tunnallengde og injeksjonsmengde viste at det ikke finnes et bestemt sett med universelle vekseldriftsfaktorer som kan anvendes på ethvert prosjekt.

Vekseldriftfaktoren avhenger av forholdet mellom varigheten til boreriggsløyfen og varigheten til aktivitetene utenfor boreriggsløyfen, og det finnes utallige kombinasjoner av betingelser som igjen betyr at det finnes utallige vekseldriftsfaktorer.

7. Videre arbeid

De utviklede simuleringsmodellene med tilhørende rammeverk har vist seg å fungere godt til sitt bruk. Likevel er det enkelte aspekter som er aktuelt å videreutvikle for ytterligere forbedring. Disse aspektene lot seg ikke hensynta i denne oppgaven, da hovedfokuset har vært å bygge to simuleringsmodeller med tilhørende rammeverk for å bestemme vekseldriftfaktoren under usikkerhet fra grunnen.

Først og fremst oppfordres det i det videre arbeidet med simuleringsmodellene og vekseldriftsfaktor under usikkerhet til innhenting av data på varigheten til de ulike aktivitetene i salvesyklusen. Dette gjør at usikkerheten og dermed sannsynlighetsfordelingene til de ulike aktivitetene kan bestemmes med større presisjon.

Da dette er det første steget i utviklingen av simuleringsmodeller som benytter diskret hendelsessimulering for beregning av vekseldriftfaktor under usikkerhet, var prioriteringen å få på plass det elementære. Optimalt ville tyngre sikring, i form av forbolting og sprøytebetongbuer, blitt hensyntatt, men det krever mulighet for reduserte salvelengder, og ville komplisert arbeidet med simuleringsmodellene unødvendig mye i første omgang. Derfor oppfordres det også til å hensynta dette i utviklingen av fremtidige simuleringsmodeller.

Faktorer som skiftordninger, skytetider og lignende vil i realiteten påvirke vekseldriftfaktoren. Dette er dog faktorer som ikke lot seg implementere i simuleringsmodellene grunnet begrensninger i simuleringsverktøyet. Derfor oppfordres det til å hensynta også dette ved videreutvikling.

Skulle det være ønskelig å se på andre varianter av vekseldrift enn varianten med to parallelle tunnellop der borerigg og lastesystem deles mellom stoffene, må dette utvides i det videre arbeidet.

Litteraturliste

AMV. (u.å.). *AMV 11,5 QR/QR-H*. AMV. Hentet 28. april 2022, fra <https://www.amv-as.no/amv-11swl1000qr-h>

Arbeidstilsynet. (u.å.). *Om regelverket*. Hentet 30. november 2021, fra <https://www.arbeidstilsynet.no/regelverk/om-regelverket/>

Austeng, K., Midtbø, J. T., Jordanger, I., Magnussen, O. M., & Torp, O. (2005). *Usikkerhetsanalyse—Kontekst og grunnlag* (s. 167). Concept-programmet.

Aveyard, H. (2019). *Doing a Literature Review in Health and Social Care: A Practical Guide* (4. utg.). Open International Publishing Limited.

<https://web.p.ebscohost.com/ehost/ebookviewer/ebook/bmxlYmtfXzY5NzU5MV9fQU41?sid=5ce402c0-3c34-4500-aea3-6a44ee45c719@redis&vid=0&format=EB&rid=1>

Babulak, E., & Wang, M. (2010). *Discrete Event Simulation: State of the Art* (s. 1–9). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2068.1767>

Bruland, A. (2013a). *Kompendium i anleggsteknikk—Fjellsprengningsteknikk: Boring i fjell*.

Bruland, A. (2013b). *Kompendium i anleggsteknikk—Sprengning og masseflytting under jord: Bruk av undergrunnen*.

Bruland, A. (2013c). *Kompendium i anleggsteknikk—Sprengning og masseflytting under jord: Drivemetode og utstyr*.

Bruland, A. (2013d). *Kompendium i anleggsteknikk—Sprengning og masseflytting under jord: Sprengningsplaner*.

Bruland, A., Helle Nakstad, G., Roald, S., & Johannessen, O. (1999). *Project Report 19-99 UNDERWATER TUNNEL PIERCING*. NTNU - ANLEGGSDRIFT.

Casad, B. J. (2016, august 1). *Confirmation bias | Definition, Background, History, & Facts | Britannica*. <https://www.britannica.com/science/confirmation-bias>

Codex Advokat. (2020, oktober 15). *Dagmulkt | Entreprisekontrakter | Spør advokaten!* Entrepriserettsadvokater.no.

<https://www.entrepriserettsadvokater.no/entreprisekontrakter/dagmulkt/>

- Drevland, F. (2013). *Kostnadsestimering under usikkerhet*. Concept-programmet. https://www.ntnu.no/documents/1261860271/1262010610/CONCEPT_kostnadsestimering_til+WEB.pdf/7fe95f32-0477-4468-b0e5-54589687c16d
- Drevland, F., Austeng, K., & Torp, O. (2005). *Usikkerhetsanalyse—Modellering, estimering og beregning* (s. 121). Concept-programmet.
- DSB. (2019, mars). *Bergsprengning: Veiledning til kapittel 10 | Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap*. <https://www.dsb.no/lover/farlige-stoffer/eksplosiver/veiledning-til-eksplosivforskriften-kap.-10/#-88-krav-til-boring>
- EZStrobe. (2022, april 27). EZStrobe. <https://www.ezstrobe.org/ezstrobe>
- Forskrift om tiltaks- og grenseverdier. (2021). *Forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier for fysiske og kjemiske faktorer i arbeidsmiljøet samt smitterisikogrupper for biologiske faktorer (forskrift om tiltaks- og grenseverdier)* (FOR-2021-06-28-2248). Arbeids- og inkluderingsdepartementet. <https://lovdata.no/forskrift/2011-12-06-1358>
- Grendal, A., Johansen, T., & Boge, K. (2014). *Konvensjonelle drivemetoder*.
- Grønmo, S. (2020). Kvalitativ metode. I *Store norske leksikon*. http://snl.no/kvalitativ_metode
- Grøv, E., & Beitnes, A. (2006). *DOBBELTSPOR LYSAKER - SANDVIKA: 3. Parts vurdering av drivemetode for tunnel mellom Lysaker og Sandvika*.
- Haugan, J. Å., & Bruland, A. (2021). *Veileder til beregningsverktøyet for tunnelbyggetid 2021*.
- Heiniö, M. (1999). *Rock Excavation Handbook* (Sandvik Tamrock Corp.).
- Hermann, R., Log, B., & Johannessen, O. (1999). *PROSJEKTRAPPORT 2F-99 TUNNELDRIFT Enhetstidssystem for driving, sikring og innredning*. NTNU - ANLEGGSDRIFT.
- Hognestad, H. O., Fagermo, J. I., Kveen, A., Backer, L., Grøv, E., Frogner, E., & Aarset, A. (2010). *Håndbok Nr. 06: Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Haandbok_06.pdf
- Homleid, Å. (2021, november 19). – *Tunnelkonflikter kunne vært unngått med ny byggetidsmodell*. <https://www.bygg.no/article/1483378/>

- Hussein, B. (2016). *Veien til suksess*. Fagbokforlaget.
- JBV. (u.å.). *Slik bygges jernbanetunneler*. Jernbaneverket.
<https://www.banenor.no/contentassets/9eac907f17454cbb9dacff4abf2df461/slik-bygges-jernbanetunneler---jbv.pdf>
- JBV. (2016). *InterCity Dovrebanen: Fagrapport anleggsgjennomføring*. Jernbaneverket.
- JBV, & SVV. (u.å.). *Fra fjell til tunnel*. Jernbaneverket og Statens vegvesen. Hentet 30. november 2021, fra
<https://www.banenor.no/contentassets/9fc5c0cd2dfc432f86b15f6e592e958b/brosjyre-fra-fjell-til-tunnel-2009.pdf>
- Johannessen, O., Solberg, E., Modell, R., Lima, J., & Bruland, A. (1992). *Prosjektrapport 17-91: Tunneldrift—Ventilasjon*.
- Klakegg, O. J. (1993). *Trinnvis-prosessen*. Universitetet i Trondheim.
- Klakegg, O. J. (1994). *Tidplanlegging under usikkerhet*. Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet.
- Law, A. (2007). *Simulation modeling & Analysis* (Fourth Edition). McGraw-Hill.
- Law, A. (2009). How to build valid and credible simulation models. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, 24–33. <https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429312>
- Log, B. (2000). *Nytt enhetstidssystem for tunneldrift* [Konferanse: Fjellsprenningskonferansen, bergmekanikkdagen og geoteknikkdagen]. NTNU.
<https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Fjellsprenningsdagen-2000.pdf>
- Lædre, O. (2012). *Gjøre det selv eller betale andre for jobben—Byggherrens valg av kontraktstrategi i bygg- og anleggsprosjekt*. NTNU.
https://www.ntnu.no/documents/1261860271/1262010610/Temahefte_Kontraktstrategi_webu+tgave.pdf/4854197e-6f54-408c-a5bf-5b86d720307a
- Malcolm, D. G., Roseboom, J. H., Clark, C. E., & Fazar, W. (1959). Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation. *Operations Research*, 7(5), 646. <https://doi.org/10.1287/opre.7.5.646>
- Malt, U., & Grønmo, S. (2020). Strukturert intervju. I *Store norske leksikon*.
http://snl.no/strukturert_intervju

Martinez, J. C. (1996). *Stroboscope* [Doktorgradsavhandling, University of Michigan]. Civil & Environmental Engineering. <https://www.ezstrobe.org/publications/umthesis>

Martinez, J. C. (2001). EZStrobe—General-purpose simulation system based on activity cycle diagrams. *Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference (Cat. No. 01CH37304)*, 2, 1556–1564 bd.2. <https://doi.org/10.1109/WSC.2001.977485>

Martinez, J. C., & Ioannou, P. G. (1994). General purpose simulation with Stroboscope. *Proceedings of Winter Simulation Conference*, 1159–1166. <https://doi.org/10.1109/WSC.1994.717503>

Microsoft Visio. (2022, mai 20). Microsoft Visio. <https://support.microsoft.com/nb-no/office/installer-visio-eller-g%C3%A5-til-visio-p%C3%A5-nett-f98f21e3-aa02-4827-9167-ddab5b025710>

Neby, A., Kristiansen, J., Hauknes, I., & Bruland, A. (u.å.). *Leksjon 3—Bergmekanikk*.

NFF. (u.å.). *Publication 14: Norwegian tunneling*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Publication-14.pdf>

NFF. (2010). *Publication no. 19: Rock Support in Norwegian Tunnelling*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk.

NFF. (2011). *Publication 20: Rock mass grouting*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Publication-20.pdf>

NFF. (2012). *Publication 21: Contracts in norwegian tunneling*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Publication-21.pdf>

NFF. (2014). *Publication 23: Norwegian tunneling technology*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Publication-23.pdf>

NFF. (2017). *Publication 26: The principles of norwegian tunneling*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Publication-26.pdf>

- NGI. (2015). *Bruk av Q-systemet*. Norges Geotekniske Institutt.
- Nilstun, C. (2021). Bas. I *Store norske leksikon*. <http://snl.no/bas>
- NTNUbibliotek. (2017, januar 13). *Using the T-O-N-E principles to find good scholarly journal articles*. <https://www.youtube.com/watch?v=rs5PFX5SIHc>
- Nye Veier. (2021). *Massedisponeringsplan*. Nye Veier.
https://www.statsforvalteren.no/contentassets/5d273d4e61c84ee3b199b6ea39f51a82/vedlegg-3---rapp-plp-006_massedisponeringsplan.pdf
- Olsen, V. (2002a). *Kompendium i anleggsteknikk—Fjellsprenningsteknikk: Generell sprengningsteori*.
- Olsen, V. (2002b). *Kompendium i anleggsteknikk—Fjellsprenningsteknikk: Sivile sprengstoff*.
- Olsen, V. (2002c). *Kompendium i anleggsteknikk—Fjellsprenningsteknikk: Tennmidler*.
- Olsen, V. (2008). *Report 12D-08 ROCK QUARRYING Loading*. NTNU Institutt for bygg, anlegg og transport.
- Orgeret, K. S. (2019). Intervju. I *Store norske leksikon*. <http://snl.no/intervju>
- Pérez, J. G., Martín, M. del M. L., García, C. G., & Sánchez Granero, M. Á. (2016). Project management under uncertainty beyond beta: The generalized bicubic distribution. *Operations Research Perspectives*, 3, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2016.09.001>
- Perry, C., & Greig, I. D. (1975). Estimating the Mean and Variance of Subjective Distributions in PERT and Decision Analysis. *Management Science*.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.21.12.1477>
- Rolstadås, A. (2021a). Nettverksplanlegging. I *Store norske leksikon*.
<http://snl.no/nettverksplanlegging>
- Rolstadås, A. (2021b). PERT-nettverk. I *Store norske leksikon*. <http://snl.no/PERT-nettverk>
- Rønn, P. E., With, D., Myran, T., Engdahl, S., Randen, A., Storås, I., & Lima, J. (2000). *Håndbok Nr. 03: Arbeidsmiljø under jord*. Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk.
https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Haandbok_03.pdf

- Statkraft. (2010, september 15). *Eiriksdal kraftverk i rute*.
<https://www.statkraft.com/nyheter/nyheter-og-pressemeldinger/arkiv/2010/eriksdal-kraftverk-i-rute/>
- Strand, S. S. (2022, mars 18). *Slik skal Rogfast ferdigstilles til planlagt tid*.
<https://www.bygg.no/article/1493596/>
- Sve, R., Elvøy, J., Sagen, T., Backer, L., Holter, K. G., Bollingmo, P., Boge, K., Pedersen, K. B., & Aarset, A. (2008). *Håndbok Nr. 05: Tung bergsikring i undergrunnsanlegg*. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Haandbok_05.pdf
- SVV. (2018). *Håndbok R761 Prosesskode 1 Standard beskrivelsestekster for vegkontrakter (2018)* (s. 256). Statens vegvesen.
- SVV. (2022). *Vegnormal N500 Vegtunneler*. Statens vegvesen.
- SVV, & Bane NOR. (2020). *Fagrappport Anleggsgjennomføring: E16 og Vossebanen, Arna—Stanghelle* (s. 118). Bane NOR og Statens vegvesen.
https://www.statsforvalteren.no/contentassets/b6079359028048008904916a0d209fc4/vedl_6_fagrappport-anleggsgjennomforing_uas-01-a-00032.pdf
- Tjelmeland, H. (2017, juli 24). *Stokastiske variabler og sannsynlighetsfordelinger*. wiki.math.ntnu.no. <https://wiki.math.ntnu.no/tma4245/tema/begreper/variable>
- Verling, F., & Neraal, H. (2020). Ekvivalenttidsregnskap—En falsk trygghet? *Byggeindustrien*, 52(4), 32.
- Zare, S. (2006). *Report 2B-05 DRILL AND BLAST TUNNELING Advance Rate*. NTNU Institutt for bygg, anlegg og transport.

Vedlegg

Vedlegg A: Intervjuguide (3 sider)

Elektroniske vedlegg:

Vedlegg B: Transkriberte intervju (32 sider)

Vedlegg C: Simuleringsmodell – Enstuffsdrift

Vedlegg D: Simuleringsmodell – Vekseldrift

Vedlegg E: Varigheter på aktiviteter i salvesyklusen

Intervjuguide

Om oss

Hei, vi er to studenter, Edvard Dahl Furunes (24) og Sigurd Strype (25), på studieprogrammet bygg- og miljøteknikk ved NTNU Trondheim. I den forbindelse skal det skrives masteroppgave innenfor fagretningene anleggsteknikk og prosjektledelse våren 2022.

Oppgave og hensikt

Temaet for oppgaven er vekseldrift i tunnel og tidsplanlegging under usikkerhet. Bakgrunnen for oppgaven er et ønske fra bransjen om en bransjeomforent byggetidsmodell for beregning av byggetid i tunnel.

Oppgavens spesifikke hensikt er å utrede vekseldrift i tunnel, og utarbeide en simuleringsmodell for beregning av en vekseldriftfaktor som beskriver tidseffektiviteten til vekseldrift sammenlignet med enstuffsdrift med to utstyrspakker. Modellen blir beheftet med usikkerheten tilknyttet varigheten til aktivitetene i salvesyklusen.

I dette arbeidet er nødvendig med teoretisk bakgrunnskunnskap om flere parametere ved tunneldriving med konvensjonell boring og sprengning, og tidsusikkerheter.

Prosedyre for utførelse og oppfølging

Opplegget er planlagt som et semistrukturert intervju som tilpasses intervjuobjektet, der eventuelle oppfølgingsspørsmål stilles fortløpende dersom dette er hensiktsmessig. Dersom ikke annet er avtalt ønskes det å utføre lyd- eller videoopptak i videointervjuer, og lydopptak ved telefonintervjuer og eventuelle fysiske intervjuer, som senere transkriberes.

Transkriberingen oversendes intervjuobjektet for godkjenning. Eventuelle lyd- og videoopptak skal ikke brukes videre, og slettes etter transkribering.

Intervjuobjektet har til enhver tid rett til å avbryte intervjuet underveis, og eventuelt fremlegge krav om sletting av materialet som etterfølges umiddelbart.

Dersom intervjuobjektet skulle angre seg ved en senere anledning, har vedkommende rett på å få alt materiale slettet omgående. Ta i så fall kontakt med en av oss, og materialet vil slettes.

Spørsmålene

Generelt

- Hva er bakgrunnen og erfaringen din?
- Hvilken stilling innehar du per dags dato?
- Hva innebærer denne stillingen?

Vekseldrift

- Hvordan vil du definere vekseldrift i konvensjonell tunneldriving?
- Hvilke varianter finnes det av vekseldrift?
- Hva mener du må være på plass for å sikre rasjonell vekseldrift, med hensyn på fremdrift og kostnader?
- Hvilke forberedelser gjøres i prosjekter med vekseldrift? Hvilke vurderinger gjør dere som entreprenør/byggherre?
- Hva mener du har størst innvirkning på vekseldriftsfaktoren? Hvordan håndteres dette i prosjektene?
- Hvilke erfaringer har du med vekseldrift?
- Når er vekseldrift hensiktsmessig, når er det ikke hensiktsmessig og hvilke fordeler kan oppnås med vekseldrift kontra regulær enstuffsdrift?
- Kreves det mer av dere som entreprenør/byggherre ved vekseldrift enn i prosjekter med vanlig enstuffsdrift?

Tidsbruk og salvesyklus

- Vi har satt opp salvesyklusen på følgende måte
 1. forinjeksjon (ikke alltid aktuelt)
 2. boring
 3. lading
 4. sprengning
 5. ventilering
 6. utlasting (lasting og transport)
 7. rensk
 8. sikringEr dette en fornuftig inndeling?

Vedlegg A: Intervjuguide

- Er aktivitetene etterfølgende, er det overlapp mellom aktiviteter, eller er noen aktiviteter eventuelt parallelle? Varierer dette?
- Vil disse hovedaktivitetene i salvesyklusen være de kritiske aktivitetene med tanke på tidsbruk, eller kan andre mindre aktiviteter være styrende?

Kontrakt

- I norske tunnelprosjekter er det vanlig med enhetspriskontrakter, der enhetsprisene er justerbare i tillegg til at det kan suppleres med løst anslåtte mengder. Hvordan opplever du at dette fungerer i praksis?
- Hvordan opplever du fordelingen av risiko i disse kontraktene? Er den fordelt på en rimelig måte?
- Varierende mengder i kontrakten reguleres med «100 %-regelen» og «ekvivalenttidsregnskapet». Hvordan mener du dette fungerer, og er det noen utfordringer i denne forbindelse?
- Hvordan vurderer dere risikoen i tunnelprosjekter, og hvordan forholder dere dere til risikoen?
- Hvordan opplever du at konfliktnivået er i tunnel-/anleggsbransjen i dag, med utgangspunkt i tunnelbyggetid.

Avslutningsvis

- Er det noe ekstra du ønsker å tilføye?

Tusen takk for at du tok deg tid til dette!

