

Oskar Hove Zimmer & Richard Boni Carandang  
Araracap

## Tunnelbyggetid for vann- og frostsikring

Utvikling av byggetidsmodell for vann- og  
frostsikring i tunnel

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Amund Bruland

Medveileder: Miguel Arestegui

Juni 2022



Oskar Hove Zimmer & Richard Boni Carandang  
Araracap

## **Tunnelbyggetid for vann- og frostsikring**

Utvikling av byggetidsmodell for vann- og frostsikring  
i tunnel

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

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



Kunnskap for en bedre verden



# Sammendrag

Byggetid for tunneler har i det siste tiåret ført til økende grad av uenighet og tvister som til sammen utgjør en betydelig verdi. Et samarbeidsforum bestående av ulike byggherrer, entreprenører, NTNU og Entreprenørforeningen – Bygg og anlegg (EBA) har utviklet en byggetidsmodell for tunneldriving.

Problemstillingen for denne masteroppgaven er å utvikle en byggetidsmodell for vann- og frostsikring i tunneler. Byggetidsmodellen omfatter vegtunneler og er utviklet for godkjente metoder av Statens Vegvesen. Forskningsspørsmålene som definerer omfanget av oppgaven, er følgende:

- Hvordan utføres vann- og frostsikring i norske vegtunneler i dag?
- Hvilke deloperasjoner kan en modell for vann- og frostsikring deles inn i?
- Hvilke kapasiteter har de ulike deloperasjonene?
- Hvilke rammer må ligge til grunn for en byggetidsmodell for vann- og frostsikring?

For å svare på forskningsspørsmålene, har det vært nødvendig å bruke ulike forskningsmetoder. Høsten 2021 ble det utført en litteraturstudie i forbindelse med forfatterens fordypningsemne. Dette danner kunnskapsgrunnlaget for oppgaven. Forskningsmetodene som er brukt, er utføring av feltstudie, dialog med fagekspert og behandling av prosjektdata.

Det er utført analyse av data på vann- og frostsikring fra 23 ulike tunneler. Tunnelene utgjør en samlet lengde på over 100 km. Selskapene som har bidratt med produksjonsdata og erfaringstall er: AF Gruppen, Skanska, NCC, Hæhre, Norconsult og Veidekke. Dataene er behandlet og omformet til kapasiteter, faktorer og andre verdier.

Masteroppgaven har resultert i en byggetidsmodell (VF-byggetid) for vann- og frostsikring med en tilhørende veileder. Oppsett og tall i modellen er forankret i analyse av produksjonsdata, innsyn i fremdriftsplaner og dialog med fagekspert. Modellen er validert og testet for reelle prosjekter. VF-byggetid er programmert på en måte som gjør at brukeren ikke låses til et bestemt oppsett. Modellen skal være brukervennlig og enkel å videreutvikle.

# Abstract

Construction time for tunnels has in the last decade led to an increased degree of disagreements and disputes which together constitute a significant value. A collaboration forum consisting of various builders, contractors, NTNU and Entreprenørforeningen – Bygg og anlegg (EBA) has developed a construction time model for tunnel construction.

The purpose of this master's thesis has been to develop a construction time model for water and frost protection in tunnels. The construction time model mainly comprises road tunnels and has been developed for methods approved by the Norwegian Public Roads Administration. The research questions that define the scope of the thesis and are discussed are the following:

- How is water and frost protection executed in Norwegian road tunnels today?
- Which sub-operations can water and frost protection be divided into?
- What are the capacities for the sub-operations?
- What substructures must be the basis of a construction time model for water and frost control?

To answer the research questions, it has been necessary to use different research methods. In the autumn of 2021, a literature study was conducted in connection with the authors' in-depth course. This formed the knowledge base for the thesis. The research methods used are the execution of field study, dialogue with subject matter experts and processing of project data.

Analysis of data on water and frost protection has been performed from 23 different tunnels. The tunnels make up a total length of over 100 km. The companies that have contributed production data and experience figures are: AF Gruppen, Skanska, NCC, Hæhre, Norconsult and Veidekke. The data is processed and transformed into capacities, factors and other values.

The master's thesis has resulted in a construction time model (VF-byggetid) for water and frost protection with an associated guide. Setup and figures in the model are anchored in analysis of production data, insight into progress plans and dialogue with experts. The model has been validated and tested for real projects. VF-byggetid is programmed in a way that prevents the user from being locked to a specific setup. The model is user friendly and easy to further develop.

# Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet i løpet av våren 2022. Dette er det avsluttende arbeidet for masterprogrammet på Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven utgjør hele karaktergrunnlaget i TBA4935 - Anleggsteknikk, masteroppgave.

Vi vil rette en stor takk til professor Amund Bruland som har vært veileder for denne oppgaven. Veiledning fra Bruland har vært essensiell for oppgaven og bidratt til å heve kvaliteten i dette arbeidet.

Masteroppgaven er skrevet i samarbeid med entreprenørvirksomheten Skanska Norge AS. Det rettes en stor takk til Miguel Arestegui, prosjektsjef for tunnelinnredning i Skanska Norge AS. Miguel har fungert som medveileder og vært en essensiell sparringspartner i både fordypningsemnet og masteroppgaven. Dette har bidratt til å gi oppgaven faglig dybde og nøyaktighet.

Vi vil også takke alle andre kontaktpersoner som har bidratt med data og faglig påfyll.

Til slutt vil vi rette en stor takk til familie og venner som har hjulpet og vært der for oss gjennom studietiden.

Trondheim, 11. juni 2022

*Oskar Hove Zimmer*

Oskar Hove Zimmer

*Richard B. C. Araracap*

Richard Boni Carandang Araracap

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Forord</b>	<b>iv</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Formål og forskningsspørsmål . . . . .	1
1.3 Omfang og avgrensning . . . . .	2
1.4 Om rapporten . . . . .	4
<b>2 Metode</b>	<b>5</b>
2.1 Vitenskapeteoretisk tilnærming . . . . .	5
2.2 Forskningsdesign . . . . .	6
2.3 Dokumentstudie . . . . .	7
2.4 Feilkilder . . . . .	20
<b>3 Teori</b>	<b>21</b>
3.1 Anleggskontrakter . . . . .	21
3.2 Byggeprosessen . . . . .	22
3.3 Tunnelproduksjon . . . . .	25
3.4 Vann- og frostsikring i tunnel . . . . .	30
3.5 HMS . . . . .	51
3.6 Byggetidsmodell for tunnel . . . . .	53
<b>4 Resultater</b>	<b>58</b>
4.1 Dataanalyse . . . . .	58
4.2 Byggetidsmodellen . . . . .	60
4.3 Standard beregningsark . . . . .	70
4.4 Andre beregningsark . . . . .	73
4.5 Optimalitetsparadokset . . . . .	74
<b>5 Diskusjon</b>	<b>77</b>
5.1 Anvendelse av VF-byggetid . . . . .	77
5.2 Optimalitetsparadokset . . . . .	80
5.3 Anbefalte verdier . . . . .	82
5.4 Forskningsspørsmål . . . . .	83
<b>6 Konklusjon</b>	<b>89</b>
<b>7 Videre arbeider</b>	<b>90</b>
<b>Referanser</b>	
<b>Vedlegg</b>	



# Figurer

1	Inndeling av tunnelproduksjon. . . . .	2
2	Aspekter ved forskningsløken. . . . .	5
3	Reliabilitet og validitet. . . . .	7
4	Utklipp av database for litteratursøk. . . . .	10
5	Produksjonsrapport fra Hæhre. . . . .	13
6	Filtreringsmuligheter i Ditio. . . . .	18
7	Betingelse 1 for filtrering i Ditio. . . . .	19
8	Risikoforedeling mellom byggherre og entreprenør. . . . .	22
9	Bestemmelser for ekvivalentkontrakt. . . . .	23
10	Byggeprosessen i åtte steg. . . . .	23
11	Inndeling av tunnelproduksjon. . . . .	26
12	Prosesser i en tunnelsalvesyklus. . . . .	26
13	Illustrasjon av bolting. . . . .	28
14	Påførelse av sprøytebetong. . . . .	28
15	Prinsipptegning for forbolting. . . . .	29
16	Tverrsnitt av forbolting. . . . .	29
17	Fjerning av is på Bergensbanen. . . . .	31
18	Tunnelklasse basert på ÅDT. . . . .	32
19	Tunnelklassers krav til sikkerhetsutrustning. . . . .	33
20	Tunnelklassers krav til nisjer. . . . .	33
21	Tunneltverrsnitt T7.5. . . . .	34
22	Dimensjonerende frostmengde for gamle Østfold fylke. . . . .	35
23	Vann- og frostsikringsprosesser for ulike dimensjonerende kriterier. . . . .	35
24	Krav til tykkelse for ulike frostmengder for XPS og PE-skum. . . . .	36
25	Krav til tykkelse for ulike frostmengder. . . . .	36
26	Tidsbestemmende aktiviteter for 34.3. . . . .	37
27	T9,5-tunnel med hvelv av sprøytebetong. . . . .	38
28	Bolteavstand og armeringsnett for ulike tunnelkledninger. . . . .	39
29	Armeringsstoler forbundet med 'blekksprut'. . . . .	40
30	Utsnitt av trekkerørstøpinger. . . . .	40
31	Påførelse av sprøytebetong. . . . .	41
32	Utsnitt av dilatasjonsfuger. . . . .	42
33	Utsnitt av hvelv av sprøytebetong, vegg. . . . .	42
34	Utsnitt av hvelv av sprøytebetong, heng. . . . .	43

35	Utsnitt av brannssperre. . . . .	43
36	Tidsbestemmende aktiviteter for 34.41. . . . .	44
37	Utsetting av fundamenter. . . . .	45
38	Montering av membran. . . . .	46
39	Utført membranmontering. . . . .	47
40	Elementmontasje med vakuumflate. . . . .	48
41	T9,5-tunnel med hvelv av betongelementer. . . . .	49
42	Utsnitt av hvelv av betongelementer. . . . .	49
43	T10,5-tunnel av kombinasjonsløsning. . . . .	50
44	Risikovurdering i løpet av en byggeprosess. . . . .	52
45	Skjevhet i sannsynlighetsfordelinger. . . . .	55
46	Vekseldrift i tunnel. . . . .	56
47	Tunnelkonfigurasjoner for tverrforbindelse. . . . .	57
48	Tunnelkonfigurasjoner for antall stuffer. . . . .	57
49	Visualisering av tog. . . . .	62
50	Visualisering av betingelser. . . . .	63
51	Trippelestimat i VF-byggetid. . . . .	64
52	Totalfaktorens påvirkning. . . . .	68
53	Valg av tverrprofil. . . . .	69
54	Tverrprofil og buelengde. . . . .	69
55	Situasjon 1, optimalitetsparadokset. . . . .	75
56	Situasjon 2, optimalitetsparadokset. . . . .	75
57	Treg bolting uløst. . . . .	79
58	Treg bolting løst. . . . .	79
59	Byggetid for 34.4 for 2000 meter lang tunnel. . . . .	80
60	Raskere armering uløst. . . . .	81
61	Raskere armering løst. . . . .	81
62	34.3 og 34.41 for ulike dimensjonerende kriterier. . . . .	83

# Tabeller

1	Forsknings spørsmål. . . . .	1
2	Rapportens struktur. . . . .	4
3	Datainnsamlingsmetoder. . . . .	7
4	Beskrivelse av brukte databaser. . . . .	8
5	TONE-prinsippet. . . . .	11
6	Evaluerings av litteratursøk som forskningsmetode. . . . .	12
7	Oversikt over tilsendt datamateriell. . . . .	13
8	Evaluerings av dialog med fagpersoner som forskningsmetode. . . . .	14
9	Evaluerings av feltstudie som forskningsmetode. . . . .	16
10	Prosjekter fra Ditio og Formworks. . . . .	17
11	Kjerneprosesser fra ulike perspektiver. . . . .	24
12	Ledelsesprosesser. . . . .	25
13	Forklaring av aktiviteter som inngår i 34.3 Hvelv av sprøytebetong. . . . .	37
14	Aktiviteter som inngår i 34.41 hvelv av betongelementer. . . . .	44
15	Forventningsverdier for P1/P99 og P10/P90. . . . .	54
16	Betingelser for togoppsett. . . . .	62
17	Faktorer i prosjektinfo. . . . .	65
18	Øvrige poster i prosjektinfo. . . . .	66
19	Poster i Fane 34.3 Hvelv av sprøytebetong. . . . .	71
20	Poster i Fane 34.41 Hvelv av betongelementer. . . . .	72
21	Situasjon 1, optimalitetsparadokset. . . . .	75
22	Situasjon 2, optimalitetsparadokset. . . . .	75
23	100 km/h, optimalitetsparadokset. . . . .	76
24	200 km/h, optimalitetsparadokset. . . . .	76
25	Eksempel med treg bolting. . . . .	79
26	34.3 for 2000 meter lang tunnel. . . . .	80
27	Deloperasjoner 34.3 Hvelv av sprøytebetong. . . . .	85
28	Poster i Fane 34.41 Hvelv av sprøytebetong. . . . .	85
29	Kapasiteter for 34.3. . . . .	86
30	Kapasiteter for 34.41. . . . .	86
31	Faktorer i prosjektinfo. . . . .	87

# Begreper og forkortelser

Begrep	Forklaring
Butt i butt	Monteringsmetode av PE-skumplater hvor platene monteres kant i kant.
Deterministisk	Et system med gitte parametere som vil gi de samme resultatene hver gang.
Dilatasjonsfuger	Fuge i sprøytebetonghvelv som benyttes for vann- og frostsikring i tunnel.
Dybler	Festeanordning for betongelement og sprøytebetong.
Gyse	Arbeidet med å fylle opp tomrommet mellom hull og bolt med gysemasse.
Heng	Taket i tunnelen.
Hvelv	Buet vegg og tak i tunnelen.
Membran	Et pustende materiale med to sider der den ene siden hindrer vannpartikler å trenge igjennom. Brukes til vannsikring i tunnel.
Monte Carlo	Teknikk for å estimere løsningen av et numerisk matematisk problem ved å utføre en form for stokastisk simulering på datamaskin.
MX-maskin	Maskin som brukes for montering av PE-skum og membran i tunnel.
Nisje	Sideveis utvidelse av bergrom eller tunnel. Kan omtales som havarinisje, snunisje, nisje for teknisk bygg eller nisje for nødstasjon.
PE-skum	Matter eller plater av polyetylenmatter. Brukes til vann- og frostsikring i tunnel.
Samtidighet	Flere arbeidsoperasjoner som utføres samtidig i tunnel.
Sprøytebetong	Betong som sprøytes direkte på bergflaten eller andre flater med høytrykks-sprøyte.
Stuff	Innerste vegg i tunnel under driving.
Stokastisk modell	Et system med gitte parametere som er beheftet med en usikkerhet som kan gi ulike resultat fra gang til gang.
SVV	Statens Vegvesen.
Vederlag	Overgang mellom vegg og tak (heng) i tunnelhvelvet.
Tunneldriving	Bygging av tunnel i berg.
Tunnelinnredning	Arbeidet i et tunnelprosjekt etter gjennomslag. Kan også kalles etterarbeid.
ÅDT	Årsdøgntrafikk er en betegnelse på summen av antall kjøretøy som passerer et punkt på en veistrekning gjennom ett år.

# 1 Introduksjon

Introduksjonskapittelet er basert på forfatterens oppgave i TBA4570 - Anleggsteknikk, fordypningsemne. Kapittelet er dog betydelig utvidet og redigert da mål og omfang av prosjektet er blitt endret.

## 1.1 Bakgrunn

Anleggsbransjen har ytret et ønske om å lage en felles byggetidsmodell for tunnelproduksjon. Det har blitt dannet et samarbeidsforum, bestående av ulike byggherrer, entreprenører, NTNU og Entreprenørforeningen – Bygg og anlegg (EBA). Dette samarbeidsforumet har tidligere etterspurt en byggetidsmodell for tunneldrivingen. Denne byggetidsmodellen har blitt utviklet og fått navnet Tunnelbyggetid 2021. Forfatterne har vært medvirkende til denne byggetidsmodellen som tidligere forskningsassistenter. Ettersom denne modellen er ferdigstilt og tatt i bruk av Statens Vegvesen, er det også blitt ytret et ønske om en byggetidsmodell for tunnelinnredning.

Resultatet av disse beregningsmodellene skal kunne estimere byggetid fra start av driving til klipping av snor ved åpning av tunnelen. Dette vil gi mer forutsigbar risiko for alle parter i et tunnelprosjekt, og forhåpentligvis redusere diskusjoner, uenighet og tvister omkring avsatt byggetid for samferdselstunneler.

## 1.2 Formål og forskningsspørsmål

Den overordnede problemstillingen for denne oppgaven er å lage en byggetidsmodell med oppdaterte metoder, rammer og kapasiteter for vann- og frostsikring i tunneler. Det er utarbeidet fire forskningsspørsmål som etterfølger problemstillingen. Tabell 1 presenterer forskningsspørsmålene for oppgaven.

**Tabell 1:** Forskningsspørsmål.

<b>Forskningsspørsmål</b>	
1.	Hvordan utføres vann- og frostsikring i norske vegtunneler i dag?
2.	Hvilke deloperasjoner kan en modell for vann- og frostsikring deles inn i?
3.	Hvilke kapasiteter har de ulike deloperasjonene?
4.	Hvilke rammer må ligge til grunn for en byggetidsmodell for vann- og frostsikring?

### 1.3 Omfang og avgrensning

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Bygg- og miljøteknikk ved fakultetet for ingeniørvitenskap (IV), ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven er tilknyttet emnet TBA4935 Anleggsteknikk, masteroppgave og tilsvarer 30 studiepoeng. Masteroppgaven er utført som et samarbeid mellom to studenter, i tidsrommet 15.01.2022-11.06.2022.

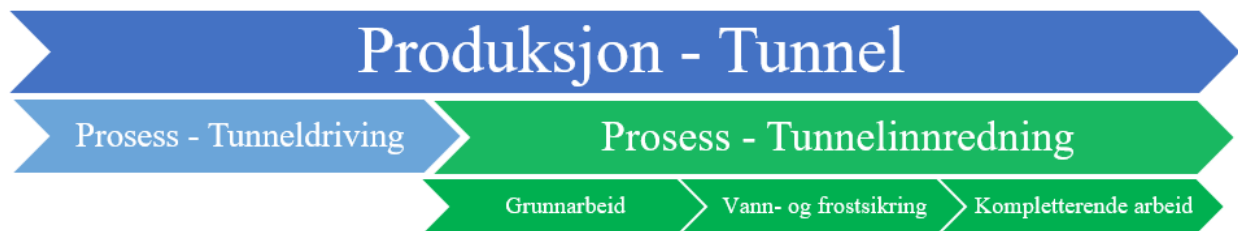
Masteroppgavene «Byggetid for vegtunneler» av Erik Hedenstad og Thomas Stoltenberg (2014) og «Byggetid i tunneler» av Espen Lima (2017), er begge tidligere masteroppgaver som danner noe av grunnlaget for utarbeidelsen av byggetidsmodellen for vann- og frostsikring. Byggetidsmodellen for vann- og frostsikring bygger videre på disse tidligere utarbeidede prinsippene.

Gjennom konsultasjon med veileder, Amund Bruland og medveileder Miguel Arestegui, er det valgt å gjøre en rekke avgrensninger for byggetidsmodellen. Avgrensningene er gjort både under arbeidet med fordypningsemne og arbeidet underveis med masteroppgaven. Tilgjengelig tid og tilgjengeligheten på data er begrensninger som har vært førende for avgrensningen av byggetidsmodellen.

Byggetidsmodellen er avgrenset til arbeidsprosessene til vann- og frostsikring i tunnel. Dette betyr at modellen ekskluderer de to andre arbeidspakkene for tunnelinnredning;

1. Grunnarbeid, veioppbygging og vann og avløp.
2. Kompletterende arbeid for konstruksjoner i tunnel

Se Figur 1 for illustrasjon av arbeidspakkene som inngår i tunnelinnredning. Figur 1 er inspirert av Skanska sin strategimodell for tunnelproduksjon. Elektroarbeid er en del av etterarbeider som kommer etter tunnelinnredning.



**Figur 1:** Inndeling av tunnelproduksjon.  
(Arestegui, 2021a)

Avgjørelsen om å begrense omfanget til vann- og frostsikringsprosessen, ble gjort da masteroppgaven er gjort i samarbeid med Skanska. Skanska utfører vann- og frostsikring, men kontraherer ofte underentreprenører til de tre andre arbeidspakkene. Dette er en praksis for mange av de store entreprenørene som det er blitt anskaffet vann- og frostsikringsdata på. Ved å avgrense til vann- og frostsikring vil det med større sannsynlighet produseres et kvalitetsprodukt. Det vil likevel være deler av modellen som skal kunne anvendes for andre arbeidspakker for tunnelinnredning.

Byggetidsmodellen inkluderer bare norske godkjente metoder for vann- og frostsikring. Byggetidsmodellen inkluderer metodene som anses som mest anvendt i Norge. Metodene som er inkludert er beskrevet i SSV sin håndbok, R761, nærmere bestemt prosesskode 34. Metode 34.2 Kontaktstøpt betonghvelv m/membran er ekskludert da denne utøves i mindre grad (Arestegui, 2021a).

Det er også noen type materialer som til dels brukes, men som også er ekskludert på grunn av tilgjengelighet på data. Vannsikringsmaterialene Giertsenduk eller Giertsenmembran og vann- og frostsikringsmaterialet Foamrox er ekskludert. Foamrox er et mindre anvendt materiale som per dags dato ikke er godkjent som et vann- og frostsikringsmateriale (Arestegui, 2022).

Byggetidsmodellen er avgrenset til konvensjonell tunneldrift og vegtunneler. Dataen som er anskaffet fra de ulike entreprenører er fra vegtunneler drevet med konvensjonell tunneldrift. I tillegg er modellen utviklet som et deterministisk system, og ikke stokastisk. Mer om deterministisk system versus stokastisk beskrives i kapittel 3. Til tross for de overnevnte avgrensninger er byggetidsmodellen utviklet slik at den muliggjør videreutvikling. Dermed kan eventuelle videre arbeider implementeres for de utelatte prosessene og arbeidspakkene. Ved å avgrense masteroppgaven vil det med større sannsynlighet produseres et fullverdig produkt, som kan tas i bruk allerede når masteroppgaven er levert.

De overnevnte avgrensninger er dog inkludert i kapittel 3 for å beskrive omfanget av vann- og frostsikring i tunnel. Det kan være spesielt viktig innsikt for vedkommende som skal arbeide videre med byggetidsmodellen.

## 1.4 Om rapporten

Masteroppgaven er strukturert etter IMRaD-modellen. IMRaD-modellen er bygd opp av introduksjon, metode, resultat og diskusjon (NTNU, n.da). I tillegg til kapitlene i IMRaD-strukturen, er masteroppgaven supplert med tre andre kapitler; Teori, Konklusjon og Videre arbeider. Dette er gjort for å øke leservennligheten og gi leseren bedre innsikt. Tabell 2 presenterer rapportens struktur.

**Tabell 2:** Rapportens struktur.

<b>Kapittel</b>	<b>Innhold</b>
1. Introduksjon	Presentasjon av bakgrunn, omfang og avgrensning for masteroppgaven.
2. Metode	Beskrivelse av metodikk brukt for å løse masteroppgavens problemstilling.
3. Teori	Et teoretisk rammeverk som skal ligge til grunn for at leseren forstår og har innsikt i hva problemstillingen omhandler og hvordan problemstillingen er løst.
4. Resultater	Presentasjon og analyse av de relevante funnene fra forskningsmetodene. Byggetidsmodellen med tilhørende veileder blir presentert. Noe diskusjon av byggetidsmodellen er bevisst lagt til resultatkapittelet.
5. Diskusjon	Diskusjon av bruk av byggetidsmodellen med eksempler og diskusjon av betydningen og nøyaktigheten av resultatene.
6. Konklusjon	Oppsummering og konkludering av forskningsspørsmålene.
7. Videre arbeider	Tanker om videre arbeider og utbedring av byggetidsmodellen og arbeidskapasiteter.
Vedlegg	Presenterer informasjon om gjennomførelsen av forskningsmetodene. Blant annet datagrunnlaget for kapasitetsberegningene.

Masteroppgaven er et videre forskningsarbeid som bygger på fordypningemnet som ble utført høsten 2021. Derfor er det hentet inn litteraturmateriale fra fordypningsemnet til masteroppgaven. For hvert kapittel der det er gjenbrukt materiale fra fordypningsemne, er det nevnt i ingressen i hvilken grad og hvor mye som er gjenbrukt.

Arbeidet med masteroppgaven omfattet blant annet å innhente store mengder data. Disse dataene er utgangspunkt for kapasitetene som er brukt i byggetidsmodellen. Da disse dataene er konkurransesensitive er de lagt som vedlegg som ikke publiseres. Byggetidsmodellen med veileder er også lagt som vedlegg. De viktigste resultatene av masteroppgaven finnes i vedleggene.

Masteroppgaven krever at leseren har noen forkunnskaper om anleggsbransjen. Dersom dette ikke er tilfellet, anbefales det å undersøke SVV sine håndbøker.

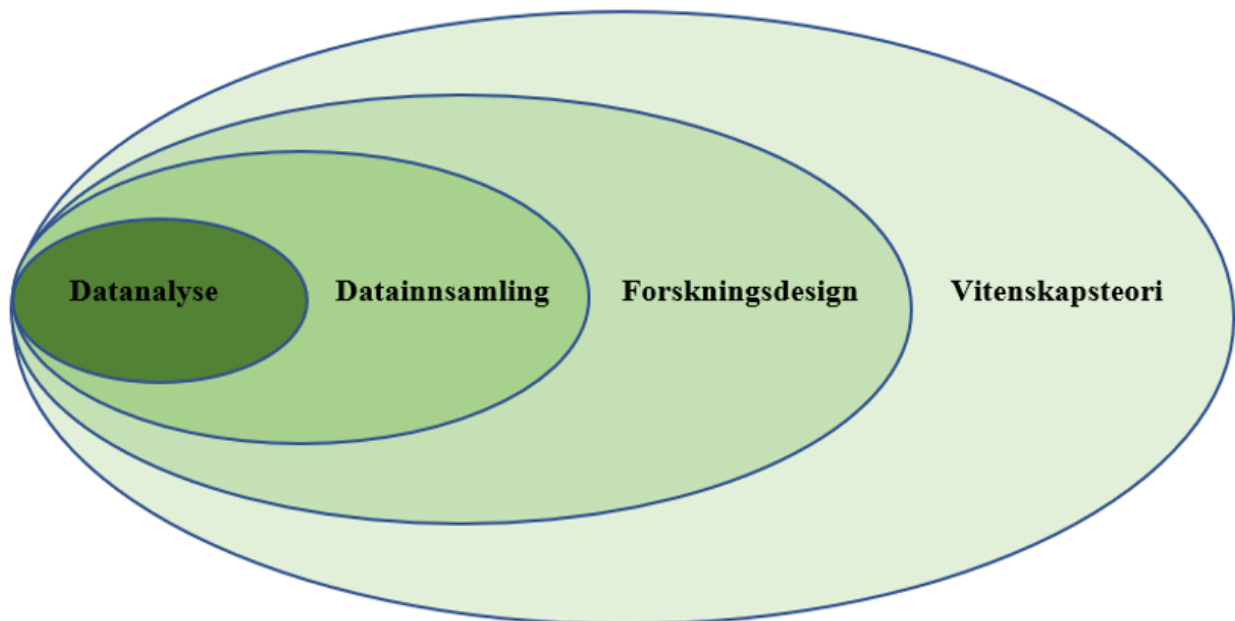


## 2 Metode

Dette kapitlet beskriver forskningsmetodene som er brukt i fordypningsemnet og masteroppgaven. Bruken av metodene, vurdering av kvaliteten på studien og feilkilder er presentert.

### 2.1 Vitenskapsteoretisk tilnærming

I fordypningsemnet ble det tatt utgangspunkt i Mark Saunders sin forskningsmetode. Metoden baseres på en forskningsløk, som opprinnelig er oppdelt i fem lag (AESAs, 2020). Denne masteroppgaven henvender seg til fire av disse lagene, som vist på Figur 2. Det femte laget omhandler forskningsfilosofi, og er utelatt da det ikke anses som relevant for denne masteroppgaven. Forskningsløken illustrerer ulike aspekter av det som skal utforskes. Rekkefølgen til metoden starter ytterst, med den hensikt å kunne bygge opp et godt underlag for analyse og resultater av forskningen (AESAs, 2020). Denne metoden for utforming av avhandlinger er en anerkjent metode, og anses som en egnet metode for denne masteroppgaven.



**Figur 2:** Aspekter ved forskningsløken.  
(AESAs, 2020)

Det er valgt å bruke en kombinasjon av abduktiv og induktiv tilnærming til det teoretiske rammeverket. Abduktiv tilnærming er en strategi for å utvikle teori basert på kvalitative data (Johannesen, 2022). Det ble valgt å bruke en abduktiv tilnærming for å utarbeidede kapasitetene som byggetidsmodellen baseres på. Induktiv tilnærming søker ny kunnskap på områder hvor det finnes lite forhåndskunnskap (Jacobsen, n.d). Denne strategien er brukt for å avdekke det lite dokumenterte fagområde om vann- og frostsikring.

## **2.2 Forskningsdesign**

### **2.2.1 Ekstensivt og intensivt design**

Masteroppgaven er utført med en kombinasjon av ekstensivt og intensivt forskningsdesign. Ekstensivt design går i bredden og henter informasjon fra mange enheter, med mindre mengder informasjon fra hver enhet. Masteroppgaven er ekstensivt da det er flere enheter fra bransjen som det er dannet en dialog med og holdt kontakt med gjennom arbeidet av masteroppgaven (Jacobsen, n.d). Dette er utført for å hente data og informasjon fra flere kilder, slik at problemstillingens løsning skal være universal for anleggsbransjen.

Intensivt design går i dybden og henter detaljert informasjon fra en eller få enheter (Jacobsen, n.d). Derfor har masteroppgaven også vært preget av et intensivt design, da det er innhentet essensiell data fra medveileder, Miguel Arestegui. Denne dataen er nøye gjennomgått og analysert i samarbeid med medveileder gjennom en rekke fysiske og digitale møter. Ved å anvende et intensivt forskningsdesign, er det gjort funn om bakgrunnen til dataen som har vært essensielle for å utvikle kapasiteter til byggetidsmodellen.

### **2.2.2 Kvalitativ og kvantitativ forskningsmetode**

Kvalitative metoder omhandler informasjonsinnsamling om få enheter, ofte i form av tekst. Kvalitativ metode egner seg godt til å få detaljert informasjon om mening og innhold. Dette har vært vesentlig for å forstå den komplekse vann- og frostsikringsprosessen (Jick, 1979).

Kvantitative metoder handler om innsamling av mengdedata, ofte i form av tall. I denne sammenhengen gjelder det først og fremst data om mengder produsert og timeverk fra produksjonsrapporter. Kvantitative og kvalitative metoder er i stor grad kombinert i dette prosjektet. Disse metodene bør brukes til å utfylle hverandre i stedet for å bare benytte seg av én av dem. På grunn av svakheter og styrker ved metodene vil en kombinasjon føre til et mer solid resultat (Jick, 1979).

## 2.3 Dokumentstudie

Tabell 3 presenterer de ulike metodene som er brukt for innsamling av data.

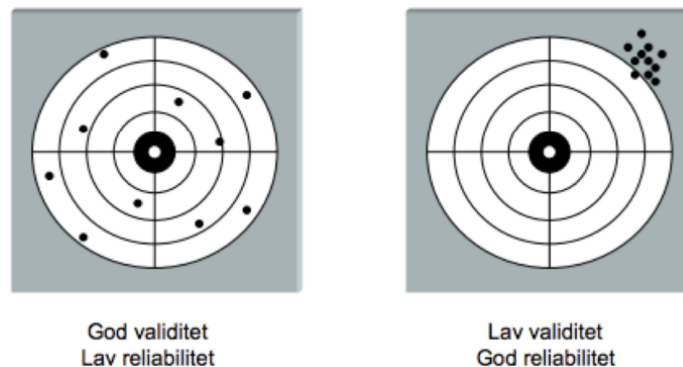
**Tabell 3:** Datainnsamlingsmetoder.

Metode	Beskrivelse
Litteraturstudie	Innhenting og vurdering av relevant litteratur med hensikt om å skape et godt teorigrunnlag.
Dialog med fageksperter	Digitale møter og mailkorrespondanse med personer i bransjen med relevant kompetanse. Innebærer metoder for innsamling av data fra prosjekter og hvordan kommunikasjonen har foregått.
Feltstudie	Opphold på Fv. 659 Nordøyvegen i tre dager. Observere vann- og frostsikring under utførelse, i tillegg til å intervjuje ulike fagarbeidere og funksjonærer.

### Evaluering av forskningsmetode

Studiens kvalitet vil i stor grad avhenge av validiteten og reliabiliteten til informasjonen som brukes. Reliabilitet handler om pålitelighet og nøyaktighet. Reliabiliteten vil blant annet avhenge av hvordan målinger blir utført. Validitet går ut på at det som faktisk måles stemmer overens med hva som forsøkes å måle (Samset, 2014). Uttrykkene validitet og reliabilitet er visualisert i Figur 3. Reliabiliteten og validiteten til forskningsmetodene har blitt vurdert og gitt en karakter;

- God
- Middels
- Dårlig



**Figur 3:** Reliabilitet og validitet.  
(Samset, 2014)

### 2.3.1 Litteraturstudie

I forbindelse med emnene; TBA4128 Prosjektledelse, videregående kurs, TBA4151 Anleggsteknikk, videregående kurs og TBA4570 Anleggsteknikk, fordypningsemne, ble det utført en litteraturstudie. Studiens hensikt var å innhente relevant litteratur for temaet ”byggetid for etterarbeid i tunnel” og filtrering av funnene. Dette kapittelet er hentet fra litteraturstudiet og er tilføyet redaksjonelle endringer.

#### Søkemetode

Dette kapittelet beskriver hvordan litteratursøket er gjort. Metoden er utført i tre deler. Først ble selve søket utført for å finne relevante kilder. Videre ble det utført en filtrering av de valgte kildene. Kildene ble deretter vurdert etter TONE-prinsippet. Denne metoden er basert på forelesning: ”Litteratursøk og referanseverktøy” (Engebø, 2021), og NTNU sine sider om avanserte litteratursøk (NTNU, 2010).

#### Databaser

For litteratursøket ble det brukt akademiske databaser. De valgte databasene er basert på anbefalinger fra forelesningen: ”Litteratursøk og referanseverktøy“ av Atle Engebø, 09.09.2021. Databasene er: Oria, Web of Science, ASCE, Scopus, Google Scholar og Science Direct. Tabell 4 presenterer de ulike databasene som er brukt i litteraturstudiet.

**Tabell 4:** Beskrivelse av brukte databaser.

Database	Beskrivelse
Oria	Oria er en felles portal til det samlede materialet som finnes ved de fleste norske fag- og forskningsbibliotek (Unit, 2021).
Web of Science	The Web of Science™ er verdens mest pålitelige utgiveruavhengige globale situasjonsdatabase (Clarivate, 2022).
Scopus	Scopus kombinerer på en unik måte en omfattende, ekspertkuratert abstrakt- og siteringsdatabase med berikede data og koblet vitenskapelig litteratur på tvers av et bredt spekter av disipliner (Elsevier, 2020).
Google Shcolar	Google Scholar gir en enkel måte å søke etter vitenskapelig litteratur på (Scholar, n.d).
Science Direct	ScienceDirect er en ledende oppdagelsesplattform av fagfellevurdert litteratur fra Elsevier-tidsskrifter og bøker, inkludert tusenvis av artikler med åpen tilgang (Elsevier, 2022).
ASCE	Et bibliotek for det siste av sivilingeniørpraksis og forskning (ASCE, 2022).

Det ble også tilsendt litteratur fra veileder. Gjennom litteraturstudiet har en rekke relevante kilder blitt funnet. Flere av kildene har bidratt til et kunnskapsgrunnlag for å undersøke byggetid for vann- og frostsikring.

Masteroppgavene «Byggetid for vegtunneler» av Erik Hedenstad og Thomas Stoltenberg (2014) og «Byggetid i tunneler» av Espen Lima (2017) har også bidratt til nyttig informasjon. Resultatene til Lima har tatt utgangspunkt i resultatene til Hedenstad og Stoltenberg og bygget videre på dem. Begge deres resultater er videre undersøkt og bygd videre på.

### **Søketeknikk**

Før utførelsen av søket, ble det laget et utkast av en liste over søkeordene som skulle brukes. Søkeordene ble så langt det var hensiktsmessig, søkt på både engelsk og norsk. Nettsiden ordnett.no, ble brukt for å oppspore akademisk korrekte oversettelser.

For å avgrense søket er det utført kombinasjonssøk med boolske operatører. De boolske operatørene som er brukt er AND og OR. AND filtrerer ut litteratur som ikke inneholder begge søkeordene. Disse boolske operatørene har vært essensielle for å få opp innsnevrede treff på tunnelfaget. OR operatøren er også brukt på samtlige søkeord. Denne operatøren gir treff hvor ett eller begge ordene forekommer (Universitetsbiblioteket, n.d).

Det ble også gjort frasesøk. Dette er søk som er utført slik; “Construction time“ istedenfor slik; Construction time. Denne metoden gir treff på kombinasjon av de to ordene. Et søk uten fraser vil gi treff på de to ordene som ikke er avhengig av hverandre. Slike søk genererer økt mengde irrelevante treff. Kombinasjon av frasesøk og boolske operatorer var hensiktsmessig for å kunne få et omfattende treff, samtidig som det snevret søket inn på riktig tema (Engebø, 2021). Se Figur 4 for utklipp av resultatet for denne søketeknikken.

Søkefrase	Database						
	Filter	Oria	Web of Science	ASCE	Scopus	Google Scholar	Science Direct
<b>Etterarbeider</b>							
Etterarbeider (AND tunnel)	All fields	2	0	5	0	271	0
"Etterarbeider" + "tunnel"	All fields	2	0	0	0	0	0
Etterarbeider (AND tunnel OR byggetid)	All fields	26	0	0	0	32	0
<b>Finishing operation</b>							
"Finishing operation" (AND tunnel)	All fields	218	1	0	7	381	205
"Finishing operation" + "tunnel"	All fields	197	1	0	21	332	205
"Finishing operation" (AND tunnel OR "construction time")	All fields	54	1	0	21	8	3
<b>Moderne vegtunneler</b>							
Moderne (AND vegtunnler)	All fields	23	0	0	0	171	0
"Moderne" + "vegtunnel"	All fields	23	0	0	0	146	0
<b>Modern roadtunnel</b>							
Modern (AND roadtunnel)	All fields	3	0	1	0	7650	3
"Modern" + "roadtunnel"	All fields	3	0	0	0	11	3
<b>Vann og frostsikring</b>							
Vann (AND frostsikring)	All fields	27	0	0	0	446	1
"Vann og frostsikring"	All fields	19	0	0	3	178	0
"Vann og frostsikring" (AND tunnel OR byggetid)	All fields	4	0	0	3	167	0
<b>Water and frostcontrol</b>							
Water (AND frostcontrol)	All fields	0	3474234	5	0	1810	0
"Water and frostcontrol"	All fields	0	0	5	0	0	0
"Water and frostcontrol" (AND tunnel OR "construction time")		19	1710	0	0	0	0

**Figur 4:** Utklipp av database for litteratursøk.

Søk med færre enn 200 treff, ble undersøkt nærmere. Kildene ble i første omgang valgt ut ifra tittel. Utvalgte kilder ble lagt inn i programmet, Zotero. Kildene ble kategorisert i egne mapper etter søkeord.

Kildene ble videre undersøkt grundigere for en ny fase med utvelgelse. Da ble i tillegg til tittel, nøkkelord og sammendrag lest.

Det ble tilstrebet å finne kilder som teoretisk forklarte de ulike etterarbeidene i tunnel, med søkelys på vann- og frostsikring. Dette var nødvendig for å bygge opp teorigrunnet for fordypningsemne og masteroppgave, samt bruke kildene til inspirasjon. Da kildene som kom fra søkeordene ble vurdert, ble det bestemt å søke mer detaljert på aktiviteter og produkter tilknyttet vann- og frostsikring for å få dypere innsikt. Søkeordene "PE skum", "brannsikring tunnel", "tunnelkledning", "kjemisk etterinjeksjon" og "nettarmoring tunnel" ble brukt i Google Scholar og Oria. De nevnte søkeordene ga til sammen seks relevante kilder fra Statens vegvesen og NFF.

### Alternative søkemetoder

Snowballing går ut på at en kilde brukes til å finne en eller flere nye kilder. Snowballing kan deles inn i forward snowballing og backward snowballing. Forward snowballing innebærer å undersøke kildene som har sitert et bestemt arbeid for å finne nyere materiale som dekker lignende emner. Ved backward snowballing letes det etter kilder i primærkildens referanseliste (Wohlin, 2014).

Etter undersøkelse av kilden som heter: «4.9 grensesprengende tunneler - lange og dype, går det en grense?» ble det funnet ut at kilden var en del av en samling kalt: “Etatsprogrammet moderne vegtunneler“. Gjennom denne samlingen ble flere relevante kilder funnet. Kildene er sterke teoretiske grunnlag for både prosjekt- og masteroppgaven.

### Evalueringskriterier av kilder

Da kildene var valgt ble de vurdert etter TONE-prinsippet; Troverdighet, Objektivitet, Nøyaktighet og Egnethet, som vist i Tabell 5 (NTNU, n.db).

**Tabell 5:** TONE-prinsippet.

<b>Vurderingskriterie</b>	<b>Forklaring</b>
<i>Troverdighet</i>	Omhandler hvorvidt utgivere er anerkjent: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hvem er forfatteren av kilden?</li> <li>• Hva er forfatterens bakgrunn?</li> <li>• Hvilken institusjon er dem knyttet til?</li> <li>• Hvor er artikkelen funnet?</li> </ul>
<i>Objektivitet</i>	Om kilden er upartisk: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prøver teksten å overtale eller informere?</li> <li>• Er flere sider av saken belyst?</li> <li>• Hva er hensikten til at kilden er publisert?</li> </ul>
<i>Nøyaktighet</i>	Hvor grundig er kilden: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Er innholdet enkelt og godt forklart?</li> <li>• Hvis data er brukt, er dataen nye og oppdaterte?</li> <li>• Kan fakta i innholdet bekreftes av andre kilder?</li> </ul>
<i>Egnethet</i>	Omhandler i hvilken grad informasjonen er aktuell for den som leser: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Er data eller fakta relevant for leserens formål?</li> <li>• Hvem er artikkelen skrevet for?</li> <li>• Kastes det nytt lys over leserens problemstilling?</li> </ul>

## Evaluering av forskningsmetode

Tabell 6 presenterer evaluering av litteratursøk som forskningsmetode.

**Tabell 6:** Evaluerings av litteratursøk som forskningsmetode.

Vurderingskriterier	Vurdering	Begrunnelse
Reliabilitet	God	Litteraturen er åpen for offentligheten, noe som gjør metoden etterprøvbart. Det kan være avvik i kilder, dersom disse er blitt fjernet i senere tid. Dette fører til noe redusert etterprøvbart.
Validitet	Middels	Kildene er utgitt av pålitelige akademiske organisasjoner. De er filtrert og funnet i akademiske databaser. VF-sikring har vært et mindre fokusert fagområde. Dette kan bety at litteraturen ikke dekker det problemstillingen omfatter eller at litteraturen ikke er gyldig. Se kapittel 2.4 for feilkilder.

### 2.3.2 Dialog med fageksperter

Som en av metodene er det valgt å kommunisere med forskjellige fagpersoner gjennom ulike kanaler og kommunikasjonsverktøy. Nettverket som er bygget opp under arbeidet som forskningsassistenter, har vært ekstremt hjelpsomt for å opprette kontakt med de rette fagpersonene. Det har blitt sendt ut e-poster til Bane Nor, Statens Vegvesen, Skanska, Veidekke, Hæhre, NCC, Norconsult, AF Gruppen og Implenia. Formålet med mailene har først og fremst vært å opprette kontakt med eksperter på vann- og frostsikring. Dette er utvalgte personer forankret i samarbeidet med EBA.

Sammen med mailen ble det vedlagt et Excel-ark hvor mottakeren kunne fylle inn prosjektinfo fra sine prosjekter. Dette Excel-arket har til hensikt å innhente data fra ulike prosjekter med ulike metoder for vann- og frostsikring, som vist i Vedlegg A - Spørreskjema. E-posten som ble sendt ut, førte til videre dialog med flere av fagekspertene.

I dialogene med fagpersonene ble det utvekslet data, erfaringer og tanker til hvordan byggetidsmodellen bør utvikles. Forfatterne valgte å ikke ha en rigid intervju- og kommunikasjonsform. Derfor har det ikke vært en systematisk fremgangsmåte i kommunikasjonen. Etter at kontakt har blitt opprettet, har forfatterne tilpasset dialogen til hver enkelt enhet. Denne fremgangsmåten har hatt til hensikt å skape tillit og åpenhet for begge parter. Valget er basert på tidligere erfaringer fra kommunikasjon med fagpersoner i anleggsbransjen. Forfatternes erfaring er at en uformell dialog har fungert bedre enn en rigid intervjuform. Dette ble gjort både gjennom mailkorrespondanse,



telefonsamtaler og digitale møter på Teams. Fra dialogene kom det ulike former for data. Tabell 7 presenterer oversikt over tilsendt datamateriell.

**Tabell 7:** Oversikt over tilsendt datamateriell.

Selskap	Stilling	Type datamateriell
Skanska	Prosjektjef	Produksjonsrapporter, erfaringstall, tegninger
AF gruppen	Anleggsleder	Fremdriftsplan, produksjonstall, erfaringstall
AF gruppen	Anleggsleder	Produksjonstall
Hæhre	Prosjektleder	Produksjonsrapporter
NCC	Leder for VF	Fremdriftsplan, produksjonstall, erfaringstall
Norconsult	Avdelingsleder	Fremdriftsplan, produksjonstall, erfaringstall
Veidekke	Delprosjektleder	Erfaringstall

Produksjonsrapportene fra Hæhre er i form av utfylte skjemaer som er skannet og tilsendt i pdf-format. Eksempel på en slik rapport er vist i Figur 5. Rapporten viser blant annet at 442 bolter ble satt av to arbeidere.

DATO		PRODUKSJONSRAPPORT:									
12/12		PROSJEKT: Flotunnelen <b>Vann - og frostsikring</b>									
UKENR/ÅR: - 2020 -		Bas:									
arbeidsoperasjon	Start peinummer	Slutt peinummer	Antall	Ende- tetting(m)	Risefuger	Brann- sperrer	manglende tilgang	planlagt stopp	Maskiner og utstyr	Materiell/ry- arar	Merknad: (forlaring, spesifisering)
Bolteboring											
Bolte- montering, gysing	178459	172436	442	49							2Stk skilt
PE-skum											
Armering, ferdig stølet											
Endeslutning											
Kommentarer:											

**Figur 5:** Produksjonsrapport fra Hæhre.  
(Lima, 2021)

Av konkurransehensyn fremvises ikke de andre dataene som er blitt tilsendt. Dette gjelder følgende vedlegg:

- Vedlegg B - NCC
- Vedlegg C - AF
- Vedlegg D - Norconsult
- Vedlegg G - Kapasitetsintervaller
- Vedlegg H - Kapasitetsberegning Ditio (til november)
- Vedlegg I - Kapasitetsberegning Ditio (fra november)
- Vedlegg J - Kapasitetsberegning Formworks
- Vedlegg K - Kapasitetsberegning Hæhre
- Vedlegg L - Kapasitetsberegning Ditio (SKA)
- Vedlegg M - Prosjektsammenligning

Dialogene med fagekspertene har vært gjennomgående for hele utarbeidelsen av masteroppgaven. På denne måten er det blitt søkt etter ny informasjon, etter hvert som nye føringer har blitt satt og nye ideer til byggetidsmodellen ble utviklet.

### **Evaluering av forskningsmetode**

Tabell 8 presenterer evaluering av dialog med fagekspertene som forskningsmetode.

**Tabell 8:** Evaluering av dialog med fagepersoner som forskningsmetode.

<b>Vurderingskriterier</b>	<b>Vurdering</b>	<b>Begrunnelse</b>
Reliabilitet	Middels	Reliabiliteten til denne forskningsmetoden avhenger av hvor lang tid etter metoden skulle blitt etterprøvd. Etterprøvbart kort tid etter, ville kunne resultere i mye like resultater. Utprøving lenger tid etter masteroppgaven, ville kunne resultere i mer ulike resultater. Dette kommer av at bransjen stadig utvikler seg, slik at objektive og subjektive meninger og data ville kunne endre seg.
Validitet	Middels	Mellommenneskelig kommunikasjon gjør at validiteten vurderes til middels. Da både intervjuer og intervjuobjekt reagerer ulikt på hverandre, slik at resultatet vil variere ut ifra hvem som avholder intervjuet.

### **2.3.3 Feltstudie**

Som en av forskningsmetodene ble det utført en feltstudie. Feltstudiet tok plass på Nordøyvegen, et anleggsprosjekt utført av Skanska AS. Feltstudiet varte fra 1. mars til 3.mars.

#### **Observasjon av vann- og frostsikringsarbeid**

Et av formålene med feltstudiet var å observere alle arbeidsprosessene som omfattet vann- og frostsikring. Denne metoden gjorde at forfatterne kunne observere og utspørre tunnelarbeidere og byggeledere. Dette bidro til et klarere bilde av hva som inngår i produksjonsrapportene som er innhentet fra Ditio-programmet. Mer om produksjonsrapportene og Ditio-programmet vises i kapittel 2.3.4. I tillegg bidro ekskursionsjonen til et klarere bilde av teorien som var hentet inn fra litteraturstudien.

#### **Feltsamtaler**

Feltstudie har innebåret en rekke uformelle samtaler, også kalt feltsamtaler (Buvik, 2019). Før feltarbeidet ble det utarbeidet og forberedt en rekke spørsmål. Spørsmålene ble stilt under feltsamtalene. Spørsmålene var:

1. Hva er usikkerhetsfaktorene ved vann- og frostsikring, som medfører økt/reduert byggetid?
2. Tar arbeid lenger eller kortere tid for samme arbeidsprosesser for ulike prosesskoder? For eksempel bolting for 34.3 Hvelv med sprøytebetong og 34.4 Hvelv av betongelementer.
3. Hva er det med fremdriftsplaner for VF eller etterarbeider som savnes i dag?
4. Hvordan påvirkes kapasiteter av tunnelens tverrprofil?

Det var bevisst valgt å ikke utføre rigide intervjuer, med lange forberedte spørsmål. Gjennom mer uformelle samtaler var det meningen å skape en flytende samtale hvor intervjuer og informant sparret med hverandre. Det ble startet en naturlig tosidig samtale med ulike aktører på prosjektet. Det ble avdekket hvilke menneskelige feilkilder som var knyttet til rapporteringssystemet til Ditio, og som videre vil kunne påvirke kapasitetenes validitet.

Samtalene ga informasjon om hvordan de organiserer driften og hvordan denne driften har en rekke parametere som vil kunne variere. Et tidlig utkast av byggetidsmodellen ble framvist foran prosjektsjef, prosjektingeniører, formann og andre fagarbeidere. Dette resulterte i videre føringer for utvikling av byggetidsmodellen. For resultat av føringene, se kapittel 4. Tabell 9 presenterer evalueringen av feltstudie som forskningsmetode.

**Tabell 9:** Evaluering av feltstudie som forskningsmetode.

Vurderingskriterier	Vurdering	Begrunnelse
Reliabilitet	Middels	Et feltstudie vil ha ulikt resultat ut ifra hvordan feltstudie er planlagt, og hvordan de som utfører studiet tar til seg informasjon og observasjoner. Likevel er dette en utprøvd metode som ofte vil kunne sikre ytterligere informasjon, data og forståelse.
Validitet	God	Feltstudiet ga resultater som har vært ytterst hensiktsmessige for å utvikle byggetidsmodellen. Bidragene har kommet fra eksperter på vann- og frostsikring.

### 2.3.4 Behandling av data

Hensikten med å behandle innhentet data har i stor grad vært å beregne kapasiteter. Kapasiteter er grunnlaget for å lage en byggetidsmodell. Kapasiteter representerer de ulike arbeidene som utføres for å vann- og frostsikre tunneler. Formelen for kapasiteter er:

$$Kapasitet = \frac{Utarbeidet\ mengde}{Timeverk} \cdot Antall\ arbeidere\ per\ operasjon = \frac{Utarbeidet\ mengde}{Arbeidstimer} \quad (1)$$

Timeverk vil si det totale antallet timer med utført arbeid for alle arbeidere på den aktuelle operasjonen. Det er tilstrebet å forme virkelighetsnære og valide kapasiteter. Dette er utført ved å beregne kapasiteter fra ulike tunneler. Store mengder digitale data av produserte mengder og tidsbruk på produksjon er tilsendt i form av Excel-ark.

I tillegg er det innhentet erfaringsdata fra ulike entreprenører. Erfaringsdata har både opp- og nedjustert kapasiteten. På denne måten er det utarbeidet universelle kapasiteter som er forenelig med anleggsbransjen. For resultatet av databehandlingen, se kapittel 4.

### Produksjonsrapporter fra Ditio og Formworks

Skanska har et digitalt rapporteringssystem, Ditio. I en masteroppgave av Heidi Storkås (2021) ble det gjort en casestudie av vann- og frostsikring i tunnel. Masteroppgavens formål var å vurdere Ditio, som et grunnleggende system for digital rapportering sammen med Power BI. Funnene i masteroppgaven tilsier at rapporteringssystemet kan bidra til å få en effektiv produksjon i Skanska sin avdeling for vann- og frostsikring. Systemet bidrar til en effektiv produksjon gjennom økt mulighet for produksjonsoppfølging og fremdriftsplanlegging i prosjekter (Storkås, 2021).

Skanska brukte Formworks som et rapporteringssystem før Ditio tok over. Formworks er på samme måte som Ditio, et digitalt rapporteringssystem. Formworks inneholder store mengder registrerte

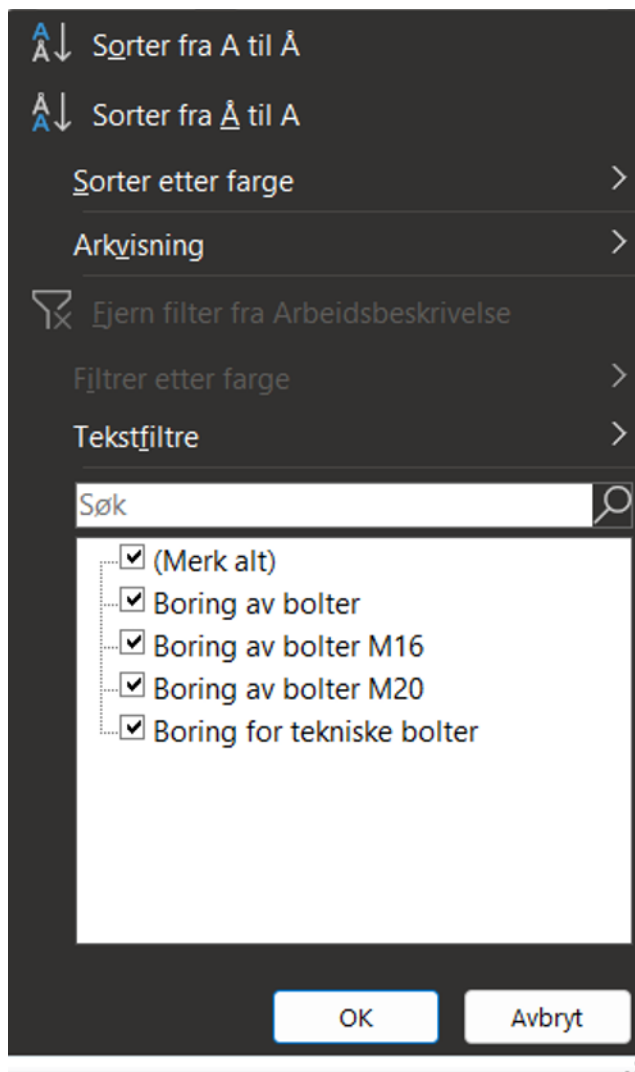
data om prosjektene til Skanska. De vesentlige dataene som har vært nødvendig for å beregne kapasiteter fra Skanska er innhentet som Excel-filer fra Formworks og Ditio. Excel-filene, fra Formworks, inneholder i underkant av 10 000 rader. Excel-filene fra Ditio inneholder i underkant av 8000 rader med data. Tabell 10 presenterer hvilke tunnelprosjekter Ditio og Formworks inneholder: Alle dataene i rapportene har ikke vært relevant for kapasitetsberegningene. Derfor ble det utført en

**Tabell 10:** Prosjekter fra Ditio og Formworks.

<b>Rapporteringsystem</b>	<b>Prosjekt</b>	<b>Tunneltverrsnitt</b>
Ditio	Haramsfjordtunnelen	T8,5
Ditio	Nogvafjordtunnelen	T8,5
Ditio	Fjørtofttunnelen	T8,5
Ditio	Bubergtunnelen	T8,5
Ditio	Skarvebergtunnelen	T10,5
Formworks	Bagnskleivtunnelen	T10,5
Formworks	Ekebergtunnelen	T9 og T12
Formworks	Svartdalstunnelen	T9 og T11

filtrering og sortering av irrelevant data. Rapportene er sendt i form av Excelark, se Vedlegg H - Kapasitetsberegning Ditio (til november), Vedlegg I - Kapasitetsberegning Ditio (fra november), Vedlegg J - Kapasitetsberegning Formworks og Vedlegg K - Kapasitetsberegning Hæhre. I Ditio består Excelarkene av 47 kolonner med prosjektdata. I Formworks består Excelarkene av 40 kolonner med prosjektdata. Hver rad representerer et arbeidsskift.

Formel 1 viser at mengder og arbeidstimer kreves for å beregne kapasiteter. Kolonner i Excelfilene som omfatter de ulike vann- og frostsikringsmetodene, samt de ulike vann- og frostsikringsprosessene er også nødvendige for å kartlegge kapasiteter. Noen av de ulike arbeidsprosessene er også delt opp i forskjellige materialer som brukes for de ulike arbeidsprosessene. Dette muliggjør å danne kapasiteter som er tilpasset materialbruken i vann- og frostsikring. For eksempel kan kapasiteten for montering av bolter deles opp i de ulike boltedimensjonene som brukes. For eksempel montering av bolt med dimensjonen M20 og bolt med dimensjonen M16, som vist på Figur 6.



**Figur 6:** Filtreringsmuligheter i Dizio.

Resterende kolonner, utenom kolonner med inn- og utstemplingsstider og dato, er blitt skjult. Dette er gjort for å skape oversikt i Excelfilene. Kolonner med inn- og utstemplingsstider og dato er beholdt for å kunne sjekke gyldigheten til kapasitetene. For at de beregnede kapasitetene skal vurderes som gyldig er det opprettet to betingelser. Betingelsene er:

1. Den utregnede kapasiteten må ha inn- og utstemplingsstider som stemmer overens med registrerte timer.
2. Den utregnede kapasiteten må være innenfor de angitte grenseverdier. Dette gjelder for:
  - Maksimal mengde utført per skift.
  - Minimum og maksimum kapasitet per skift.

For å luke arbeidsskift med kapasiteter som ikke oppfyller betingelse 1, er det utført en filtrering. Det er dannet en egen kolonne som sjekker kapasitetene for hvert skift. Denne kolonnen viser tallet 1, om kriterie 1 er oppfylt, og 0 hvis det ikke er oppfylt. Denne betingelsen er programmert ved bruk av HVIS-funksjonen i Excel. Kolonnene med klokkeslett for innstempling og utstempling er omregnet til arbeidstimer. Disse omregnede timene er videre sjekket opp mot de kolonnene med de registrerte timene for hvert arbeidsskift, som vist i Figur 7.

I Figur 7 er skiftet som som er utført 14.10.2020 ugyldig, da kolonnen 'Timer netto' ikke er lik kolonnen 'Timer kontroll'. Her ligger det en usikkerhet i hvor mange faktiske timer som er utført, derfor er skiftet ugyldig. Dette er gjort på alle arbeidsskift som omfatter den spesifikke arbeidsaktiviteten.

X	Y	Z	AA	AB	AD	AP
Dato inn	Kl inn	Dato ut	Kl ut	Timer kontroll	Timer netto	Timesjekk
13.10.2020	11:30:00	13.10.2020	18:00:00	6,5	6,5	1
14.10.2020	06:00:00	14.10.2020	18:00:00	12	13	0

**Figur 7:** Betingelse 1 for filtrering i Ditio.

For å luke ut arbeidsskift med kapasiteter som ikke oppfyller betingelse 2, er det utført en lignende prosess som for betingelse 1. Det er lagt inn en HVIS-funksjon på samme måte som for betingelse 1. Det er laget to ekstra kolonner som gir tallet 1 hvis det er innenfor det gitte intervallet og tallet 0 hvis det er utenfor intervallet. Arbeidsaktivitetene har ulike grenseverdier i sine kapasiteter. Grenseverdiene er utarbeidet etter konsultasjonen med medveileder, Miguel Arestegui. Av konkurransehensyn vises ikke noen av disse grenseverdiene i teksten. Se Vedlegg G - Kapasitetsintervaller.

I tillegg til å filtrere skift som ikke oppfyller de overnevnte betingelsene, er det også filtrert vekk:

- Alle arbeidsskift registrert med null utførte mengder. Se fane «Eksempel på 0-mengder» i Vedlegg C - Kapasitetsberegning Ditio (til november)
- Alle arbeidsskift registrert med én eller færre utførte timer.

Slike arbeidsskift er vurdert som ugyldige da det ligger en usikkerhet i hva som faktisk har blitt utført og hvor lang tid som er blitt brukt, på disse skiftene. For resultat av utarbeidede kapasiteter se kapittel 4.

## 2.4 Feilkilder

Dette kapittelet har til hensikt å omtale mulige feilkilder som kan påvirke funnene i resultatkapittelet og konklusjonene som blir trukket av resultatene. Feilkildene kan deles inn i:

- Feilkilder i forbindelse med litteraturstudiet.
- Feilkilder i forbindelse med dokumentstudiet.
- Menneskelige IT-feil i rapportering i Ditio.

### **Feilkilder i forbindelse med litteraturstudiet**

Litteraturstudie ble gjennomført med en systematisk metode for å filtrere vekk irrelevante kilder og finne troverdige kilder. Til tross for dette, finnes det en mulighet for at ikke alle betraktninger om VF-sikring er inkludert. Anleggsbransjens fokus på byggetid for tunnelinnredning har vært noe mindre enn for tunneldriving. Det er gjort funn av litteratur som anses å være eldre og kan være utdatert.

### **Feilkilder i forbindelse med datainnsamling og behandling av data**

Ved datainnsamling er det innhentet en rekke produksjonsrapporter fra ulike aktører i bransjen. Dette er gjort gjennom mailkorrespondanse og digitale møter. Gjennom denne kommunikasjonen kan det ha oppstått misforståelser og blitt utgitt feilinformasjon. Siden dette er en forskningsmetode som baseres på mellommenneskelig relasjoner, er det en subjektiv oppfattelse av dialogene. Dette innebærer at det kan oppstå favorisering av informant, slik at en datakilde kan få stor plass relativt til andre datakilder. En slik feilkilde har også sin rot fra at det er valgt å ha mindre strukturerte og systematiske dialoger. Intervjuer og informant vil lettere danne nærhet og en relasjon som kan påvirke datainnsamling og –behandling (Buvik, 2019).

Dataen som er mottatt er av type fremdriftsplaner, ekspertkommentarer og produksjonsrapporter. Formålet med innhenting av data, har vært å kunne produsere kapasiteter for vann- og frostsikring. Da vann- og frostsikringsprosessen gjøres med ulike metoder, materiell og bemanning kan kapasitetene ha utelukket faktorer som kan innvirke på kapasitetene. Da masteroppgaven er en empirisk studie som bygger på store mengder data, kan forfatterens evne til å tolke dataene, fra de ulike datakildene, være en feilkilde. Ditio og Formworks er rapporteringssystemer, hvilket betyr at det kan forekomme feilrapportering av fagarbeiderne. En mulig årsak til feilrapportering kan være at de rapporterende ikke forstår rapporteringsprogrammet. Det kan også ha skjedd feilinntasting på app eller pc. Da vil det kunne medføre feilregistrering av både mengder og utførte arbeidstimer. Dette påvirker reliabiliteten og validiteten til kapasitetene.



## 3 Teori

Litteratur som presenteres i dette teorikapittelet kommer av litteratursøket. Store deler av litteraturen har også opphav fra formelle og uformelle samtaler med fagekspertter fra de ulike entreprenørene som er en del av samarbeidsforumet til EBA.

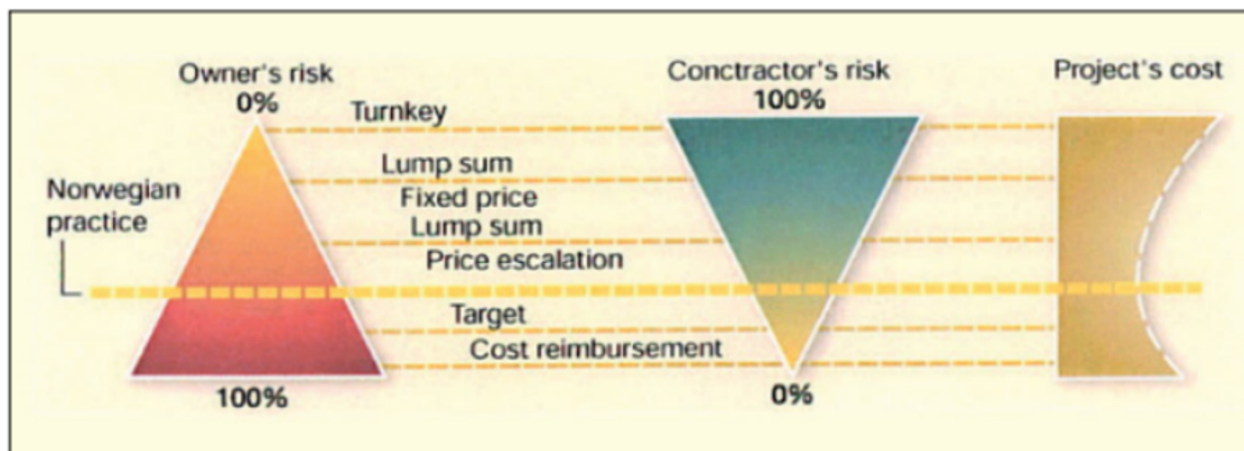
### 3.1 Anleggskontrakter

Teorien om anleggskontrakter baseres på artikkelen 'Contract philosophy in Norwegian tunnelling' av Eivind Grøv og er i sin helhet hentet fra fordypningsemne med mindre redaksjonelle endringer (Grøv, 2012).

Tunneler konstrueres med bergmassen som konstruksjonsmateriale, hvor det gjenstående bergrommet blir tunnelproduktet. Derfor er det nødvendig å utføre forundersøkelser, slik at kvaliteten til bergmaterialet kan avdekkes. Undersøkelsen viser blant annet om bergkvaliteten er tilstrekkelig nok til at berget kan være selvbærende. Når sikringsbehovene er avdekket, kan det kvantifiseres sikringsmengde og type sikring. Det blir også gjennomført kontinuerlige undersøkelser i tunnelen under produksjonen. Dette kalles byggherrens halvtime. Her avdekkes det om de prosjekterte sikringsbehovene samsvarer med de nødvendige sikringsbehovene.

Slike differanser håndteres med en fleksibel kontraktstype. Dette kalles enhetspriskontrakter med et ekvivalenttidssystem. Denne type kontraktsform ble utviklet ved vannkraftutbyggingen i Norge mellom 1960 og 1980-tallet. I disse kontraktene fordeles risikoen slik:

- Grunnforholdene: Byggherren har ansvaret for grunnforholdene. Derfor er det byggherre som har ansvaret for å gjøre gode nok forundersøkelser knyttet til geologi og geotekniske forhold. Forundersøkelsene danner grunnlaget for tilbudet entreprenøren skal regne på. Hvis de undersøkte forholdene er feil eller unøyaktige, er det byggherren sitt problem.
- Utførelse: Entreprenøren er den utførende part i et anleggsprosjekt. Det er da entreprenøren sitt ansvar å utføre arbeidet etter de tekniske krav og beskrivelser som byggherren har utarbeidet. Det er også entreprenøren sitt ansvar å utføre arbeidet innenfor kontraktfestede tidsfrister. Med ekvivalenttidssystemet kan mengder og tidsrammer reguleres hvis det viser seg at grunnforholdene ikke er slik byggherren antok. Entreprenøren får da betalt for de ekstra mengdene som må utføres for å drive sikkert. Figur 8 illustrerer risikofordelingen mellom byggherre og entreprenør.



**Figur 8:** Risikoforedeling mellom byggherre og entreprenør.  
(Grøv, 2012)

Ekvivalenttidssystemet baserer seg på standard kapasiteter. Det vil si tiden det tar for å utføre en gitt mengde arbeid. Tiden er oppgitt i timer. I Figur 9 er det hentet et utklipp fra Statens Vegvesen sine kontraktsbestemmelser. Disse kapasitetene regulerer byggetiden når grunnforholdene ikke er som forventet. På denne måten unngås det at byggherre eller entreprenør drar urimelige fordeler av bergforholdene. Ekvivalenttidssystemet kan brukes til å regulere uforutsett byggetid. Gjennom prosjekterte mengder som input, kan ekvivalenttidssystemets kapasiteter også estimere total byggetid. Her vil det bli estimert byggetid for alle stoffene på prosjektet (Grøv, 2012).

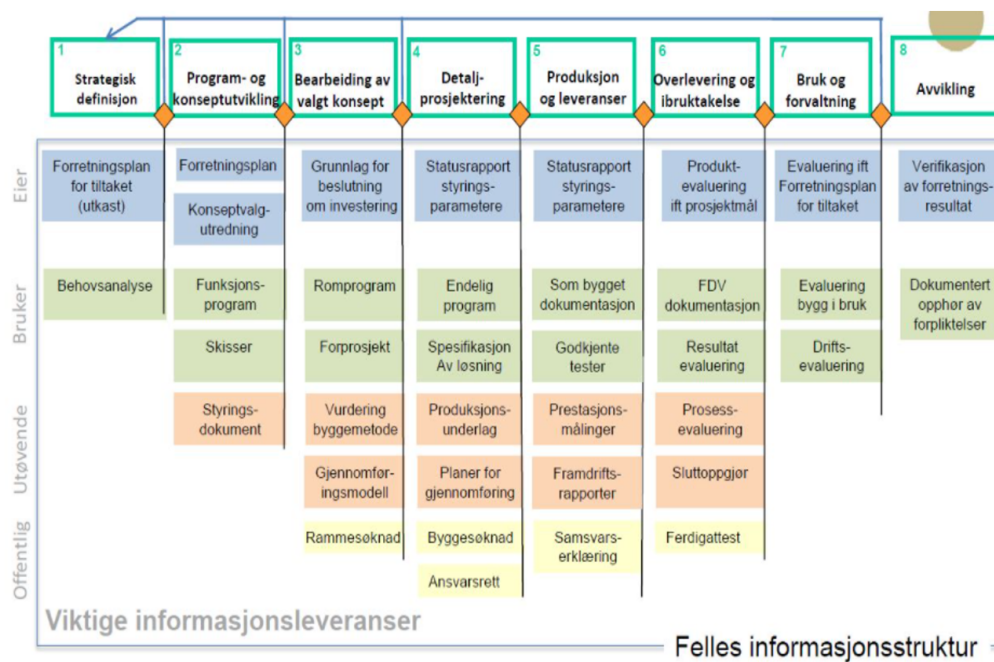
### 3.2 Byggeprosessen

Figur 10 illustrerer en generell byggeprosess. Denne modellen ble lansert av Bygg21 i 2015 og har til hensikt å være et rammeverk for å beskrive gjennomføringen av norske bygg- og anleggsprosjekter (bygg21). Dette er kun et eksempel på hvordan byggeprosessen kan deles inn og defineres. De ulike entreprenører, byggherrer og andre aktører kan ha sine egne modeller for gjennomføringsstrategi. Figur 10 illustrer at en byggeprosess kan deles opp i åtte steg. I denne oppgaven vil det bli ytterligere beskrevet steg 5: produksjon og leveranser. For ytterligere beskrivelse av de syv andre prosessene, se Bygg21 sitt 'Neste Steg'-rammeverk.

Steg 5: Produksjon og leveranse, har som formål å gjennomføre leveransen i henhold til planer og intensjoner, sikkert og med rett utførelse første gang. Prosessen kan deles inn i kjerneprosesser og ledelsesprosesser ut ifra de ulike perspektivene. Kjerneprosesser er hovedoppgaver og viktige hjelpeoppgaver i hvert av stegene. Ledelsesprosesser omfatter planleggings-, koordinerings- og styringsprosesser som må ivaretas for å løse kjerneprosessene på best mulig måte. Tabell 11 og Tabell 12 forklarer henholdsvis kjerneprosessen og ledelsesprosesser (Bygg21, 2015).

AKTIVITET	Mengde/time	Kontraktsmenge, tunnel del 1	Kontraktsmenge, tunnel del 2
<b>Arbeider ved stuff</b>			
Manuell driftsrensk	1 time / time		
Sikringsbolter med lengde til og med 5 m	12 stk. / time		
Sikringsbolter med lengde over 5 m	6 stk. / time		
Bånd	25 m / time		
Nett	10 m <sup>2</sup> / time		
Sikring med sprøytebetong	6 m <sup>3</sup> / time		
Tillegg for sikringsbuer av sprøytebetong	4 m / time		
Sikringsstøp	0,1 m / time		
Ekstra betong utover gjennomsnittlig tykkelse 0,4 m	10 m <sup>3</sup> / time		
Sprengning av tunnel med halv salvelengde	0,3 stk. / time		
Sprengning av tunnel med todelt tverrsnitt	60 m / time		
	1 time / time		
	2 time / stk.		
<b>Arbeider foran stuff</b>			
Boring av sonderhull, injeksjonshull og kontrollhull			
Injeksjonsarbeid			
Opp- og nedrigging for injeksjon inklusive herdetid			
Sum			

**Figur 9:** Bestemmelser for ekvivalentkontrakt. (Vegvesen, 2021a)



**Figur 10:** Byggeprosessen i åtte steg. (Bygg21, 2015)

**Tabell 11:** Kjerneprosesser fra ulike perspektiver.

<b>Perspektiv</b>	<b>Prosess</b>	<b>Leveranser</b>
Eierperspektivet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrahere nødvendige ressurser og kompetanse i henhold til prosjektets forretningsplan.</li> <li>• Overordnede beslutningstakere underveis i prosessen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oppdatert forretningsplan og rapportere status i henhold til styringsparametere.</li> </ul>
Brukerperspektivet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sikre at behov og krav blir ivaretatt under byggefasen.</li> <li>• Teste elementer og systemer.</li> <li>• Planlegge driften.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 'Som bygget'-dokumentasjon.</li> </ul>
Utøvendeperspektivet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Administrerere prosjektering-, produksjons- og leveranseteamet, inkludert byggeplassbesøk og fremdriftsoppfølging.</li> <li>• Styre fysisk produksjon og montasje.</li> <li>• Leverer i henhold til mål og rammer.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leveranse av fysisk utførelse og dokumentasjon.</li> <li>• Prestasjonsmålinger.</li> </ul>
Offentligperspektivet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avklare ansvar og sikre samsvar mellom premissdokumenter og faktisk produserte løsninger.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Søknad om ferdigattest.</li> </ul>

**Tabell 12:** Ledelsesprosesser.

Prosess	Beskrivelse
Planlegging	<ul style="list-style-type: none"><li>• Følge opp prosjekterings- og produksjonsplan.</li><li>• Oppdatere og detaljere plan for overlevering og prøvedrift.</li></ul>
Anskaffelser	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kontrahere produksjons- og leveranseteamet i tilfelle utførelsesentrepriser.</li><li>• Følge opp kontrakter.</li></ul>
Kommunikasjon	<ul style="list-style-type: none"><li>• Oppdatere BIM med endringer og informasjon fra leverandører.</li></ul>
Utsjekk for levedyktighet – Økonomi	<ul style="list-style-type: none"><li>• Følge opp prosjektøkonomi underveis.</li></ul>
Utsjekk for levedyktighet – Miljø	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sikre at ytre miljø blir ivaretatt.</li></ul>
Utsjekk for levedyktighet – Sosialt	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sikre en prosess som gir sikker og etisk råvareleveranse og produksjon.</li></ul>

### 3.3 Tunnelproduksjon

En tunnelproduksjon kan deles inn i to hovedprosesser; tunneldriving og tunnelinnredning. Disse prosessene vil bli forklart i dette kapittelet for å gi et helhetlig bilde av tunnelproduksjonen. Tunnelinnredningen som prosess vil bli forklart mer detaljert, da dette er hovedfokuset for oppgaven. Figur 11 er reproduisert etter Skanska sin strategimodell, og illustrerer omfanget av en tunnelproduksjon og en måte å fordele ansvar på (Arestegui, 2021a). Til tross for at elektroarbeid kan regnes som tunnelinnredning, er denne arbeidspakken ekskludert fra Figur 11 da den som regel utføres av en underentreprenør eller en annen entreprise (Arestegui, 2022).



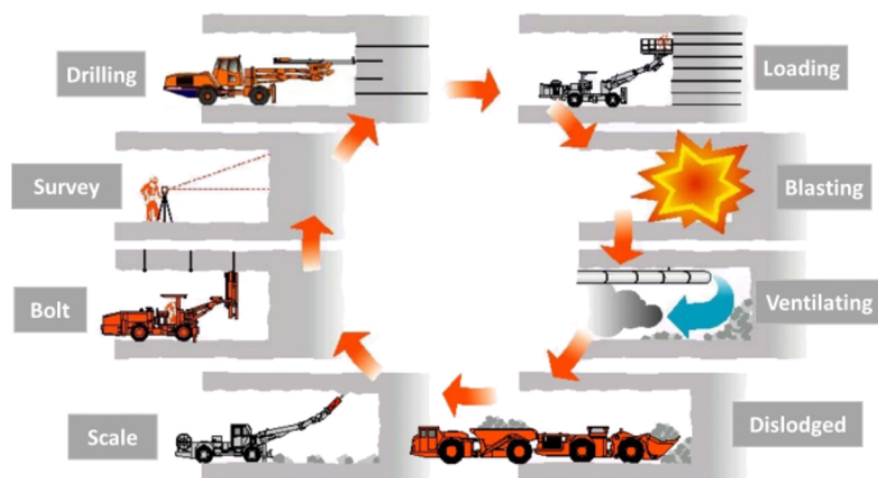
**Figur 11:** Inndeling av tunnelproduksjon.  
(Arestegui, 2021a)

### 3.3.1 Tunneldriving

Tunneldriving ved konvensjonell drift er etter prosesskoden definert som: 'Arbeidsoperasjon som omfatter boring, lading og sprengning av tunnel' (Vegvesen, 2020a). Mer spesifikt innebærer dette:

- Boring
- Lading
- Sprengning
- Ventilasjonspause
- Lasting og transport
- Rensk, bergsikring og kartlegging

Figur 12 illustrer en tunnelsalvesyklus.



**Figur 12:** Prosesser i en tunnelsalvesyklus.  
(Road, n.d)

Denne tunnelsalvesyklusen gjentar seg fram til gjennomslag. Figur 12 har til hensikt å illustrere alle prosessene ved tunneldrift, men rekkefølgen stemmer bare delvis. Dette kommer av at oppgavene kan skje samtidig, slik at en tunnelsalvesyklus ofte vil være mer kompleks logistisk sett (Kvikne, 2019).

### **3.3.2 Stabilitetssikring**

Hensikten med stabilitetssikring i tunnel er å hjelpe bergmassen til å bære seg selv. For å determinere nødvendig stabilitetssikring, må det utføres en strukturell geoteknisk analyse, gjennomført med numeriske modeller og erfaringsbaserte metoder (NFF, 2010).

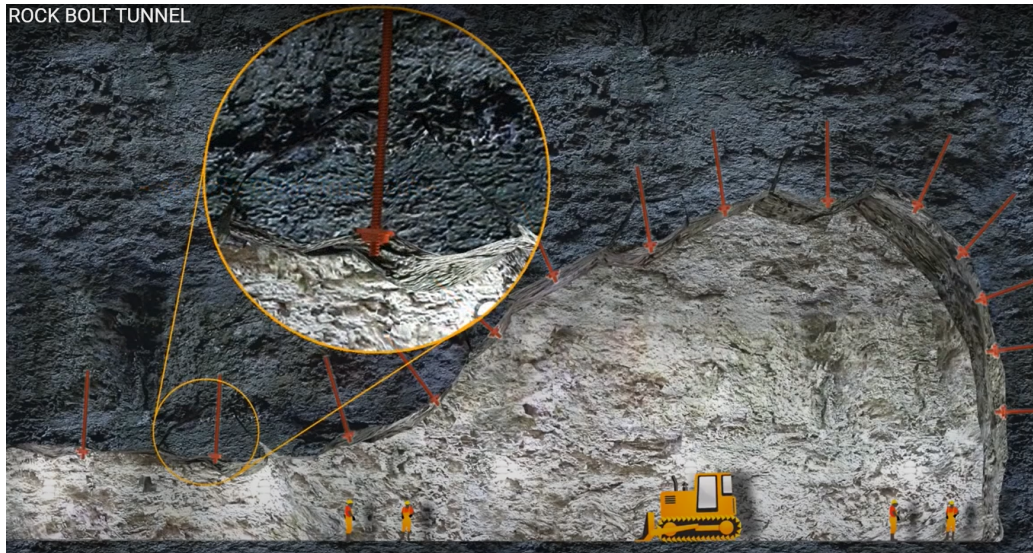
I Norge brukes det enhetspriskontrakt i anleggsprosjekter. Denne kontrakten har forhåndsdefinerte metoder som tilpasses hvert enkelt prosjekt. Ved kontraktinngåelse er det utført beregninger for antatte mengder sikring. Type og mengde sikring vurderes og bestemmes i takt med framdrift, som vil si etter frilegging av ny bergoverflate for hver ny salve. Det utøves en rekke ulike metoder for at bergmassen skal bære seg selv (NFF, 2010). De mest anvendte metodene er:

- Bolting
- Sprøytebetong
- Injeksjon
- Forbolting
- Betongutstøpning

Metodene som videre blir omtalt, er metodene som anses som mest relevant for masteroppgaven. Her menes det stabilitetssikringens påvirkning på tunnelinnredning.

#### **Bolting**

Hensikten med sikring ved bolting er at enden av bolten skal feste seg dypere inn i bergmassen, som vist på Figur 13. På denne måten vil strekkspenningen i bolten sikre mot ras. Boltingen kan skje systematisk eller spredt, avhengig av hvor dårlig berg det opereres med (NFF, 2010).



**Figur 13:** Illustrasjon av bolting.  
(Marijo, 2019)

### **Sprøytebetong**

Sprøytebetong skal hindre bevegelse av sprekker og blokker, og utfall av mindre berg. Sprøytebetongen har egenskaper som skaper bedre skjærstyrke og bøyestrekfasthet (NFF, 2010). Figur 14 viser påføring av sprøytebetong på bergmassen.

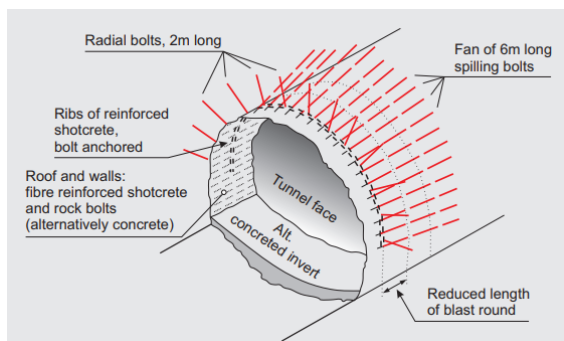


**Figur 14:** Påføring av sprøytebetong.  
(Snemyr, n.d)

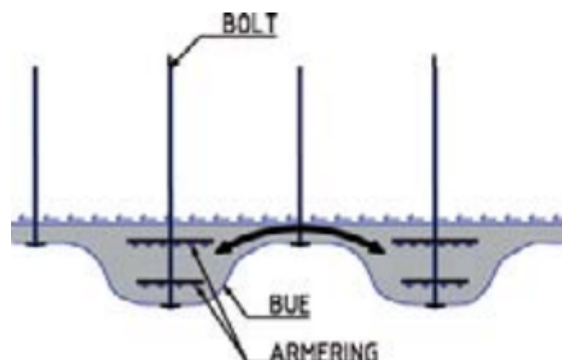


## Forbolting

Forbolting anses som tyngre sikring, og anvendes ved tunneldriving i svært dårlig berg. Bolter monteres i tunnelens lengderetning før en salve sprenges. Hensikten er å unngå utfall eller ras av blokker, da det opereres med en bergmasse som har dårlig selvbærende evne. Boltene forankres med radielle bolter. Denne konstruksjonen kan forsterkes med armering og videre dekket av sprøytebetong om nødvendig (NFF, 2010). Figur 15 illustrerer elementene som inngår i konstruksjonen. Figur 16 illustrer tverrsnittet av forbolting med armering og sprøytebetongbue.



**Figur 15:** Prinsipp tegning for forbolting.  
(NFF, 2009)



**Figur 16:** Tverrsnitt av forbolting.  
(NFF, 2010)

### 3.3.3 Tunnelinnredning

Etter gjennomslag starter tunnelinnredningen. Tunnelinnredningen utføres som en sekvens av ulike aktiviteter som henger tett sammen. Disse aktivitetene utføres delvis parallelt i ulike strekninger inn i tunnelen (Arestegui, 2021b). Tunnelinnredningen deles inn i tre arbeidspakker. Arbeidspakkene er:

1. Grunnarbeid, vei, vann og avløp
2. Vann- og frostsikring
3. Kompletterende arbeid

Arbeidspakkene kan deles opp i mindre arbeidsprosesser:

#### Grunnarbeid, vei, vann og avløp:

- Såle, grøfter
- Vann- og avløpsarbeid
- Veioppbygging
- Asfalt (før vann- og frostsikring)

### **Vann- og frostsikring:**

- Montering av tunnelkledning
- Brannsikring

### **Kompletterende arbeid:**

- Asfalt (etter vann- og frostsikring)
- Konstruksjoner og montering av teknisk bygg
- Øvrige arbeider

Etter tunnelinnredningen utføres elektroarbeid. Elektroarbeid kan deles opp i mindre arbeidsprosesser:

- Fellesanlegg
- Ventilasjon
- Belysning

## **3.4 Vann- og frostsikring i tunnel**

### **3.4.1 Generelt**

Kapittel 3.4 er basert på fordypningsemnet, men er betydelig utvidet og bearbeidet på bakgrunn av utvidet litteratursøk og økt kunnskap etter feltstudie på Nordøyvegen-prosjektet.

Vegtunneler skal sikres mot vann og is (Vegvesen, 2020b). SVV sin Håndbok N500, normal for vegtunneler, gir en generell beskrivelse for krav til VF-sikring; 'Det skal ikke være lekkasjevann eller isdannelse i trafikkrommet, i nødutganger, i nisjer til tekniske bygg eller i ventilasjonssjakter. Lekkasje i vegger og heng skal samles opp ved at det monteres en vanntett avskjerming som fører vannet ned til grøft og frostfritt ut av tunnelen via drencsystemet'.

Et eksempel på en utilstrekkelig VF-sikringskonstruksjon er illustrert i Figur 17. Illustrasjonen er fra 2016 og viser arbeidere som rydder is fra jernbaneskinner og kjøreledninger. Arbeiderne måtte daglig ut å vedlikeholde banen. Illustrasjonen har til hensikt å vise viktigheten av vann- og frostsikring med tanke på sikkerheten for det som ferdes i tunnelen.

Vannlekkasjer kan også medføre (Jernbanekompetanse, 2021) (NTH, 1995):

- Grunnvannssenkning, som videre kan forårsake skade på bebyggelse i form av setninger, samt endret vegetasjonsmønster.

- Tåke, mørk og våt kjørebane og tilgrising av skilt og markering som gir redusert trafikksikkerhet.
- Korrosjon på bærende metall- og betongkonstruksjoner og på skinnegangen.
- Dannelse av vaskesviller og isdannelser i profilet. Vaskesviller er en oppumping av finstoff rundt svillene ved togpasseringer.

Frostsikring skal forhindre at gjentatte fryse- og tineprosesser får anledning til å sprengte løs blokk og stein, og da redusere stabiliteten i fjellet (NTH, 1995).



**Figur 17:** Fjerning av is på Bergensbanen.  
(Ekanger, 2019)

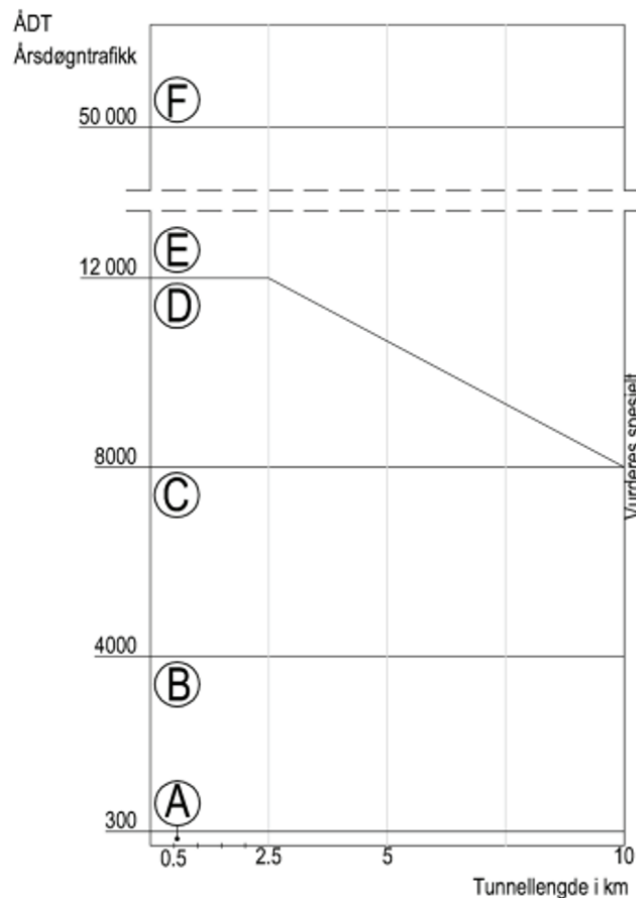
Vann- og frostsikring omfatter levering og alle arbeider med vann- og frostsikring av heng og vegger i tunnel. Metode for utførelse velges ut ifra (Vegvesen, 2020a):

- Tunnelklasse og tunnelprofil
- Frostmengde
- Drifts- og vedlikeholdshensyn

Tunnelklasse, tunnelprofil og frostmengde vil bli beskrevet ytterligere med den hensikt å gi økt forståelse av hvordan vann- og frostsikring dimensjoneres og utføres. Videre skal dette gi forståelse om hvordan byggetidsmodellen brukes og er bygd opp.

### Tunnelklasse og tunnelprofil

Tunnelklasse og tunnelprofil avhenger av tunnellengde og forventet årsdøgntrafikk (ÅDT). ÅDT er total trafikkmengde per år dividert med 365 og angis som sum trafikk i begge retninger (Vegvesen, 2006). Se Figur 18 for klassifisering av tunnelklasse ut ifra ÅDT.



**Figur 18:** Tunnelklasse basert på ÅDT.  
(Vegvesen, 2006)

Tunnelklasse velges ut ifra trafikkmengden som kan forventes 20 år etter åpningen, ÅDT (20). Ved usikkerhet i beregningsgrunnlaget, forårsaket av for eksempel ujevn trafikkmengde over døgnet eller året, velges tunnelklasse basert på risikoanalyse (Vegvesen, 2020b). Tunnelklasse bestemmer kravene til sikkerhetstiltak og sikkerhetsutrustning i tunneler med lengde over 500m. Tunnelklasse avgjør antall tunnellop, behov for havarinisjer, snunisjer, nødutganger samt sikkerhetsutrustning (Vegvesen, 2020b). Figur 19 og Figur 20 viser SVV sine krav til sikkerhetstiltak og sikkerhetsutrustning.

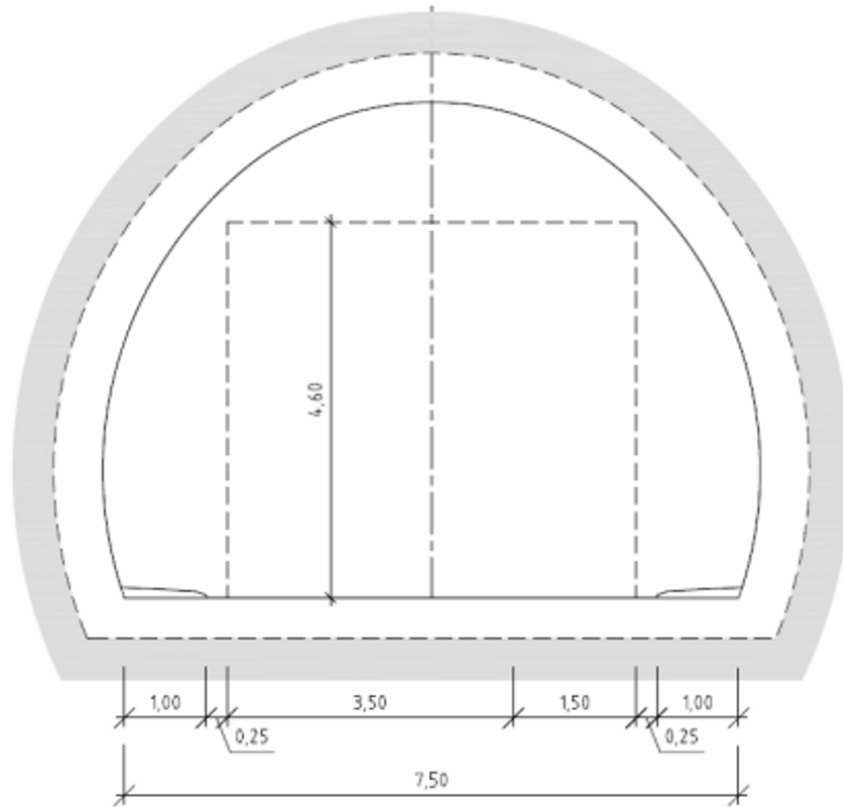
● Krav ○ Vurderes	Tunnelklasser						Merknader
	A	B	C	D	E	F	
SIKKERHETSTILTAK							
Havarinisjer		●	●	●	●	●	Se kapittel 3 Geometrisk utforming
Snunisjer		●	●	●			Se kapittel 3 Geometrisk utforming
Nødutganger			○	●	●	●	Se kap. 3.6
SIKKERHETSUTRUSTNING							
Strømforsyning, belysning og ventilasjon	Se kapittel 9 Tekniske anlegg						
Skilt og signaler	Se kapittel 5						
Nødstrømsystem	●	●	●	●	●	●	Belysning ved strømutfall. Se 4.3.2.1 og 9.3.6
Rømningslys	●	●	●	●	●	●	25 m avstand for tunneler < 5 km. Ettløpstunneler > 5 km skal ha sammenhengende lys. Se 4.3.2.2
Nødstasjon	●	●	●	●	●	●	Hver 125 m. Se kap. 4.3.2.3. Ved oppgradering min. hver 250 m (jf. 4.3.4). I tillegg utenfor hver tunnelåpning.
Slokkevann	●	●	●	●	●	●	Se 4.3.2.4
Fjernstyrte bommer for stengning		○	●	●	●	●	Se 4.3.2.5
ITV-overvåking		○	○	○	○	○	Krav i tunneler > 3 km og ÅDT > 4 000. Krav i tunneler > 5 km og ÅDT > 300. Se 4.3.2.6
Høytalersystem		○	○	○			Krav i tunneler > 3 km og ÅDT > 4 000. Krav i tunneler > 5 km og ÅDT > 300. Se 4.3.2.7
Nødnett og radiokringkasting	●	●	●	●	●	●	Se 4.3.3
Høydehinder (avviser)	●	●	●	●	●	●	Se 4.3.2.8

**Figur 19:** Tunnelklassers krav til sikkerhetsutrustning.  
(Vegvesen, 2020b)

Tunnelklasse	Normalavstand havarinisje	Normalavstand snunisje	Kommentar
A	–	–	Møteplasser
B	500 m	2 000 m	Snunisje bygges i tunneler > 4 km
C	375 m	1 500 m	Snunisje bygges i tunneler > 3 km
D	250 m	1 000 m	Snunisje bygges i tunneler > 2 km
E	500 m	–	Angitt avstand gjelder for hvert tunnellopp
F	250 m	–	Angitt avstand gjelder for hvert tunnellopp

**Figur 20:** Tunnelklassers krav til nisjer.  
(Vegvesen, 2020b)

Tunnelprofil gis i betegnelse etter total bredde i kjørebanelnivå, som vist i Figur 21. Figur 21 har tunnelprofil T7,5. Tunnelprofil T4 utformes med rette vegger. T5,5-T14 i bergtunneler utformes med sirkulært profil over kjørebanelnivå (Vegvesen, 2006).



**Figur 21:** Tunneltverrsnitt T7.5.  
(Vegvesen, 2006)

### Frostmengde

Frostisolasjon dimensjoneres for frostmengden på tunnelens lokasjon. Frostmengde beregnes med enheten frosttimegrader ( $h^{\circ}C$ ). Frosttimegrader er et uttrykk for summen av produktet av døgnmiddeltemperaturen og antall timer i frostperioden. Dersom det for eksempel i et døgn er gjennomsnittlig ti minusgrader, blir døgnet frostmengde  $24 \times 10 = 240$  frosttimegrader (Vegvesen, 2006).

For vegtunneler er det vanligvis frostmengden  $F_{10}$  ( $h^{\circ}C$ ) ved tunnelåpningen, som fastsetter dimensjoneringskriterier.  $F_{10}$  defineres som den høyeste frostmengden som statistisk sett inntreffer én gang i løpet av en periode på ti år. For jernbane er det vanligvis  $F_{100}$  som fastsetter dimensjoneringskriterier.

Dersom det kan dokumenteres lavere frostmengde innover i tunnelen kan frostmengden,  $F_{10T}$  ( $h^{\circ}C$ ), legges til grunn. Slike tilfeller inntreffer når lokale forhold gir lavere frostmengde enn frostmengden,  $F_{10}$ , for kommunen. Da bør dimensjonerende frostmengde baseres på lokale målinger (Vegvesen, 2020b).

Figur 22 presenterer et utklipp av SVV sin Håndbok N200, Vegbygging. Utklippet viser eksempelvis dimensjonerende frostmengde for gamle Østfold fylke.

Kommune nr.	Kommune-navn	Årsmiddel-temp., °C	Frostmengder, h°C				Korreksjonsfaktorer	
			F <sub>2</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>100</sub>	Min.	Maks
<b>Østfold</b>								
101	Halden	6,3	4000	9000	11 000	20 000	0,86	1,22
104	Moss	6,4	4000	8000	11 000	19 000	0,93	1,15
105	Sarpsborg	6,3	4000	9000	12 000	21 000	0,83	1,24
106	Fredrikstad	6,7	3000	7000	10 000	18 000	0,84	1,21
111	Hvaler	7,2	2000	6000	8 000	14 000	0,94	1,07
118	Aremark	5,4	6000	12000	15 000	26 000	0,90	1,09
119	Marker	5,0	8000	14000	18 000	30 000	0,89	1,14
121	Rømskog	4,4	9000	16000	20 000	34 000	0,97	1,04
122	Trøgstad	4,9	7000	13000	17 000	29 000	0,94	1,11
123	Spydeberg	5,3	6000	12000	15 000	27 000	0,95	1,07
124	Askim	5,2	6000	12000	16 000	27 000	0,97	1,04
125	Eidsberg	5,3	6000	12000	16 000	28 000	0,94	1,08
127	Skiptvet	5,4	6000	11000	15 000	26 000	0,92	1,03
128	Rakkestad	5,4	6000	11000	15 000	27 000	0,89	1,07
135	Råde	6,0	5000	9000	13 000	23 000	0,85	1,07
136	Rygge	6,1	4000	8000	11 000	19 000	0,97	1,18
137	Våler	5,9	5000	10000	13 000	23 000	0,94	1,13

**Figur 22:** Dimensjonerende frostmengde for gamle Østfold fylke.  
(Vegvesen, 2018)

Korreksjonsfaktorene i Figur 22 er angitt for å regulere frostmengder ut ifra variasjoner i statistiske frostmengder innen en kommune. Frostmengden multipliseres med korreksjonsfaktorene for å finne maksimum og minimum frostmengde innenfor et område (Vegvesen, 2018). Figur 23 angir hvilke type prosesser som benyttes i Norge, avhengig av bruksområde, frostmengde, tunnelklasse og hvilke konstruksjonsdetaljer som brukes (Vegvesen, 2020b).

Vann- og frostsikring	Frostmengder <sup>(1)</sup> (kap.7.2)	Tunnelklasser						Føringskant	Membran Type I, II, III	PE-skum	Frost-isolasjon XPS
		A	B	C <sup>(4)</sup>	D	E	F				
Hvelv av sprøytebetong <sup>(2)</sup>	F <sub>10</sub> < 8 000 h°C	X	X	X				X	III	(X)	-
	F <sub>10</sub> ≥ 8 000 h°C	X	X	X				X	-	X	-
Hvelv av betongelementer <sup>(3)</sup>	F <sub>10</sub> < 8 000 h°C			(X)	X	X	X	-	I, III	-	-
	F <sub>10</sub> ≥ 8 000 h°C			(X)	X	X	X	-	I, III	-	X
Kontaktstøpt vann-/frostsikrings-hvelv med membran	Alle F <sub>10</sub>			(X)	(X)	(X)	(X)	-	II	-	-
Tunnelportal		X	X	X	X	X	X	-	I		-

**Figur 23:** Vann- og frostsikringsprosesser for ulike dimensjonerende kriterier.  
(Vegvesen, 2020b)

Som angitt i Figur 22 og Figur 23, avgjør frostmengden dimensjonen for ulike vann- og frostsikringsprosesser. På Figur 24 angis dimensjon for XPS og PE-skum. Figur 25 angir tykkelse for lettbetongelementer. Konstruksjonsdetaljer om de ulike vann- og frostsikringsprosessene diskuteres i detalj, i kapitlene 3.4.2 og 3.4.3.

Frostmengde, $F_{10T}$ ( $h^{\circ}C$ )	XPS (mm) minimum tykkelse	PE-skum (mm) minimum tykkelse
< 8 000	-	-
8 000 – 10 000	50	45
10 000 – 15 000	50	50
15 000 – 20 000	50	60
20 000 – 25 000	60	70
25 000 – 30 000	60	80
> 30 000	70	90

**Figur 24:** Krav til tykkelse for ulike frostmengder for XPS og PE-skum.  
(Vegvesen, 2020b)

Frostmengde, $F_{10T}$ ( $h^{\circ}C$ )	Min. tykkelse (mm)	varmekonduktivitet $\lambda$ W/(m·K)
$\leq 10\ 000$	150	$\leq 0,6$
$\leq 15\ 000$	200	$\leq 0,6$
$\leq 20\ 000$	250	$\leq 0,6$

**Figur 25:** Krav til tykkelse for ulike frostmengder.  
(Vegvesen, 2020b)

For dimensjonering av vann- og frostsikring i jernbanetunneler må det også tas hensyn til flere faktorer i tillegg til frostmengde. I jernbanetunneler er det betydelig høyere trykk- og sugekrefter, og tilgjengelighet for vedlikehold er ofte svært begrenset (Jernbanekompetanse, 2021). Denne dimensjoneringen blir ikke videre utdypet, da masteroppgaven er begrenset til vegtunneler.

I SVV sin Håndbok R761 er det ti hovedprosesser, fra 0 til 9. Vann- og frostsikring beskrives under hovedprosess 3: Tunneler. Vann- og frostsikring har prosesskode 34, hvor prosessene betegnes:

- 34.2 Kontaktstøpt betonghvelv med membran
- 34.3 Hvelv av sprøytebetong
- 34.4 Betonghvelv

Håndbok R761 beskriver prosess 34.2 Kontaktstøpt betonghvelv med membran som: 'Omfatter levering av alle arbeider i forbindelse med utstøpning av betong, inklusive bergavgjevning med



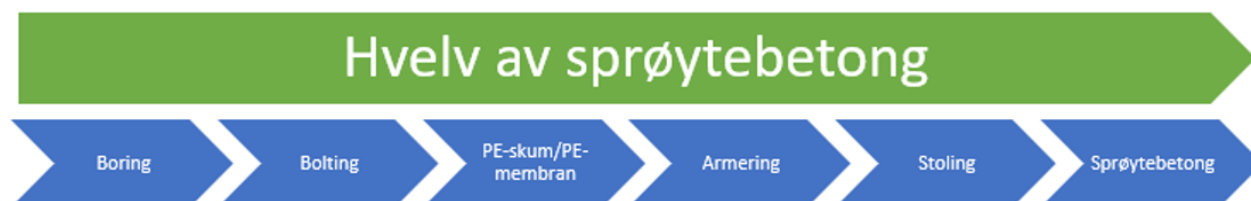
sprøytebetong, beskyttelsesduk og membran med festedetaljer, fugebånd etc' (Vegvesen, 2020a). 34.2 Kontaktstøpt betonghvelv med membran er en prosess som ikke kommer til å bli videre beskrevet, da denne prosessen er ekskludert fra byggetidsmodellen. Dette er igjen begrunnet med at dette er en mindre utøvd prosess for vegtunneler og dermed lite datagrunnlag for å utarbeide kapasiteter.

### 3.4.2 34.3 Hvelv av sprøytebetong

Hvelv av sprøytebetong monteres som brannsikring over hvelv av PE-skum som vann- og frostsikring, eller over membran som vannsikring i lavfrostsoner (Vegvesen, 2021b). Arbeidsaktivitetene som inngår i 34.3 Hvelv av sprøytebetong vises i Figur 26 og forklares kort i Tabell 13.

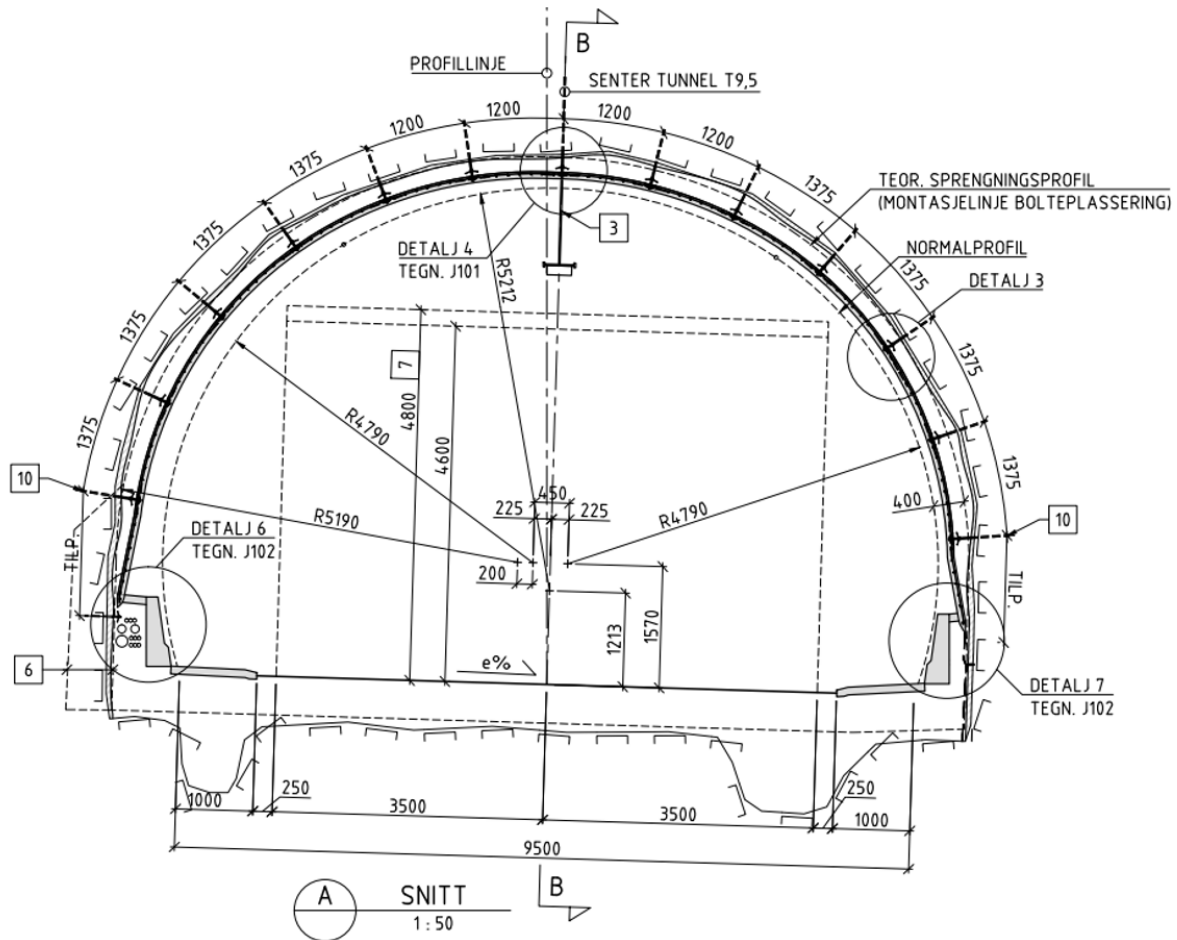
**Tabell 13:** Forklaring av aktiviteter som inngår i 34.3 Hvelv av sprøytebetong.

Post	Forklaring
Boring	Boring av hull som det skal settes bolter i.
Bolting	Montering av bolter for PE-skum/membran, ventilatorer bjelker, skilt og annet utstyr.
PE-skum/Membran	Montering av plater av PE-skum/membran.
Armering	Montering av armeringsnett.
Stoling	Montering av stoler som skaper avstand mellom armering og PE-skum/membran.
Sprøytebetong	Sprøytebetong påføres vann- og frostsikringen for å brannsikre konstruksjonen.



**Figur 26:** Tidsbestemmende aktiviteter for 34.3. (Arestegui, 2021a)

Figur 27 viser et eksempel på et T9,5 tunneltverrsnitt, som er sikret med hvelv av sprøytebetong og nedre føringskant. Fra figuren fremkommer dimensjoner for de ulike komponentene i vann- og frostsikringen.



**Figur 27:** T9,5-tunnel med hvelv av sprøytebetong.  
(Rønneberg, 2016)

## Boring

Boring av hull for montasjeboltene for PE-platene kan starte etter at tunnelen er drevet ferdig, men det foretrekkes å starte med boring etter asfaltering (bærelag). Dette er foretrukket da det gir bedre muligheter for høyere kapasiteter. Boring utføres etter en digital boreplan som er utarbeidet av entreprenøren. Boreplanen er basert på ferdig prosjektert prosess for vann- og frostsikring og den faktiske tunnelprofilen etter driving (Skanska Norge, 2014).

## Bolting

Typiske tverrsnitt med bolteavstander er angitt på prosjekterte tegninger. Avstand mellom bolteradene i lengderetning er typisk 1375 mm tilpasset standard PE-skumbredde på 2750 mm. Generell bolteavstand i bolterader i tverretningen, er 1375 mm. Nisjer og andre breddeutvidelser medfører økt antall bolter. Dette medfører fortetting av boltemønsteret i midtre del av hengen (Rønneberg, 2016). Utenom bolting for PE-platene inngår festbolter for ventilatorer og festbolter for bjelker, skilt og annet utstyr i boltearbeidet (Skanska Norge, 2014).

## Montering av PE-skum/Membran

Utfordringen ved montering av PE-platene, er ofte å få det tilstrekkelig tett rundt boltegjennomføringer og i skjøtene mellom platene (NTH, 1995). Ved montering av platene tillates åpning inntil 10 mm i buttskjøt mellom platene. I borplanen må det planlegges for økende kurvatur, nisjer eller andre breddeutvidelser, slik at platebredden og retning på bolterader må tilpasses aktuell tunnelgeometri. Tilpasning av platene skjer ved kapping av platen langs sidekanten uten påsveiset PE-skjørt (Rønneberg, 2016).

Ofte fører tverrsnittsendring til lekkasjer hvis det i deler av tverrsnittet oppstår motfall på platehvelvet i forhold til overlappskjøten. Tverrsnittsendring oppstår typisk ved inn- og utgang av nisjer. Områder med tverrsnittsendring vil være aktuelle for tradisjonell montasje. Montasjen utføres typisk da med 1,2 x 1,2 m og skjøtløsning med overlappende plater (Rønneberg, 2016). I slike områder med utvidelser, vil det avhengig av tunnelens lengdefall, i del av tverrsnittet kunne oppstå motfall på PE-skumhvelvet i forhold til overlappskjøten. Dette kan føre til lekkasjer i våte partier. Dette kan forhindres ved at det monteres en membran over aktuelle områder i tillegg til PE-skummet (Rønneberg, 2016).

Som beskrevet kan PE-skummet monteres med overlapp eller kant-i-kant, også kalt butt-i-butt. Avhengig av monteringsmetode utføres det med ulike armeringsnett og bolteavstander, som vist i Figur 28.

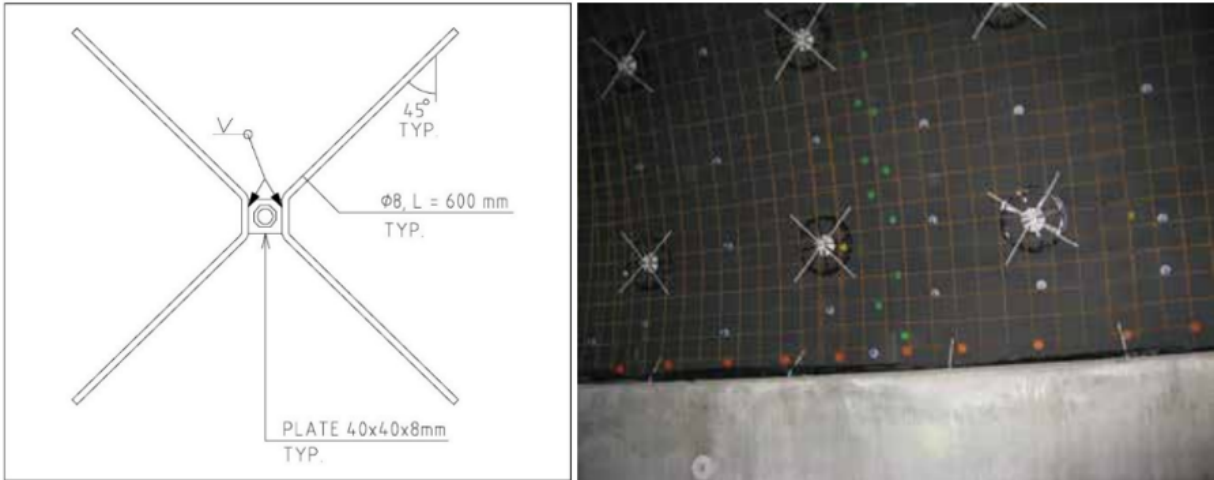
	Bolteavstand m	Armeringsnett	Øvrige merknader
Membranhvelv	1,2x1,2	K 131	Metode for heft til betong
PE med overlapp	1,2x1,2	K 131	
PE kant i kant	1,375x1,375	K 189	Plateskjøt vannavskjermes

**Figur 28:** Bolteavstand og armeringsnett for ulike tunnelkledninger.  
(Rønneberg, 2016)

## Armering og stoling

For at konstruksjonen skal bli selvbærende, brukes et armeringsnett som omkranser tunnelkonturen. Armeringsnett festes inntil bolter ved bruk av armeringsbeslag. For å skape avstand mellom armeringsnett og PE-plater, monteres armeringsstoler. Armeringsstoler er små plastpluggere som skrues i PE-platene. Stolingpluggene sikrer også riktig overdekning av betong ved brannsikring. Sammen med armeringsstolene forbindes armeringsnettet og PE-platene med et armeringsbeslag. Dette er en konstruksjon som ofte er kalt 'blekksprut' eller 'kråkefötter' (Vegvesen, 2021b). Dette vises på Figur 29.

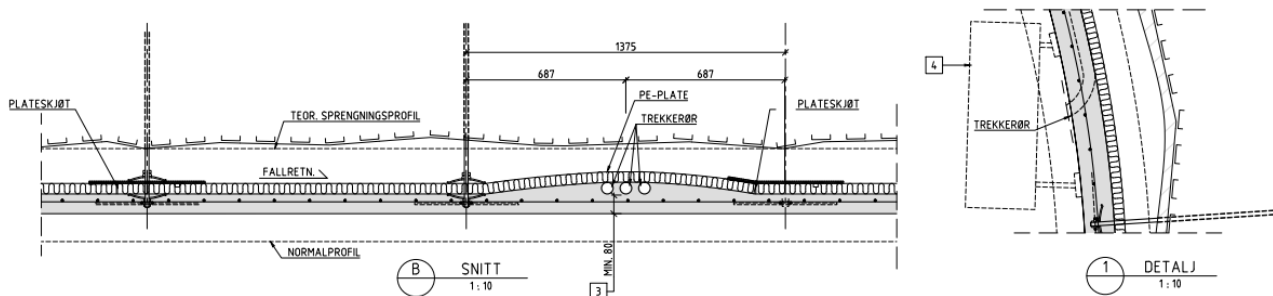
Det er viktig å være påpasselig ved montering av armeringsstolene, slik at de ikke skrues inn i platene. Skrues det inn i platene kan montasjelinjen bli sammenfallende med drenssporet på platens bakside.



**Figur 29:** Armeringsstoler forbundet med 'blekksprut'.  
(Vegvesen, 2021b)

Dette er for å hindre at det kan oppstå lekkasjer ved gjennomskruing av stolene (Rønneberg, 2016). Ved skjøting av armeringsnett er det minimum én rute overlapp (200 mm). Ved overlappsområder må sprøytebetongtykkelsen økes lokalt for oppnå samme overdekning mot tunnelsiden som for tilstøtende flater (Rønneberg, 2016).

Mellom PE-platene og armering blir også trekkerør til skilt og teknisk utstyr montert. Trekkerør føres fra trekkekummer bak føringskanten. For videre trekkerørsføringer i sprøytebetonghvelvet fra trekkekum bak føringskanten, monteres trekkerøret mellom armeringsnettet og PE-platen og opp til aktuell installasjon (Rønneberg, 2016). Dette vises på Figur 30.



**Figur 30:** Utsnitt av trekkerørsføringer.  
(Rønneberg, 2016)

## Sprøytebetong

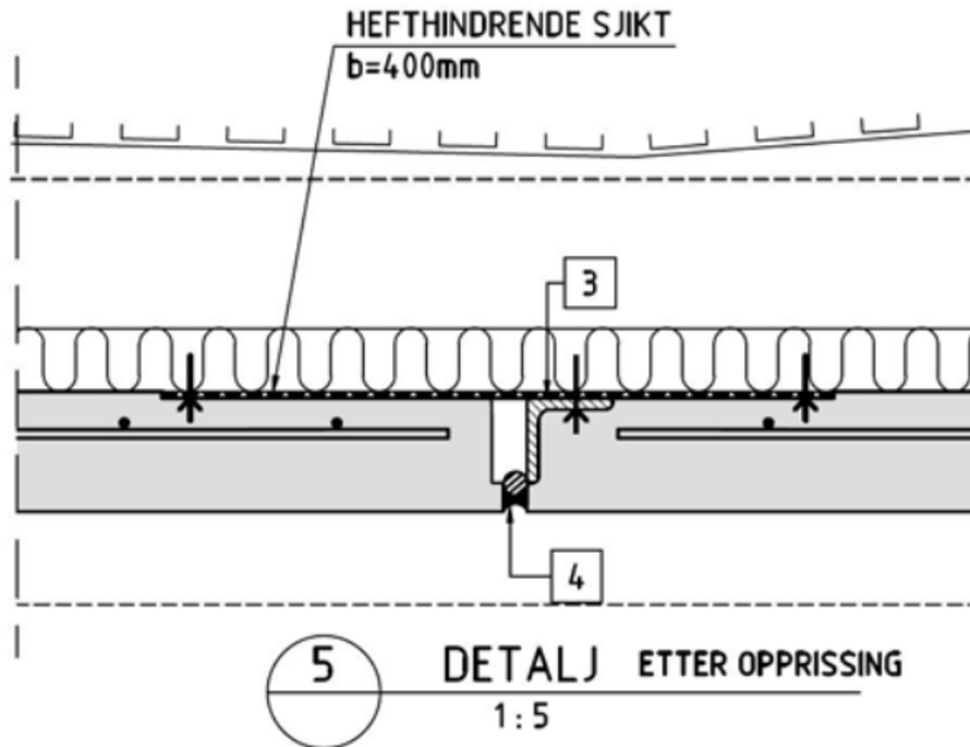
Etter stoling blir den ferdige konstruksjonen sprøytet med sprøytebetong. Sprøytebetongen påføres lagvis og når armeringsnettets er dekket av sprøytebetong, er rett tykkelse oppnådd, som vist på Figur 31 (Skanska Norge, 2014).



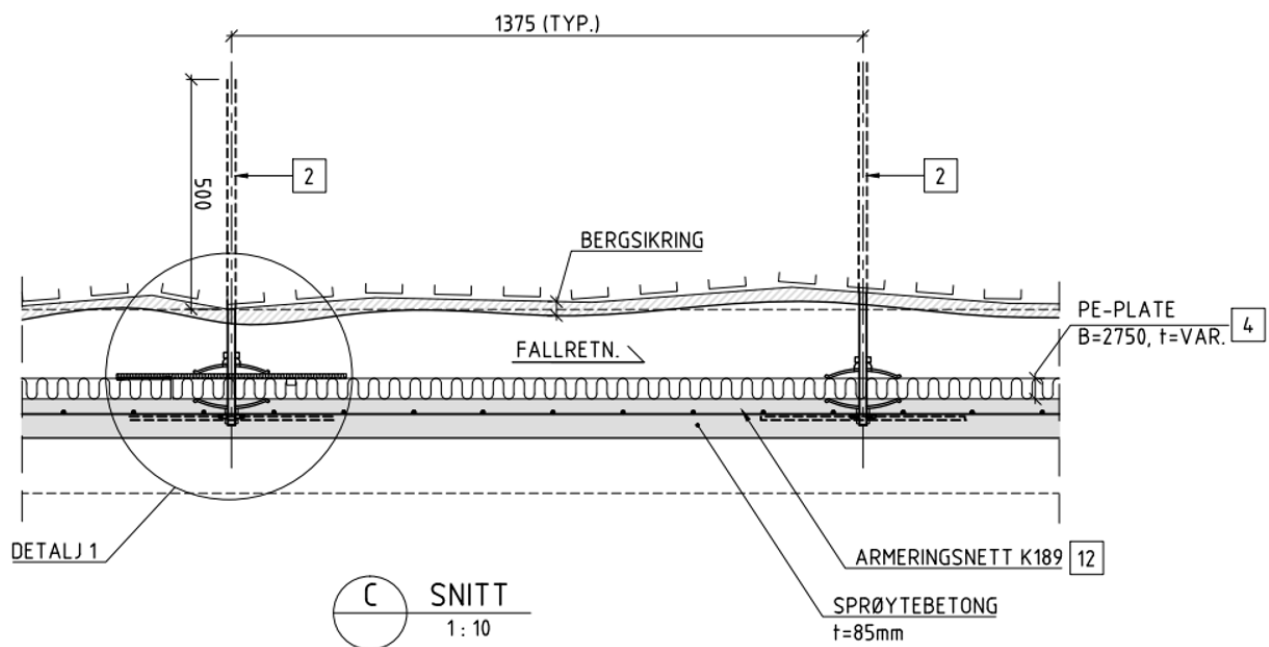
**Figur 31:** Påførelse av sprøytebetong.  
(Skanska Norge, 2014)

Sprøytebetongen bidrar til styrke, visuelt inntrykk og brannbeskyttelse (NTH, 1995). Sprøytebetong utføres med tykkelse 80-85mm og påføres i minimum tre lag (Strype, 2022). Første lag sprøytes ut mot armeringsnettets. De to resterende lagene påføres med tilnærmet lik lagtykkelse. Nysprøytet flate skal sikres mot uttørking. Det brukes da internherdner som tilsettes direkte i sprøytebetongen ved påføring, eller at betongen holdes fuktig ved vanning (Rønneberg, 2016).

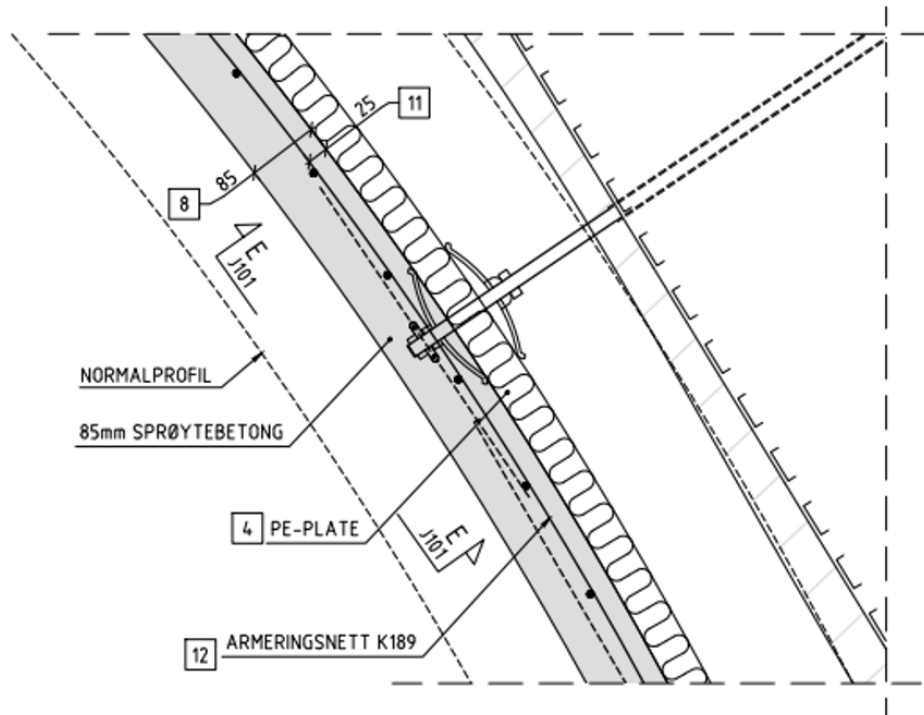
Før betongsprøyting blir det montert dilatasjonsfuger med en generell senteravstand på 30-40 m. Fugene monteres omtrent sentrisk mellom to bolterader. For å kontrollere opprissing monteres det rissanviser (plastvinkel) som festes direkte inn i PE-platen. Mellom plastlisten og PE-platen monteres et sjikt med bredde ca. 400 mm som skal hindre heft mellom sprøytebetongen og PE-platen. Dette sjiktet skal fordele bevegelsen i fugen over en større lengde av PE-platen, og da hindre brudd i platen ved opprissing eller ved økende fugebredde fra svinn i betongen (Rønneberg, 2016). Dette vises på Figur 32. Figur 33 og Figur 34 illustrer to utsnitt av løsningen på Figur 27.



**Figur 32:** Utsnitt av dilatasjonsfuger.  
(Vegvesen, 2021b)



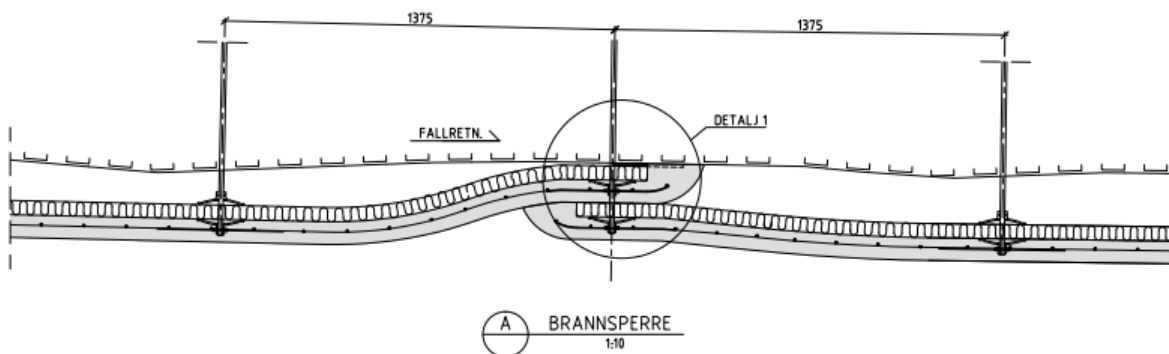
**Figur 33:** Utsnitt av hvelv av sprøytebetong, vegg.  
(Vegvesen, 2021b)



**Figur 34:** Utsnitt av hvelv av sprøytebetong, heng.  
(Vegvesen, 2021b)

### Brannseksjonering

Ved utførelse av brannsperrer for brannseksjonering av PE-hvelv etableres hvis mulig i tørre områder, og med overlappende PE-plater i fallretning, som vist på Figur 35. Nettarmeringen skal føres videre forbi avslutning av PE-plater. Dette skal forhindre risiko for nedfall av sprøytebetong som ellers vil være uarmert (Rønneberg, 2016).



**Figur 35:** Utsnitt av brannsperre.  
(Rønneberg, 2016)

### 3.4.3 34.4 Betonghvelv

Prosess 34.4 Betonghvelv kan deles inn i:

- 34.41 Hvelv av betongelementer
- 34.42 Hvelv av lettbetongelementer
- 34.43 Armering av betonghvelv

Arbeidsaktivitetene som inngår i 34.41 Hvelv av betongelementer vises i Figur 36 og forklares kort i Tabell 14.

Videre i dette kapittelet vil bare prosess 34.41 Hvelv av betongelementer beskrives i detalj. Dette gjøres da byggetidsmodellen er begrenset til prosess 34.41 Hvelv av betongelementer. Prosess 34.42 Hvelv av lettbetongelementer utføres på samme måte som 34.41 Hvelv av betongelementer. I hvelv av lettbetongelementer vil det imidlertid være behov for noe økt elementtykkelse på grunn av krav til større armeringsoverdekning og lettbetongs reduserte trykkfasthet i forhold til normalbetong (Rønneberg, 2016). Tegninger og utsnitt er også representative for 34.42 Hvelv av lettbetongelementer.



**Figur 36:** Tidsbestemmende aktiviteter for 34.41.  
(Arestegui, 2021a)

**Tabell 14:** Aktiviteter som inngår i 34.41 hvelv av betongelementer.

Post	Forklaring
Boring	Boring av hull som det skal settes bolter i.
Bolting	Montering av bolter for betongelementer, ventilator, skilt og annet utstyr.
Membran	Montering av vanntett membran.
Element vegg	Montering av prefabrikkerte betongelementer langs tunnelens vegg.
Element heng	Montering av prefabrikkerte betongelementer langs tunnelens heng.



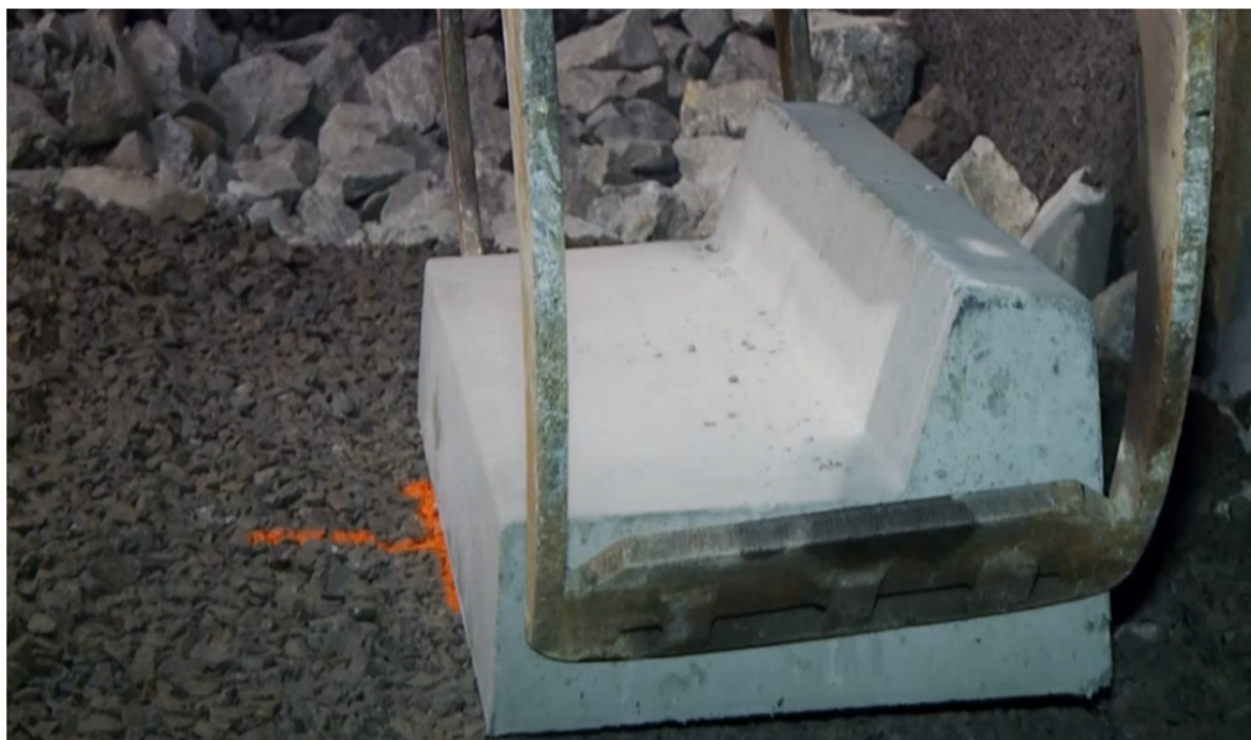
### **Boring og bolting**

Boring for hvelv av betongelementer gjennomføres med samme metodikk som for hvelv av sprøytebetong, se kapittel 3.4.2. Det bores for montering av bolter for veggelementer og sikringsbolter for takelementer. Den ferdige løsningen er selvbærende, men sikringsbolter blir montert for å sikre mot ulykkestilstand. Alle takbolter gyses (Rønneberg, 2016).

Utenom bolting og boring for membran og betongelementene, inngår også festebolter for ventilatorer, bjelker, skilt og teknisk utstyr (Skanska Norge, 2014). Ved etablering av veggbolter før montasje av elementer, skal boltene gyses. Det tillates å bruke polyesterlim hvis det boltes parallelt med elementmontasjen. Løsningen for endeforankring av boltene er lik som for hvelv av sprøytebetonghvelv.

### **Montering av membran**

Prefabrikkerte fundamentene blir først plassert på et komprimert underlag. Fundamentene plasseres i monteringslinjen av veggelementene, som vist på Figur 37 (Skanska Norge, 2014). Som underlag for fundamentene benyttes egnede, velgraderte, ikke telefarlige masser (Rønneberg, 2016).



**Figur 37:** Utsetting av fundamentene.  
(Skanska Norge, 2014)

Etter utplassering av fundamentene blir membranen hengt opp i monteringsboltene, og helsveises i skjøtene. Membranen monteres normalt i løpende lengde i tverretning av profilet og skjøtes med dobbel sveis. I nedkant skal membranen bøyes ut og avsluttes ut over veggbolten. Membranen har som funksjon å lede vann ned i stikkrenner på siden av veibanen. Med riktig tetting av fuger og bolter er denne membranløsningen vanntett. Dette gjøres med en rondell og fugemasse (Rønneberg, 2016).

Figur 39 viser montering av membran. Figur 38 viser ferdig montert membran med delvis ferdig monterte elementer.



**Figur 38:** Montering av membran.  
(Skanska Norge, 2014)



**Figur 39:** Utført membranmontering.  
(Skanska Norge, 2014)

### **Montering av betongelementer**

Hvelvet består av prefabrikkerte betongelementer, vanligvis i normal- eller lettbetong (NTH, 1995). Frostmotstanden er større i lettbetong enn i normalbetong på grunn av høyere luftinnhold i lettbetongen. Et hvelv av normalbetong kan tåle store nedfall og spare en del stabilitetssikring, mens lettbetong er svakere styrkemessig (NTH, 1995).

Når membranen er på plass og sveiset, kan vegg- og takelementer monteres. Takelementene monteres med opplegg på veggelementene og forankres med festebolter direkte i bakenforliggende berg (Rønneberg, 2016). Elementene monteres med en maskin som har en arm med vakuumsflate, som vist på Figur 40. Maskinen plasserer veggelementene ovenpå fundamentene, som deretter festes med to monteringsbolter. Veggelementene monteres løpende og uavhengig av hverandre på hver side av tverrsnittet. Tilstøtende elementer settes på felles fundament med bredde 1 m. Hengelementene monteres uavhengig av veggelementene og i forhold til motstående hengelementer (Skanska Norge, 2014).



**Figur 40:** Elementmontasje med vakuumsflate.  
(Skanska Norge, 2014)

Figur 41 viser et eksempel på et T9,5 tunneltverrsnitt, som er sikret med hvelv av betongelementer. Figur 42 viser detaljer til betongkonstruksjonen.

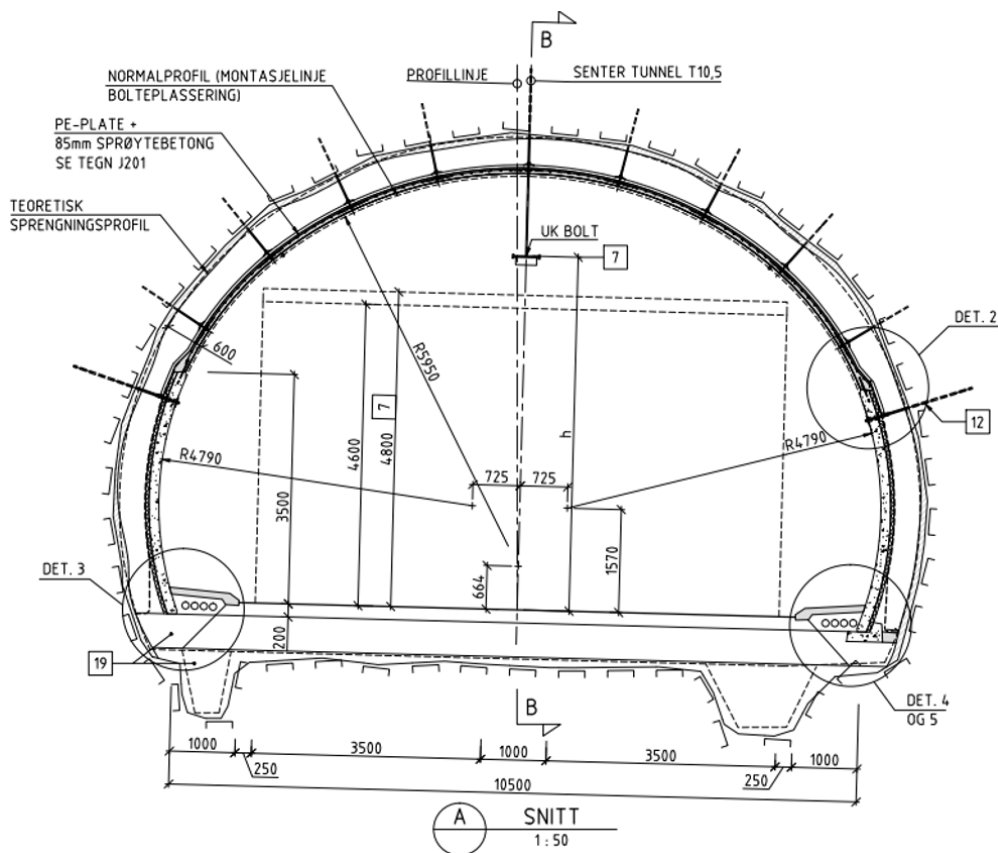


## Montering av andre installasjoner

Innfesting av ventilatorer med festebolter, monteres i prinsipp som øvrige takbolter. Forsyningen av strøm til ventilatorene kommer fra tekniske bygg. Kabelføringen fra tekniske bygg og frem til hvert ventilatorpar, etableres med trekkerør. Trekkerørene forlegges og festes stedvis på veggelementboltene før montering av takmembranen. Dersom membranen er montert i hele tverrsnittet før montering av veggelementene må trekkerørene forlegges på veggboltene før membranen henges opp (Rønneberg, 2016).

### 3.4.4 Kombinasjon av sprøytebetong og betongelementer

Det er også mulig å bruke en kombinasjon av 34.3 Hvelv av sprøytebetong og 34.41 Hvelv av betongelementer. Dette gjøres ved å bruke veggelementer og PE-skum i hengen, som vist i Figur 43. PE-skum blir bare montert i hengen. Membran blir bare brukt bak veggelementene.



**Figur 43:** T10,5-tunnel av kombinasjonsløsning.  
(Rønneberg, 2016)

Montering av sprøytebetonghvelvet foregår på samme måte som beskrevet i kapittel 3.4.2. I nedre kant av PE-hvelvet utføres det med en overlapp på 500 mm med veggelementene. På oppstikkende

dybler fra veggelementene, monteres 1 stk. langsgående armeringsjern 10 cm over overkant av element (Rønneberg, 2016).

Montering av armeringsstoler i PE-hvelvet utføres ved at PE-platene trekkes inn mot veggelementene, slik at det sikres en tett tilslutning av PE-hvelvet mot elementene (Rønneberg, 2016).

Ved påføring av sprøytebetong skal påføringen foregå i full tykkelse i første påslag ned mot vegg-elementflaten. Dette gjøres for å forhindre ansamling av prelltap på denne flaten ved etterfølgende påføring av sprøytebetong på øvrig del av hvelvet (Rønneberg, 2016).

Ved montering av membran på baksiden av elementene, anbefales det at membranen avsluttes ca. 100 mm over veggelement i bakkant. Deretter festes membranen inn mot PE-skummet ved montering av armeringsstoler med senteravstand ca. 600 mm langs og inntil kanten av membranen (Rønneberg, 2016).

## **3.5 HMS**

### **3.5.1 Generelt**

Bygg- og anleggsvirksomhet er en av de mest ulykkesutsatte næringene i det norske arbeidslivet, både med tanke på arbeidsskadedødsfall og arbeidsskader. For å sikre et trygt og godt arbeidsmiljø på bygge- eller anleggsplassen er det viktig med forebyggende tiltak og at alle aktører tar ansvar.

Ulike roller i et bygg- eller anleggsprosjekt har forskjellige ansvarsområder. Byggherren har ansvaret for å kontrollere virksomhetene som utfører arbeidet. Byggeherren skal ta ansvar for sikkerhet, helse og arbeidsmiljø slik byggeherreforskriften krever. Dette gjelder gjennom hele byggeprosessen (Arbeidstilsynet, 2021).

Avhengig av entrepriseform, representerer den prosjekterende aktør enten byggherre eller entreprenør. Prosjekterende aktør har typisk arbeid som omfatter å tegne, beregne, planlegge eller beskrive deler av et bygg eller et anlegg som skal oppføres (RIF, 2019). Uavhengig av entrepriseform skal prosjekterende risikovurdere forhold knyttet til sikkerhet, helse og arbeidsmiljø, i sine oppdrag. Forholdene som kan ha betydning for fremtidige arbeider skal dokumenteres.

Entreprenøren har ansvar for å følge opp det planlagte HMS-arbeidet som byggherren og eventuelt prosjekterende har utarbeidet. Det er en forutsetning at generell og gjentakende risiko er håndtert gjennom internkontrollsystemet til entreprenøren. Internkontrollsystemet skal ha tilstrekkelige og nødvendige rutiner for utførelse av eget arbeid. Se Figur 44 for illustrasjon av HMS-arbeid knyttet til byggeprosessen (RIF, 2019).



**Figur 44:** Risikovurdering i løpet av en byggeprosess.  
(Rønneberg, 2016)

### 3.5.2 HMS for vann- og frostsikring

Generelt sett, har anleggsarbeid under jord blitt oppfattet som belastende i arbeidsmiljøssammenheng. Støv, støy, gass fra sprengning og dieseldrift, sot, oljetåke, radon og radondøtre, vibrasjoner, blokkfall, høy relativ fuktighet og trekk, ubekvemme arbeidstillinger, dårlig lys- og siktforhold, eksplosjonsfare og trafikkulykker er miljøpåkjenninger som karakteriserer tunnelarbeidere (Bruland, 1992).

Til vann- og frostsikring benyttes ulike materialer og elementer. Til inntransport, intern transport og montasje av elementer benyttes ulike maskiner og lifter (NFF, 2015). Avgasser fra maskinene har krav til god ventilasjon for å innfri administrerte normer for forurensning i arbeidsatmosfæren. Kravene er satt av arbeidstilsynet (Bruland, 1992).

Samtidige arbeidsoperasjoner er utfordrende med tanke på at andre arbeidslag blir utsatt for forurensningen fra nabooperasjoner. Dette må entreprenør ta hensyn til i planleggingen av vann- og frostsikringsarbeidet (NFF, 2015).

Montasje av bolter, PE-skum og armeringsnett er betydelig arbeid som i stor grad utføres med hendene over hodet. Her er det viktig at ergonomiske arbeidstillinger blir ivaretatt for montasjearbeidene (NFF, 2015). Montasje av PE-skum, bolter, armeringsmatter og betongelementer er også tilknyttet en viss ulykkesrisiko, og særlig i tilfelle av brann. Påføring av brannsikring i form av



sprøytebetong utgjør en betydelig støv- og fiberkilde (NFF, 2015).

Tiltak for godt arbeidsmiljø for vann- og frostsikring (NFF, 2015):

- Estimert byggetid som er tilpasset utfordringen for arbeidsmiljøet i innredningsfasen. Dette betyr at tunneldriving, grunnarbeid, vei, vann og avløp må koordineres med vann- og frostsikringsarbeidet.
- Forskjøvet arbeidstid, slik at de mest forurensende aktivitetene utføres til separate tider av døgnet.
- Tidligmontasje av ventilasjonsvifter.
- Lokal ventilasjon med mobile vifter.
- Etablering av midlertidige vegger for å styre ventilasjon, seksjonering.
- Overvåkning av gasser og støv og aksjonsplaner ved overskridelse av tiltaksverdier.
- Tiltak for bedre ergonomi

### **3.6 Byggetidsmodell for tunnel**

Dette kapittelet er hentet ut fra fordypningsemne og supplert med ytterligere teori. Den supplerende teorien er tilegnet gjennom utvidet litteratursøk, feltstudie på Nordøyvegen og dialog med ulike fageksperter.

#### **3.6.1 Samtidighet**

Tunneldrift og tunnelinnredning kan ha arbeider samtidig. Det vil si at en arbeidsoperasjon starter før en annen arbeidsoperasjon er fullført (Arestegui, 2021a).

Samtidige operasjoner utføres for å spare tid i prosjekter, dette krever god logistikkplanlegging med tanke på plassbruk og ressursbruk. I en tunnel opererer store maskiner som tar mye plass. Derfor må det tas sikkerhetsvurderinger i forbindelse med driving og innredning med samtidighet. En byggetidsmodell som er uavhengig av samtidighet vil da bli begrenset til estimering av byggetid for tunneler uten samtidighet (Arestegui, 2021a).

#### **3.6.2 Deterministisk modell**

Deterministiske modeller har ingen innebygd usikkerhetsfaktor, og ingen av parameterne følger en sannsynlighetsfordeling. Modellen beskrives ofte med gjennomsnitts- eller modalverdi til parame-

terne. Deterministiske modeller tar ikke hensyn til at det er tilfeldighet og variasjon i tidsavhengige prosesser (UIO, 2020).

### 3.6.3 Stokastisk modell

Stokastiske modeller behefter parametere med usikkerhet som kan beskrives med en sannsynlighetsfordeling. Det vil si at en stokastisk modell vil gi forskjellige resultater avhengig av verdien til den tilfeldige stokastiske variabelen (UIO, 2020).

For å berettige usikkerheten til parametere kan beregningen implementere tripplestimat. Dette er en metode som er brukt for å beregne store investeringsprosjekter. Et tripplestimat, består som navnet tilsier, av tre estimater. Alle sannsynlighetsfordelinger som det er vanlig å benytte i usikkerhetsanalyser kan entydig defineres ved hjelp av tre vilkårlige punkter på kurven. Det er vanlig å anslå en nedre verdi, den mest sannsynlige verdien (toppunktet på kurven) og en øvre verdi. Øverste og nederste verdien er alltid symmetriske kvantiler på fordelingen (Drevland, 2013). Vanligvis brukes P10/P90 eller P01/P99 (Drevland, 2013).

Den vanligste måten å fastsette de tre verdiene er gjennom subjektive ekspertvurderinger. Subjektive ekspertvurderinger innebærer at eksperter på området, anslår verdi for tripplestimat basert på den informasjon som er tilgjengelig og etter sitt beste skjønn (Drevland, 2013).

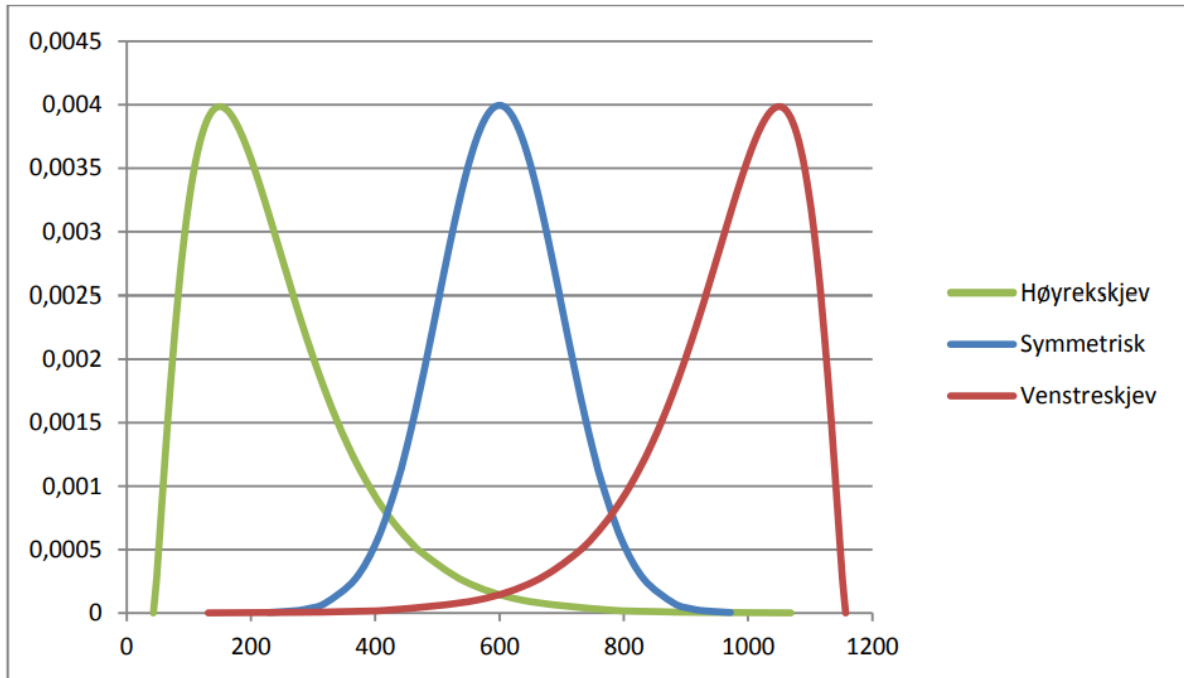
Avhengig av hvilken type tripplestimat man velger, enten P1/P99 eller P10/P90, kan man beregne forventningsverdi og varians. Tabell 15 viser formlene for P1/P99 og P10/P90.

**Tabell 15:** Forventningsverdier for P1/P99 og P10/P90.

Persentil	Forventningsverdi	Varians
P1/P99	$E = \frac{P_1 + 2,9xM + P_{99}}{4,9}$	$\sigma = \frac{P_{99} - P_1}{4,6}$
P10/P90	$E = \frac{P_{10} + 0.41xM + P_{90}}{2,41}$	$\sigma = \frac{P_{90} - P_{10}}{2,53}$

I praksis har det vist seg at P10 og P90 er bedre egnet enn P01 og P99, da det gemene hop ikke er i stand til å forestille seg hvor ekstremt bra eller dårlige et prosjekt kan gå. Dette avhenger av hvilket domene det opereres innenfor, og ønsket detaljeringsgrad av modellering/kalkyle (Drevland, 2013).

Fordelinger som er usymmetriske omtales som skjeve. Er fordelingen høyreskjev, ligger toppunktet mot venstre. Fordelingen har da en lengre hale mot høyre og vice versa, som vist på Figur 45.



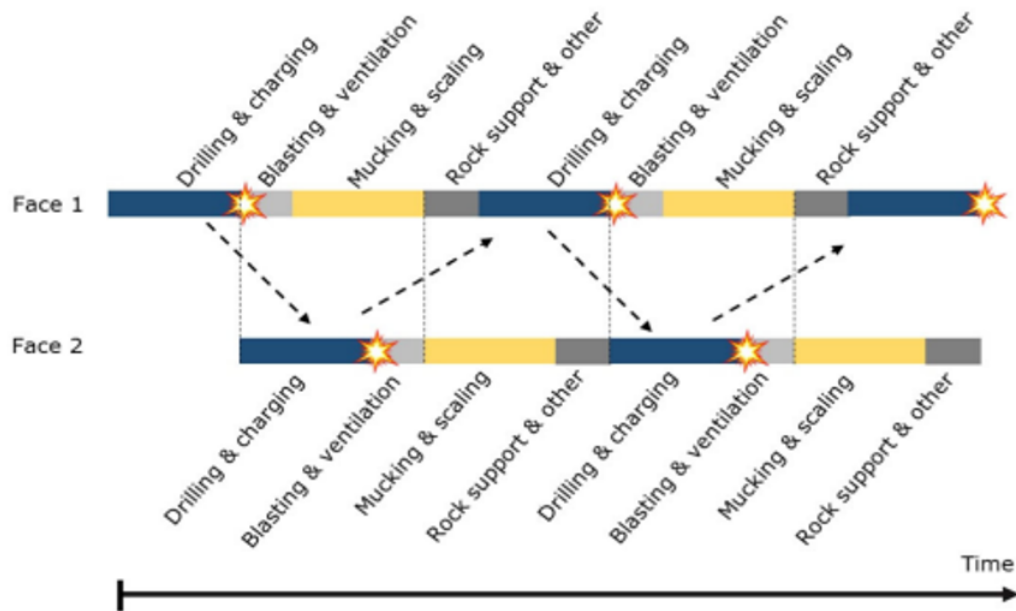
**Figur 45:** Skjevhet i sannsynlighetsfordelinger.  
(Drevland, 2013)

Varighet i prosjekter anses å være høyreskjev. I teorien kommer dette av at minste varighet for noe som skal utføres er 0 (Jørgensen, n.d). Denne høyreskjevheten gjenspeiles i varigheter knyttet til bygg- og anleggsprosjekter. Høyreskjevheten gjenspeiles ved at det er en grense på hvor raskt en arbeidsoperasjon kan gjøres (best-case), men ingen grense for hvor lang tid en oppgave kan ta (worst-case) (Andersen, 2016).

En annen mye brukt stokastisk metode er Monte-Carlo-simulering. Denne skiller seg fra tripplestimat ved at et tripplestimat regner gjennom kalkylen en gang, mens Monte Carlo metoden, regner gjennom estimeringen fra noen hundre til flere tusen ganger. For hver estimering trekkes en tilfeldig verdi ut fra hver av sannsynlighetsfordelingene og benyttes i beregningen. Etter at simulering er gjennomført vil den da ha et statistisk grunnlag for å utarbeide en sannsynlighetsfordeling for sluttsammen og andre data som er ønskelig å estimere (Drevland, 2013).

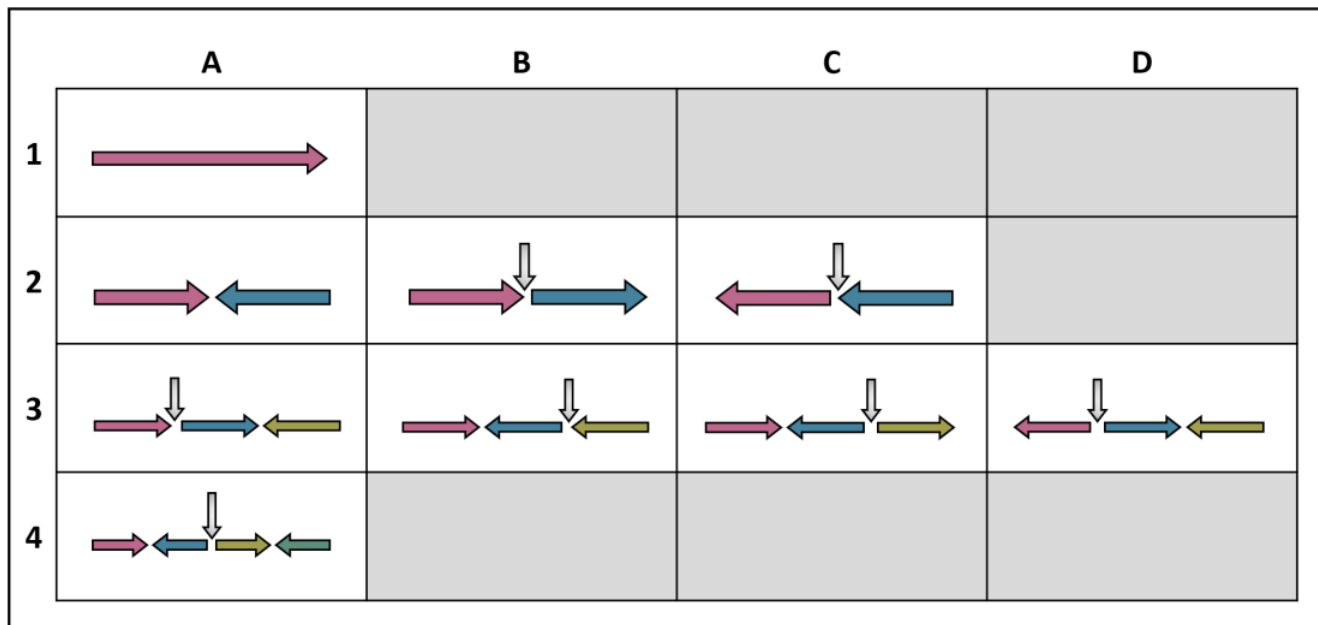
### 3.6.4 Angrepspunkter og tverrforbindelesr

Universalitet i en byggetidsmodell betyr at modellen kan ta høyde for variasjon i arbeidsmetoder og løsninger. I tunneldrift og tunnelinnredning gjelder det både den utførens arbeidsmetoder, og de ulike måtene drift og innredning kan konfigureres. Dette gjelder for eksempel valg av drivemetode; TBM eller konvensjonell drift med enstuffsdrift eller vekseldrift. Enstuffsdrift er at alle stuffer drives med fulle utstyrspakker og uavhengig av hverandre. Vekseldrift betyr full utstyrspakke vekslende mellom parallelle stuffer (Bruland, 2021). Figur 46 illustrerer vekseldrift.

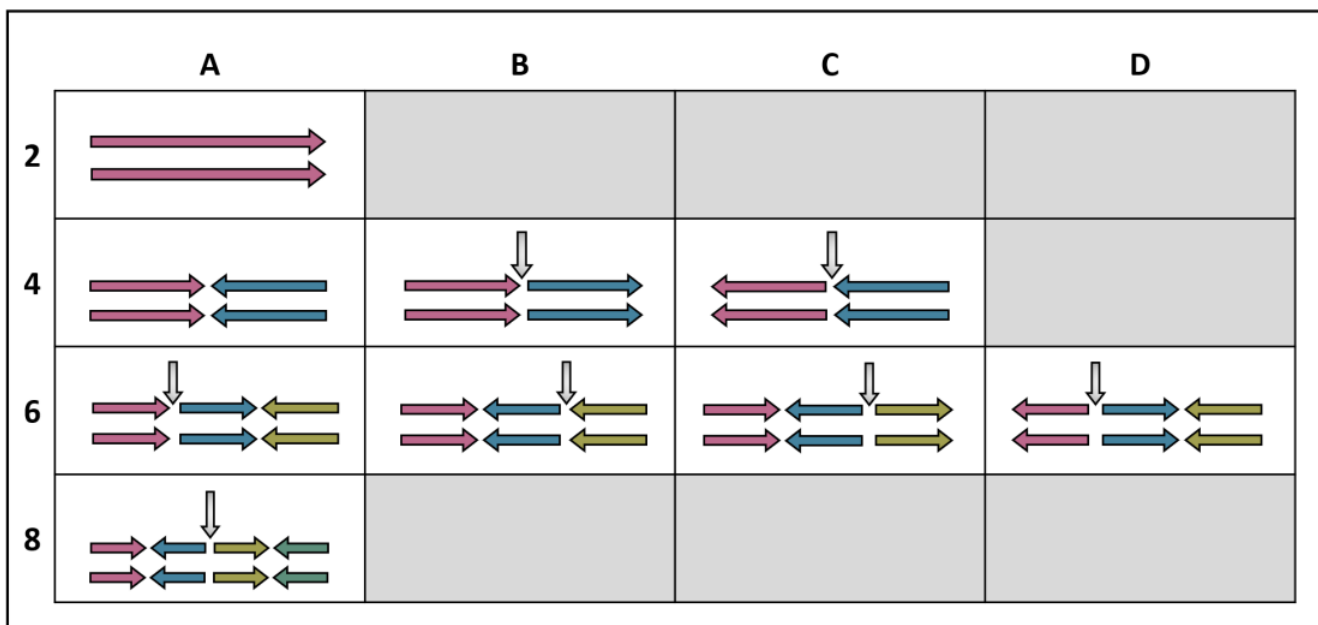


**Figur 46:** Vekseldrift i tunnel.  
(Bruland, 2021)

Antall angrepspunkter, tverrslag og plassering av tverrslag er også konfigurasjoner som utførene må ta et valg på med hensyn til kostnad, tid og kvalitet. Figur 47 og Figur 48 illustrer ulike drivekonfigurasjoner og muligheter for antall stuffer.



**Figur 47:** Tunnelkonfigurasjoner for tverrforbindelse.  
(Bruland, 2021)



**Figur 48:** Tunnelkonfigurasjoner for antall stuffer.  
(Bruland, 2021)

# 4 Resultater

## 4.1 Dataanalyse

Kapasitetene, faktorene og de andre verdiene som anbefales ved bruk av den utarbeidede byggetidsmodellen, er et resultat av analyse av produksjonsdata, innsyn i fremdriftsplaner og dialog med fagekspertene. Produksjonsdataene og fremdriftsplanene er konkurransesensitive og skal derfor ikke publiseres. Dette gjelder følgende vedlegg:

- Vedlegg B - NCC
- Vedlegg C - AF
- Vedlegg D - Norconsult
- Vedlegg G - Kapasitetsintervaller
- Vedlegg H - Kapasitetsberegning Ditio (til november)
- Vedlegg I - Kapasitetsberegning Ditio (fra november)
- Vedlegg J - Kapasitetsberegning Formworks
- Vedlegg K - Kapasitetsberegning Hæhre
- Vedlegg L - Kapasitetsberegning Ditio (SKA)
- Vedlegg M - Prosjektsammenligning

Dialog med ulike fagekspertene og innsyn i fremdriftsplaner har vært vesentlig for å kunne forklare hva som ligger bak tallene. Dialog med følgende personer har vært avgjørende for anbefaling av kapasiteter og faktorer:

- Miguel Arestegui, Skanska
- Thor Edvin Erikstad, Veidekke
- Jan Lima, Hæhre
- Jonas Eidesen, NCC
- Svein Gunnar Sageie, AF
- Vegar Strype, AF

Det er utført analyse av data på vann- og frostsikring fra 23 ulike tunneler. Tunnelene utgjør en samlet lengde på over 100 km.

I 13 av tunnelprosjektene er data samlet inn fra primærkilden. 11 av disse prosjektene er utført etter 2017. De to resterende prosjektene ble utført i 2015. Tunnelene utgjør en samlet lengde på over 72 km. Det er innhentet data fra følgende tunneler:

- Nøgvafjordtunnelen
- Fjørtoftunnelen
- Bubergtunnelen
- Haramsfjordtunnelen
- Skarvbergtunnelen
- Bagnskleivtunnelen
- Ekebergtunnelen (rehabilitering)
- Svartdalstunnelen (rehabilitering)
- Ryfylketunnelen
- Flotunnelen
- Mælefjelltunnelen
- Eysturoyartunnilin
- Sandoyartunnilin (pågående prosjekt)

Eysturoyartunnilin og Sandoyartunnilin er tunneler på Færøyene. Likevel anses data fra prosjektene som omhandler vann- og frostsikring som relevante for norske vegtunneler.

Data fra Nordøyvegen er delt inn i data frem til november, 2021 og data etter november, 2021 i henholdsvis Vedlegg H - Kapasitetsberegning Ditio (til november) og Vedlegg I - Kapasitetsberegning Ditio (fra November). Grunnen til inndelingen er at produksjonsdata ble tilsendt på to tidspunkter. I tillegg vises kapasitetsintervaller som er brukt for vasking av data i Vedlegg G - Kapasitetsintervaller. Omfattende filtrering av ugyldig data fra Nordøyvegen viste at rapporteringsfeil er en viktig feilkilde ved selvrapporing av produksjonstall.

En sammenligning av produksjon fra dagskift og nattskift ble utført for tunnelene på Nordøyvegen. Resultatet fra sammenligningen viser at det er lite og tilfeldige forskjeller på dag- og nattskift. Se vedlegg Vedlegg H - Ditio (til november).

I tillegg er ti eldre prosjekter undersøkt. Prosjektene om er omtalt i masteroppgaven 'Byggetid for vegtunneler' og vises i følgende vedlegg (Hedenstad, 2014):

- Vedlegg N - Svar på spørreskjema (H&S)
- Vedlegg O - Kartlegging av mengdebeskrivelser (H&S)
- Vedlegg P - Tidligfasemodell (brukerversjon) (H&S)

Data fra disse prosjektene er udaterte og har mange mangler. Derfor har de ikke vært avgjørende for anbefaling av kapasiteter og faktorer. Likevel har det vært nyttig å få innsikt i flere typer prosjekter. Tunnelene utgjør en samlet lengde på over 28 km. Data fra følgende tunneler er undersøkt:

- Vågstrandstunnelen
- Vangstunnelen
- Eikåstunnelen
- Skorastunnelen
- Tyssetunnelen
- Knappetunnelen
- Hamrastunnelen
- Hundorptunnelen
- Teigkamptunnelen
- Stordalstunnelen

## **4.2 Byggetidsmodellen**

Dette kapitlet er en komplett beskrivelse av et beregningsverktøy som gir byggetid for vann- og frostsikring i tunnel for ulike situasjoner. Beregningsverktøyet blir videre kalt VF-byggetid og ligger i Vedlegg F - VF-byggetid. Det finnes også en veileder til bruk av VF-byggetid i Vedlegg E - Veileder til VF-byggetid, hvor store deler av innholdet i dette kapitlet er gjengitt. Veilederen har mindre fokus på programmeringen av modellen enn dette kapitlet. Veilederen inneholder bakgrunn, målsetting, grunnlag og bruk av systemet.



### 4.2.1 Modellens oppbygging

Byggetidsmodellen er laget i Excel og benytter seg av mange ulike funksjoner som skal beskrives i dette kapitlet. Modellen består av syv faner:

- Prosjektinfo
- Hjelpark
- 34.3 Hvelv av sprøytebetong
- 34.41 Hvelv av betongelementer
- Kombinasjonsløsning
- Annen løsning automatisk tog
- Annen løsning dager
- Annen løsning selvvalgt tog

#### Generell funksjonalitet

Vann- og frostsikring løses som et tog. Med dette menes det at alle aktivitetene er vogner som ikke kan passere vognen foran seg eller bli tatt igjen av vognen bak seg. For eksempel kan ikke bolting bli ferdig før boring fordi boltene trenger utborete hull som de kan installeres i. Alle beregningsfanene inneholder en visualisering av dette toget. Byggetiden og antall arbeidere som kreves fremvises også i denne visualiseringen.

Et eksempel på dette er Figur 49 hvor en 17 ukers byggetid med 34.3 Hvelv av sprøytebetong vises. Når alle inndataceller er fylt ut, vil toget bli automatisk beregnet utfra kapasiteter, tunnelens dimensjoner og andre metodespesifikke parametere som beskrives for de ulike fanene i eget avsnitt.

Det er også en mulighet for å legge til ekstra uker for hver aktivitet. Det kan være aktuelt hvis det er andre aktiviteter som tar ekstra tid og inngår i arbeidslagets oppgaver utover det som er beskrevet av kapasiteten. Utgangspunktet for logistikken er:

- En aktivitet starter tidligst en uke etter foregående aktivitet startet.
- En aktivitet slutter tidligst en uke etter foregående aktivitet avsluttet.

Uke fra oppstart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Boring	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bolting	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0
PE-skum	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
Armering	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
Stoling	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
Sprøytebetong	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
Sum bemanning	1	3	5	5	7	9	9	9	8	8	8	6	5	3	3	3	1	0

**Figur 49:** Visualisering av tog.

Nesten alle celler i toget er programmert med samme prinsipp. Dette prinsippet er at cellen skal vise 0, med mindre tre betingelser er oppfylt. Dersom betingelsene er oppfylt, skal cellen vise antall arbeidere som skal jobbe med aktiviteten. Cellen vil også markeres med gul bakgrunn. Betingelsene vises i Tabell 16. Fullstendig kode vises i Figur 50 med et eksempel fra 'Fane 34.3 Hvelv av sprøytebetong'.

**Tabell 16:** Betingelser for togoppsett.

Betingelse	Eksempel på del av kode	Pseudokode
Antall uker for aktiviteten skal tilsvare antall gule celler.	SUMMER(\$C27:E27) /\$D15<\$D20	Summen av cellene til venstre dividert med antall arbeidere per skift for den aktuelle aktiviteten, skal være mindre enn antall uker aktiviteten skal ta.
En aktivitet slutter tidligere en uke etter forrige aktivitet sluttet.	SUMMER(G26:\$GT26) /\$C15<\$D20-1	Summen av cellene over til høyre dividert med antall arbeidere per skift for den forrige aktiviteten, skal være mindre enn antall uker for den aktuelle aktiviteten minus én.
En aktivitet starter tidligere en uke etter forrige aktivitet startet.	SUMMER(\$C26:E26)>0	Summen av cellene over til venstre må være større enn null.

Det er to unntak fra dette prinsippet:

- Den øverste linjen, altså den første aktiviteten har en noe forenklet kode, da den ikke trenger å ta hensyn til at den kan ta igjen noen aktivitet foran seg.
- Alle celler i uke 1 i toget utenom den øverste linjen er satt til 0 da modellens oppbygning uansett ikke tillater disse cellene å ha noen annen verdi.

Beregningsmodellen vil gi et normalisert resultat dersom anbefalte kapasiteter brukes. Modellen gir også mulighet til å bruke tripplestimat og fylle inn egne kapasiteter. 'Kapasitet (P10)' representerer verst tenkelig og oppnåelig kapasitet, 'Kapasitet (M)' representerer mest sannsynlige og oppnåelig kapasitet og 'Kapasitet (90)' representerer den beste tenkelige og oppnåelige kapasitet, som vist på

SUMMER  $\downarrow$   $\times$   $\checkmark$  fx | =HVIS(OG(SUMMER(\$C27:E27)/\$D15<\$D20; SUMMER(G26:\$GT26)/\$C15<\$D20-1;SUMMER(\$C26:E26)>0); \$D15;0)

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
15	Arbeidere per skift	1	2	2	2	2	1	Borhull per m <sup>2</sup>		0,57	0,57	
16								Antall PE-layers		1	1	
17	Antall timer	837	976	1028	934	1142	514					
18	Antall timer (justert)	837	976	1028	934	1142	514					
19	Ekstra uker	0	0	0	0	0	0					
20	Antall uker	9	10	11	10	12	6					
21	Meter per uke	256	230	209	230	192	383					
22												
23												
24	Uke fra oppstart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
25												
26	Boring	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
27	Bolting	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
28	PE-skum	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
29	Armering	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2
30	Stoling	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2
31	Sprøytebetong	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	<b>Sum bemanning</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
33												

**Figur 50:** Visualisering av betingelser.

Figur 51. Tripplestimatet vil beregne en forventningsverdi for varigheten av hver aktivitet. Dersom brukeren ønsker å lage et tripplestimat, vil det være mulig å gjøre dette direkte i regnearket for standard beregningsark, altså fanene:

- 34.3 Hvelv av sprøytebetong
- 34.41 Hvelv av betongelementer
- Kombinasjonsløsning

Hvis dette er tilfelle må resultatet som kommer i 'Kapasitet (E)' fylles inn for 'kapasitet (aktiv)' som vist for bolting i eksempelet i figur 51. Eksempelet viser også effekten av å beregne byggetid for undersjøisk tunnel i 'Antall timer (justert)'.

Enhet	Boring	Bolting	PE-skum	Armering	Stoling	Sprøytebetong
	stk/h	stk/h	m <sup>2</sup> /h	m <sup>2</sup> /h	m <sup>2</sup> /h	m <sup>2</sup> /h
Kapasitet (P10)		12				
Kapasitet (M)		30				
Kapasitet (P90)		40				
Kapasitet (E)	0	27	0	0	0	0
Kapasitet (anbefalt)	35	30	50	55	45	100
Kapasitet (aktiv)	35	27	50	55	45	100
Arbeidere per skift	1	2	2	2	2	1
Antall timer	788	1022	968	880	1075	484
Antall timer (justert)	830	1075	1019	926	1132	509
Ekstra uker	0	0	0	0	0	0
Antall uker	9	11	11	10	12	6
Meter per uke	256	209	209	230	192	383

**Figur 51:** Tripplestimat i VF-byggetid.

#### 4.2.2 Prosjektinfo

Fanen «Prosjektinfo» består av seks spørsmål som brukeren må svare på før byggetiden beregnes. Dette legger grunnlaget for hvilken metode som skal brukes og med hvilken faktor som skal påvirke byggetiden ut ifra type prosjekt. Spørsmålene er forklart nærmere i Tabell 17. Utgangspunktet for modellen er et standardisert prosjekt. For å kunne korrigere byggetiden for ulike tilfeller er det innført fem ulike faktorer. Som standard er alle faktorer satt til 1. Dersom en faktor blir lavere enn 1, blir byggetiden høyere. Hvis faktoren er høyere enn 1, blir byggetid lavere. Faktorene påvirker ikke byggetiden dersom fanene med merket 'Annen løsning', blir benyttet. I tillegg til spørsmålene som er knyttet til faktorer, er det ytterligere fem poster som beskrives i Tabell 18.

**Tabell 17:** Faktorer i prosjektinfo.

Spørsmål	Anbefalte verdier	Forklaring
Samtidighet for VF og annet arbeid?	Ja: 0,65-0,80 Nei: 1,00	Svar ja på dette spørsmålet dersom det er andre arbeidspakker som foregår i tunnelen samtidig som vann- og frostsikring. Med andre arbeidspakker menes andre tunnelarbeider enn vann- og frostsikring. Dersom det bare er én eller noen få delaktiviteter som berøres av samtidighet med annet arbeid, kan faktoren settes til 1,00 og kapasitetene for de aktuelle aktivitetene justeres.
Faktor for maskinpark	1,00	Det er tenkelig at kapasitetene som anbefales blir utdaterte som følge av bedre maskiner. Dersom et gammelt prosjekt skal kontrolleres kan det være at maskinparken var dårligere enn den er nå. Faktoren kan justeres dersom brukeren kan si noe generelt om hvor mye bedre eller dårligere maskinparken er, sammenlignet med forutsetningene som legges til grunn. Dersom det bare er én aktivitet som påvirkes av nye maskiner, burde heller den tilhørende kapasiteten endres. For eksempel hvis en ny maskin gjør at bolting går fortere, kan kapasiteten for bolting endres heller enn at faktor for maskinpark endres.
Hvilken metode skal brukes?	34.3: 1,00 34.41: 1,00 Kombinasjon: 0,9	I utgangspunktet er kapasitetene for de samme aktivitetene tilsvarende på tvers av metodene. Denne faktoren gjør at kombinasjonsløsning utføres 90% produktivt sammenlignet med 34.3 Hvelv av sprøytebetong og 34.41 Hvelv av betongelementer. Ofte flytt av maskiner, er en av grunnene som påvirker kapasitetene.
Hvilken sikringsklasse? (boring)	I, II og III: 1,00 IV: 0,9 V: 0,75 VI: 0,5	Denne faktoren påvirker bare byggetid for boring. Høyere tall gir tyngre sikring. Faktoren kan forklares med at det blir mer komplisert å bore når det skal bores gjennom tung sikring.
Hva er tverrprofilen til tunnelen?	T9,5-T11,5: 1,00 Alle andre tverrsnitt: 0,95	Små tverrsnitt gjør at byggetid økes fordi det er trangere. Store tverrsnitt gjør at byggetiden økes fordi det oftere blir flytt av maskiner som følge av at det ikke er tilgang til hele buen.

**Tabell 18:** Øvrige poster i prosjektinfo.

<b>Post</b>	<b>Forklaring</b>
Hva er lengden som skal vann- og frostsikres?	Dersom hele tunnelen skal vann- og frostsikres med samme metode, kan hele lengden fylles inn her. Ved ulik metode eller ulike forutsetninger for deler av tunnelen, må disse delene beregnes separat.
Hvor mange timer jobbes per uke?	Totalt antall timer i løpet av en uke hvor vann- og frostsikringsarbeid pågår.
Ekstra areal fra utvidelser	Ekstra areal av alle flater som skal vann- og frostsikres, som ikke inngår i arealet som er produktet av tunnallengde og buelengde.
Buelengde	Lengden fra såle til såle, via veggene og hengen. Bestemmes utfra tverrsnittet og Håndbok N500.
Totalt areal av vegg og heng	Summen av postene 'Ekstra areal fra utvidelser?' og buelengden multiplisert med 'Hva er lengden som skal vann- og frostsikres?'

### **4.2.3 Forkastede faktorer**

Det er en rekke faktorer som ble vurdert som relevante for modellen, men som av ulike grunner ble forkastet. Avgjørelsen om å forkaste disse ulike faktorene er tatt etter konsultasjon med medveileder og andre fagekspertter.

#### **Samtidighet for VF-aktivieter**

Denne faktoren var tiltenkt å beskrive hvordan byggetid blir påvirket av at ulike vann- og frostsikringsaktiviteter blir utført med kort avstand mellom hverandre. Faktoren ble kastet fordi det var ønskelig at modellens oppsett ikke skulle tillate at slike aktiviteter ble utført med for kort avstand. Dersom brukeren ønsker å ha kortere avstand mellom aktivitetene, kan fanen 'Annen løsning med selvvalgt tog' benyttes.

#### **Faktor for tunnelklasse**

Faktoren for tunnelklasse skulle beskrive hvordan byggetid varierer med tunnelklasse. Samtaler med fagekspertter og analyse av prosjekter med ulik tunnelklasse viser at tunnelklasse i seg selv ikke påvirker byggetiden. Det er en del andre faktorer som påvirker tunnelklassen, som også påvirker byggetiden. Det er disse faktorene som gjør at byggetid varierer med tunnelklasse og det er tatt hensyn til i modellen. Eksempler på slike faktorer er sikringsmetode og tverrsnitt. Det ville altså gitt dobbel effekt hvis det skulle vært en egen faktor for tunnelklasse.

### **Faktor for angrepspunkter**

Med angrepspunkter menes innganger til arbeidsområde. Antall angrepspunkter har betydning for logistikken og byggetid, men ikke utover det som kan beskrives av en samtidighetsfaktor.

### **Faktor for geologi**

I utgangspunktet skulle det være et spørsmål om bergforhold hvor bruker skulle oppgi enten Q-verdi eller bergmasseklasse. Isteden ble det innført en faktor for sikringsklasse. Dette valget begrunnes med at det ikke er bergmasseklassen som har direkte innvirkning på vann- og frostsikringen. Det er sikringsklasse som påvirker hvor effektivt man borer for vann- og frostsikring. Er sikringsklassen IV, V eller VI, sikres det med tung sikring. Denne konstruksjonen gjør det vanskeligere å bore, fordi det må bores gjennom allerede tungt sikret berg. Da kan både sikringsbolter og armering bli truffet. Det er likevel usikkert om faktor for geologi burde vært med fordi det kan påvirke bolteprosessen. Dersom det er mye løst fjell i borehullene, vil det bli mer komplisert å bolte.

### **Frostmengdefaktor**

Denne faktoren skulle si noe om hvordan frostmengden påvirker byggetiden. Frostmengde påvirker byggetiden ved at ulike metoder kreves for ulike frostmengder, som vist i Tabell 23. Dette tas hensyn til da brukeren uansett må velge metode. I tillegg kan frostmengde påvirke hvor mange lag med PE-skum som skal monteres. Siden dette bare gjelder montering av PE-skum, ble det heller laget en post på fanen '34.3 Hvelv av sprøytebetong' som heter 'Antall PE-layers'. Ved behov for isolasjon med tykkelse > 70 mm, må platene monteres i to 'layers' (Rønneberg, 2016). 'Layers' blir brukt istedenfor 'lag' for å unngå å blande antall arbeidslag og antall lag med PE-skum.

### **Faktor for ulike bolter**

Tid for montering av bolter vil avhenge av hva slags bolter som skal monteres. Tanken var at brukeren skulle svare på et spørsmål om hvilken type bolter som skulle brukes. Svaret skulle resultere i en faktor som bare skulle påvirke boltekapasiteten. Sammenligning av boltekapasiteter fra ulike prosjekter viste at det var stor forskjell på bolting for 34.3 Hvelv av sprøytebetong og 34.41 Hvelv av betongelementer. Sammenligningen viste derimot ingen signifikant forskjell mellom bolting med ulike typer bolter for samme prosess. Et eksempel på dette er boltekapasiteter fra Nordøyvegen og Skarvberget, som vises i Vedlegg H - Kapasitetsberegning Ditio (til november), Vedlegg I - Kapasitetsberegning Ditio (fra november) og Vedlegg L - Kapasitetsberegning Ditio (SKA). Boltingen er utført av samme entreprenør og med samme metode. Kapasitetene er tilnærmet like til tross for at det ene prosjektet er utført med M16-bolter og det andre prosjektet er utført med M20-bolter. Derfor er anbefalingen for boltekapasitet forskjellig for de ulike prosessene og faktor for ulike bolter forkastet. Dette burde videre undersøkes.

## Faktor for undersjøisk tunnel

I samtaler med fagekspertene har det vært blandede meninger om hvor vidt kapasiteter påvirkes av om det arbeides i undersjøisk tunnel. Sammenligning mellom undersjøiske tunneler og andre tunneler viser ingen signifikant forskjell. Et eksempel på det er sammenligning av kapasiteter fra Nordøyvegen og Skarvberget, som vises i Vedlegg L - Kapasitetsberegning Ditio (SKA). Vann- og frostsikring er utført av samme entreprenør med tilnærmet lik metode.

### 4.2.4 Hjelpearke

Fanen 'Hjelpearke' brukes for mellomberegning. Denne fanen skal ikke benyttes av brukeren, men kan være av interesse for vedkommende som skal videreutvikle modellen. Det kan vurderes å skjule denne fanen i en fremtidig brukerversjon. Hjelpearket henvises til i mange av cellene i de andre fanene. Et eksempel på dette er totalfaktoren. Totalfaktoren er et produkt av de fem faktorene som bestemmes i fane 'Prosjektinfo' og benyttes når totalt antall timer for en aktivitet skal beregnes. Totalfaktoren er i celle J3 i hjelpearket, så når denne cellen skal henvises til, benyttes formelen 'Hjelpearke!J3'. Et eksempel på dette vises i Figur 52, hvor totalfaktoren er lik 0,75. Totalfaktoren gjør at antall timer for bolting justeres fra 976 timer til 1302 timer.

	B	C	D	E
5		Boring	Bolting	PE-skum
17	Antall timer	837	976	1142
18	Antall timer (justert)	1116	1302	1523

Figur 52: Totalfaktorens påvirkning.

En av fanens funksjoner er å legge til grunn rullgardinsystemet. Rullgardinsystemet brukes blant annet i fanen 'Prosjektinfo' ved hjelp av datavalidering av celler. For eksempel er de forskjellige tunneltverrprofilene listet opp i fane 'Hjelpearke' i celle E3-E12. Når tverrprofil skal velges i fanen 'Prosjektinfo', vil brukeren få valget mellom muligheten til å velge inndataen i celle E3-E12, som vist i Figur 53.



E		Faktorer	
1		Samtidighet for VF og annet arbeid?	Ja 1,00
2	<b>Tverrprofil</b>	Faktor for maskinpark?	1,00
3	T5,5	Hvilken metode skal brukes?	34.31 1,00
4	T7,5	Hvilken sikringsklasse? (boring)	I 1,00
5	T8,5	Hva er tverrprofilen til tunnelen?	T9,5 1,00
6	T9,5	Hva er lengden som skal vann- og frostsikres?	T5,5
7	T10,5	Hvor mange timer jobbes per uke?	T7,5
8	T11,5	Ekstra areal fra nisjer?	T8,5
9	T12,5	Buelengde	T9,5
10	T13	Totalt areal av vegg og heng (m <sup>2</sup> )	T10,5
11	T13,5		T11,5
12	T14		T12,5

Figur 53: Valg av tverrprofil.

En annen funksjon som brukes i hjelpearket er finn.rad-funksjonen. Den brukes for eksempel blant annet for å bestemme riktig buelengde. Formelen som brukes er:

=FINN.RAD(C8;Hjelpeark!E3:F12; 2; 0)

Formelen gjør at buelengden bestemmes automatisk ut ifra hvilket tverrprofil som velges. C8 er cellen hvor tverrprofil bestemmes og Hjelpeark!E3:F12 er tabellen med oversikt over tverrprofiler og buelengder som vist på Figur 54.

	E	F
2	<b>Tverrprofil</b>	<b>Buelengde (Bs)</b>
3	T5,5	17,12
4	T7,5	18,88
5	T8,5	20,56
6	T9,5	21,04
7	T10,5	22,13
8	T11,5	23,75
9	T12,5	24,32
10	T13	24,86
11	T13,5	25,46
12	T14	25,96

Figur 54: Tverrprofil og buelengde.

## 4.3 Standard beregningsark

De tre fanene som kalles for standard beregningsark, er som følger:

- 34.3 Hvelv av sprøytebetong
- 34.41 Hvelv av betongelementer
- Kombinasjonsløsning

Fanene er satt opp på en måte som gjør at brukeren ikke trenger å ha egne erfaringstall eller spesiell kunnskap om vann- og frostsikring. For hver fane er det anbefalte kapasiteter og andre verdier. Verdiene tar utgangspunkt i et visst antall arbeidere per skift for hver operasjon.

Kapasiteter er bare beregnet for det som er antatt som tidsbestemmende arbeid. Med tidsbestemmende arbeid, menes de arbeidene som kan påvirke byggetiden. Det er noen typer arbeid som er innbakt i kapasiteten. Dette er beskrevet i kapittel 3. Kapasitetene vil variere ut ifra hvor mange arbeidere som er på hvert skift og hvilke maskiner som er tilgjengelige.

### 34.3 Hvelv av sprøytebetong

Denne fanen er basert på prosess 34.3 Hvelv av sprøytebetong og består av de seks tidsbestemmende aktivitetene som vises i Tabell 19. Brukeren må også fylle inn antall borehull per kvadratmeter. Brukeren kan velge å bruke en annen verdi enn den anbefalte, enten ved å bruke tripplestimat eller ved å bruke et annet erfaringstall.

Fanen gir mulighet for beregning av byggetid for både 34.31 Isolert vanntett hvelv av sprøytebetong og 34.32 Uisolert hvelv av sprøytebetong. Brukeren får mulighet til å velge mellom PE-skum og membran. Den eneste forskjellen i anbefalinger er to flere arbeidere per skift for membran, for å oppnå samme kapasitet som for PE-skum. For prosess 34.31 inngår trekkerør i armering og i prosess 34.32 inngår trekkerør i membran.

**Tabell 19:** Poster i Fane 34.3 Hvelv av sprøytebetong.

<b>Post</b>	<b>Forklaring</b>	<b>Anbefalt kapasitet/verdi</b>	<b>Bemanning</b>
Boring	Boring av hull som det skal settes bolter i. M16 bolt antas.	35 <i>stk/h</i>	1
Bolting	Montering av bolter for PE-skum, ventilator, skilt og annet teknisk utstyr. Inkluderer prøvetrekking.	30 <i>stk/h</i>	2
PE-skum (34.31)/ Membran (34.32)	Montering av plater av PE-skum/Montering og sveising av membran.	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	2/4
Armering	Montering av armeringsnett.	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	2
Stoling	Montering av stoler som skaper avstand mellom armering og PE-skum/membran. Inkluderer komplettering.	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	3
Sprøytebetong	Sprøytebetong påføres vann- og frostsikringen for brannsikring.	70 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	2
Borehull per <i>m<sup>2</sup></i>	Antall borehull delt på kvadratmeter med vann- og frostsikring.	0,57	
PE-layers	Antall lag me PE-skum. Avhenger av frostmengde.	1 <i>stk</i>	

Videre følger en liste med eksempel på maskinpark som kreves for å utføre 34.3 med anbefalte kapasiteter:

- AMV borerigg (Boring)
- Servicebil (Boring)
- Gyserigg (Bolting)
- Bakstoffbil (Bolting, stoling)
- MX-maskin (PE-skum, membran)
- Spider (Armering)
- Lift (Armering)
- Sprøyterigg (Sprøytebetong)

### Fane 34.41 Hvelv av betongelementer

Denne fanen er basert på prosess 34.41 Hvelv av betong og består av de fem tidsbestemmende aktivitetene som vises i Tabell 20. Brukeren må også fylle ut tre prosessspesifikke parametere. Brukeren kan velge å bruke en annen verdi enn den anbefalte, enten ved å bruke tripplestimat eller ved å bruke et annet erfaringstall. Brukeren må også fylle inn antall borhull per kvadratmeter, som er anbefalt å være 0,57.

**Tabell 20:** Poster i Fane 34.41 Hvelv av betonglementer.

<b>Post</b>	<b>Forklaring</b>	<b>Anbefalt kapasitet/verdi</b>	<b>Bemanning</b>
Boring	Boring av hull som det skal installeres bolter i.	10 <i>stk/h</i>	1
Bolting	Montering av bolter for betongelementer, ventilator, skilt og annet teknisk utstyr. Anbefalt kapasitet forutsetter at monteringen gjøres av to lag med doble ressurser.	8 <i>stk/h</i>	4
Membran	Montering av vanntett membran. Membran monteres langsgående bak veggelementer og tversgående bak takelementer. Membranen sveises i skjøtene.	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	4
Element vegg	Montering av prefabrikkerte betongelementer langs tunnelens vegg.	2 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	2
Element heng	Montering av prefabrikkerte betongelementer langs tunnelens heng.	1,8 <i>stk/h</i>	2
Antall elementer vegg	Antall prefabrikkerte veggelementer for hele tunnelen.	Tunnellengde/2,54	
Antall elementer heng	Antall prefabrikkerte hengelementer for hele tunnelen.	Tunnellengde/1,29	
Borehull per <i>m<sup>2</sup></i>	Antall borhull delt på kvadratmeter med vann- og frostsikring.	0,18	

Videre følger en liste med eksempel på maskinpark som kreves for å utføre 34.41 med anbefalte kapasiteter:

- AMV borerigg (Boring)
- Gravemaskin 14 ton CAT T13 (Membran)
- Bakstoffbil (Bolting)
- Gyserigg (Bolting)
- Lift med aggregat (Avstiving bolter, montering av element)
- MX-maskin (Membran)
- Elementmaskin (Element vegg og heng)

### **Fane kombinasjon**

Denne fanen er basert på en kombinasjon av prosess 34.3 Hvelv av sprøytebetong i hengen og 34.41 Hvelv av betong i veggene. Alle poster i Tabell 19 og Tabell 20 fylles ut, utenom 'Antall elementer heng'. Selv om de anbefalte kapasitetene er like, divideres antall timer på en faktor lik 0,90 når antall timer per aktivitet beregnes. Dette forklares i Tabell 17. Brukeren må også bestemme hvor vederlaget skal defineres, altså fylle ut hvor stor andel som regnes som vegg og skal behandles med prosess 34.41. Maskinene som kreves for 34.3 og 34.41, kreves også for kombinasjonsløsningen.

## **4.4 Andre beregningsark**

Dette kapitlet beskriver tre andre løsninger som kan brukes til å modellere byggetid. Dette er faner i Excel-arket som skal ta høyde for andre metoder enn de standard beregningsarkene. Det kan være små endringer eller totalt andre metoder.

### **Fane Annen løsning automatisk tog**

Denne fanen kan brukes dersom brukeren ønsker samme prinsipper for den automatiske utfyllingen av toget som blir brukt i standard beregningsark. Dette må fylles ut:

- Navn på aktivitetene.
- Antall arbeidere per skift per aktivitet.
- Antall uker en aktivitet varer.

### **Fane Annen løsning automatisk tog**

Denne fanen kan brukes dersom brukeren vil bestemme selv hvilke uker de ulike aktivitetene skal starte og slutte. Dette må fylles ut:

- Navn på aktivitetene.
- Antall arbeidere per skift per aktivitet.
- Antall uker en aktivitet varer.
- Ukesstart for aktivitet.

### **Annen løsning dager**

Alle de andre fanene tar utgangspunkt i uker når byggetid beregnes. Dersom det er ønskelig å bruke dager i stedet for uker, kan denne fanen brukes. Fanen tar utgangspunkt i disse forutsetningene:

- En aktivitet starter tidligst fire dager etter foregående aktivitet sluttet.
- En aktivitet slutter tidligst en dag etter foregående aktivitet sluttet.

Ellers er oppbygningen lik som for Fane 'Annen løsning automatisk tog'.

## **4.5 Optimalitetsparadokset**

Ved testing av VF-byggetid ble det oppdaget at den totale byggetiden ble lenger når enkelte kapasiteter ble høyere. Dette er kontraintuitivt da høyere kapasiteter i utgangspunktet generer kortere byggetid. Grunnen til at byggetiden likevel kan økes når kapasitetene øker, skyldes det forfatterne har valgt å kalle optimalitetsparadokset. Et eksempel på et slikt paradoks kan vises ved å se isolert på montering av PE-skum, armering og stoling i 34.3 Hvelv av sprøytebetong. Utgangspunktet i dette eksempelet er disse forutsetningene:

- Montering av PE-skum må starte minst en uke før armering starter.
- Montering av PE-skum må være ferdig minst en uke før armering er ferdig.
- Armering må starte minst en uke før stoling starter.
- Armering må være ferdig minst en uke før stoling er ferdig.
- Det jobbes 100 timer i uka for alle aktivitetene.
- 50 000  $m^2$  tunnel skal sikres.

I den første situasjonen er alle kapasitetene forventet å være like, som vist i Tabell 21 og Figur 55:

**Tabell 21:** Situasjon 1, optimalitetsparadokset.

Aktivitet	Kapasitet	Starttidspunkt	Sluttidspunkt	byggetid
PE-skum	50,0 $m^2/h$	Uke 1	Uke 10	10
Armering	50,0 $m^2/h$	Uke 2	Uke 11	10
Stoling	50,0 $m^2/h$	Uke 3	Uke 12	10

Uke fra oppstart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PE-skum	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
Armering	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
Stoling	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0

**Figur 55:** Situasjon 1, optimalitetsparadokset.

I den andre situasjonen er det forventet at armering kan gå noe fortere, som vist i Tabell 22 og Figur 56:

**Tabell 22:** Situasjon 2, optimalitetsparadokset.

Aktivitet	Kapasitet	Starttidspunkt	Sluttidspunkt	byggetid
PE-skum	50,0 $m^2/h$	Uke 1	Uke 10	10
Armering	55,0 $m^2/h$	Uke 3	Uke 11	9
Stoling	50,0 $m^2/h$	Uke 4	Uke 13	10

Uke fra oppstart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PE-skum	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
Armering	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
Stoling	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0

**Figur 56:** Situasjon 2, optimalitetsparadokset.

Det kontraintuitive er at når aktiviteten i midten, altså armering går fortere, så blir hele byggetiden en uke lenger, selv om byggetiden for hver aktivitet summert er kortere. Det blir kortere aktiv byggetid, men mer ventetid og dermed lengre totaltid.

Et mer allment forståelig eksempel på et slikt paradoks, kan vises ved å la tre biler kjøre den samme strekningen på 100 km med disse forutsetningene:

- Bil 1 må starte minst en halvtime før bil 2 starter.
- Bil 1 må komme i mål minst en halvtime før bil 2 kommer i mål.
- Bil 2 må starte en halvtime før bil 3 starter.
- Bil 2 må komme i mål minst en halvtime før bil 3 kommer i mål.

Dersom alle bilene kjører i 100 km/h og bil 1 starter klokken 08:00, vil forløpet være som i Tabell 23.

**Tabell 23:** 100 km/h, optimalitetsparadokset.

	<b>Hastighet</b>	<b>Starttidspunkt</b>	<b>Sluttidspunkt</b>	<b>Tid brukt</b>
Bil 1	100 km/h	08:00	09:00	1 time
Bil 2	100 km/h	08:30	09:30	1 time
Bil 3	100 km/h	09:00	10:00	1 time

Dersom alle de samme forutsetningene gjelder, men bil 2 kjører i 200 km/h, vil forløpet være som i Tabell 24.

**Tabell 24:** 200 km/h, optimalitetsparadokset.

	<b>Hastighet</b>	<b>Starttidspunkt</b>	<b>Sluttidspunkt</b>	<b>Tid brukt</b>
Bil 1	100 km/h	08:00	09:00	1 time
Bil 2	200 km/h	09:00	09:30	0,5 timer
Bil 3	100 km/h	09:30	10:30	1 time

Det kontraintuitive er at når bil 2 får kjøre dobbelt så fort, vil hele forløpet bli en halvtime lenger, selv om bilene totalt sett har en halvtime kortere kjøretid. Det blir kortere aktiv kjøretid, men mer ventetid og dermed lengre totaltid.



# 5 Diskusjon

## 5.1 Anvendelse av VF-byggetid

Modellen er tilpasset vann- og frostsikring og skal i utgangspunktet kun brukes for dette formålet. Likevel kan det tenkes at programmeringen av toget er relevant for andre deler av tunnelinnredning. Dersom arbeidspakken løses som et tog, med samme type forutsetninger som for vann- og frostsikring, kan modellen videreføres. VF-byggetid kan i prinsippet brukes for beregning til alle typer vann- og frostsikring. Modellen er spesialtilpasset prosessene som er beskrevet i standard beregningsark, som består av:

- 34.3 Hvelv av sprøytebetong
- 34.41 Hvelv av betongelementer
- Kombinasjonsløsning

Standard beregningsark er satt opp på en måte som gjør at brukeren bare trenger å fylle ut fanen 'Prosjektinfo'. Mange prosjekter vil sannsynligvis avvike fra et standard oppsett da det er veldig mange ulike måter å løse vann- og frostsikring på. Derfor vil det ofte være behov for å gjøre modifikasjoner i standard beregningsark eller benytte andre beregningsark. Dette kapitlet går mer detaljert inn på avvik og hvilke problemer som kan oppstå og hvordan de kan løses.

Det er mange arbeider som gjøres underveis i vann- og frostsikring som ikke nødvendigvis gjøres samtidig av de ulike entreprenørene. For eksempel kan trekkerør ordnes av armeringslaget hos en entreprenør og av stolingslaget hos en annen entreprenør. Slike forskjeller kan påvirke kapasitetene.

En måte å løse slike problemer på når byggetid skal beregnes, er å ta utgangspunkt i forutsetningene som ligger til grunn for standard beregningsfaner og justere med posten som heter 'Ekstra uker'. Hvis for eksempel trekkerør skal gjøres av armeringslaget istedenfor stolingslaget, kan en uke trekkes fra stoling og legges til armering.

Eventuelt kan egne kapasiteter benyttes dersom brukeren har gode erfaringstall som samsvarer med deres måte å løse logistikken på. I så fall kan brukeren enten fylle kapasitetene direkte inn i en standard beregningsfane. Et alternativ er å benytte seg av tripplestimat. Dersom ingen av de standard beregningsfanene stemmer overens med logistikken som brukeren ser for seg, kan en av de tre andre fanene benyttes. Dersom brukeren ønsker å beregne byggetid i uker og beholde prinsippene for togoppsettet, kan fanen 'Annen løsning automatisk tog' benyttes. Prinsippene for togoppsettet er som nevnt:

- En aktivitet starter en uke etter foregående aktivitet startet.
- En aktivitet slutter tidligst en uke etter foregående aktivitet avsluttet.

Dersom det er mer ønskelig å bruke en viss avstand som sikkerhetsklaring, må koden i Excel programmeres om. Dersom det er ønskelig å vike fra prinsippene, kan fanen 'Annen løsning med selvvalgt tog' benyttes. Grunner for å vike fra prinsippene kan være:

- Behov for lenger tid mellom hver aktivitet.
- Behov for kortere tid mellom hver aktivitet.
- Behov for å fylle ventetid med arbeid.

Det kan være behov for lenger tid mellom hver aktivitet hvis det er fare for plunder og heft. Hvis for eksempel forventet kapasitet for stoling er mye lavere enn det som er anbefalt, kan det være fornuftig med mer enn en ukes sikkerhetsklaring mellom stoling og sprøytebetong. Ved å bruke fanen 'Annen løsning selvvalgt tog', kan brukeren selv bestemme starttidspunkt og varighet for de ulike aktivitetene.

Kortere tid mellom hver aktivitet kan være aktuelt dersom byggetiden for hver enkelt aktivitet kan beregnes med stor nøyaktighet. Sikkerhetsklaringen er satt til en uke, ettersom det er mye usikkerhet knyttet til kapasitetene. Ved å ta utgangspunkt i kortere tid mellom aktivitetene, økes risikoen for plunder og heft. Videre økes risikoen for økt byggetid og skader på maskiner og mennesker.

En tredje grunn for å vike fra prinsippene, kan være behov for å fylle inn ventetiden med arbeid. Optimalitetsparadokset viser at aktiviteter med veldig ulik fart og byggetid, vil føre til mye venting og lang byggetid. Derfor kan det være aktuelt å dele opp aktivitetene og fylle inn ventetid med arbeid.

Et eksempel på en 1000 meter lang tunnel med tverrsnitt T12,5, utført med 34.41 Hvelv av betongelementer, vises i Tabell 25. Kapasitetene i eksempelet er ikke de samme som de anbefalte kapasitetene.

**Tabell 25:** Eksempel med treg bolting.

	<b>Kapasitet</b>	<b>Byggetid</b>
Boring	10 <i>stk/h</i>	5 uker
Bolting	4 <i>stk/h</i>	12 uker
Membran	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	6 uker
Element vegg	1,3 <i>stk/h</i>	4 uker
Element heng	1,1 <i>stk/h</i>	8 uker

Dersom Fane 34.41 brukes i dette eksempelet, vil toget se ut som på Figur 57. Figuren viser at det er tre uker hvor det bare foregår bolting i tunnelen. Montering av membran starter syv uker etter bolting for å unngå at membranlaget tar igjen boltelaget.

Uke fra oppstart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Boring	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bolting	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0
Membran	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0
Element vegg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0
Element heng	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>Sum bemanning</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

**Figur 57:** Treg bolting uløst.

Halve boltarbeidet er ferdig i uke 7. Derfor er det helt trygt å starte montering av membran og gjennomføre halve arbeidet samme uke. I og med at halve boltarbeidet allerede er gjort, vil ikke membranlaget kunne ta igjen boltelaget. Av samme grunn kan første halvdel av montering av elementer fremskyndes. Figur 58 viser en visualisering av logistikken som er laget med Fane Annen løsning selvvalgt tog.

Uke fra oppstart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Boring	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bolting	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0
Membran	0	0	0	0	0	0	4	4	4	0	0	4	4	4	0	0	0	0	0	0
Element vegg	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0
Element heng	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	0
<b>Sum bemanning</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>

**Figur 58:** Treg bolting løst.

Byggetiden er forkortet med to uker uten at det har gått på bekostning av risiko for plunder og heft. En alternativ løsning for eksempelet hvor bolting tar såpass mye lengre tid enn de andre aktivitetene, vil være å sette inn to lag som bolter etter hverandre.

## 5.2 Optimalitetsparadokset

Det er viktig å forstå optimalitetsparadokset for å få til en god logistikk for vann- og frostsikring og gjøre gode prioriteringer. Prosessen flyter best mulig dersom alle aktiviteter tar like lang tid. Noen ganger vil økte kapasiteter på enkelte aktiviteter føre til at oppsettet må endres for å redusere byggetiden. I verste fall kan økte kapasiteter føre til at byggetiden blir lenger. Tabell 26 og Figur 59 viser et eksempel på byggetid for en 2000 meter lang tunnel sikret med 34.3 Hvelv av sprøytebetong. Kapasiteten for sprøytebetong er oppjustert i dette eksempelet, sammenlignet med den anbefalte verdien. Alle faktorer er satt til 1 og ekstra areal for utvidelser er satt til 0.

**Tabell 26:** 34.3 for 2000 meter lang tunnel.

Aktivitet	Kapasitet	Byggetid
Boring	35 <i>stk/h</i>	7 uker
Bolting	30 <i>stk/h</i>	8 uker
PE-skum	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	10 uker
Armering	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	10 uker
Stoling	45 <i>stk/h</i>	10 uker
Sprøytebetong	100 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	5 uker

Uke fra oppstart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Boring	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Bolting	0	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
PE-skum	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
Armering	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
Stoling	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
Sprøytebetong	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2
<b>Sum bemanning</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

**Figur 59:** Byggetid for 34.4 for 2000 meter lang tunnel.

Dersom bare armeringskapasiteten øker til 55 *m<sup>2</sup>/h*, og resten av kapasitetene forblir like, må oppsettet revurderes. Byggetiden for armering senkes fra ti uker til åtte uker og logistikken vil bli

foreslått som vist i Figur 60. Byggetiden øker med to uker som følge av at armering blir to uker kortere. Grunnen er at armering starter i uke 6 istedenfor uke 4 fordi det er fare for at armeringslaget vil ta igjen laget som monterer PE-skum.

Uke fra oppstart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Boring	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bolting	0	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
PE-skum	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
Armering	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
Stoling	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
Sprøytebetong	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2
<b>Sum bemanning</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

**Figur 60:** Raskere armering uløst.

For å løse dette problemet kan brukeren fylle ut uke 4 og uke 5 for armering. Videre settes det pause i to passende uker, for eksempel uke 8 og uke 11, som vist i Figur 61. Dette kan gjøres direkte i de standard beregningsfanene ved å sette celleverdien lik 0 i pauseukene. Ved slike endringer er det viktig å kontrollere at det ikke blir plunder og heft. I Figur 61 er det potensiell fare for plunder og heft mellom armering og stoling i uke 9 da begge aktivitetene har pågått i fire uker. Modellen viser at armeringslaget og stolingslaget ferdigstiller henholdsvis 250 og 200 meter i uka. Det vil si at armeringslaget vil ligge 200 meter foran stolingslaget i begynnelsen av uke 9. Det er mer enn god nok klaring. Det hadde derimot ikke fungert å legge den andre pauseuken for armering til uke 9. Armering og stoling ville i så fall startet på samme sted i tunnelen i uke 10.

Uke fra oppstart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Boring	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bolting	0	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
PE-skum	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
Armering	0	0	0	2	2	2	2	0	2	2	0	2	2	0	0	0	0
Stoling	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
Sprøytebetong	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0
<b>Sum bemanning</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Figur 61:** Raskere armering løst.

Alle aktiviteter får byggetid oppgitt i antall uker. Dette tallet er rundet opp i alle tilfeller. Det vil si at hvis en aktivitet er beregnet til å vare 4,1 uker, vil byggetiden oppgis som 5 uker. Derfor vil små endringer som i utgangspunktet skal påvirke alle aktiviteter, kunne gjøre utslag på enkeltaktiviteter. Dette fenomenet kombinert med optimalitetsparadokset, gjør at det i veldig sjeldne tilfeller vil kunne bli lengre byggetid når en faktor oppjusteres uten at togoppsettet blir endret.

### 5.3 Anbefalte verdier

Kapasitetene og faktorene som er anbefalt for VF-byggetid er resultatet av en sammensatt analyse av produksjonstall og dialog med fagekspertene. Generelt sett har det vært en konservativ tilnærming til anbefalingene. I situasjoner hvor det har vært uenigheter i hvor høy en kapasitet burde være, har parten som har talt for den laveste kapasiteten vunnet. Grunnen til dette er at det oftere er beregnet for kort byggetid enn for lang byggetid.

I spørsmål om hvor mange arbeidere som må anbefales for en viss kapasitet, har samme tankegang som regel vært gjeldende. Et eksempel er at to fagekspertene har ment at det kreves tre arbeidere for å få til  $45 \text{ m}^2/\text{h}$  stoling, samtidig som andre har ment at det bare kreves to arbeidere. Den konservative tilnærmingen førte til at det anbefales tre arbeidere for stoling.

Unntaket for denne tankegangen, er tall fra prosjekter hvor maskinparken ikke utfyller de forutsetningene som er satt for å få til anbefalte kapasiteter. For eksempel finnes det prosjekter hvor det brukes tre arbeidere for montering av PE-skum. I disse prosjektene er det ikke brukt MX-maskin. VF-byggetid forutsetter bruk av MX-maskin og dermed to arbeidere for montering av PE-skum. Dersom et prosjekt skal utføres med en annen maskinpark enn det som er forutsatt, må dette tas hensyn til.

Det har også vært uenigheter i antall aktiviteter som skal telles som tidsbestemmende. Forfatterne mener at oppsettet som er presentert i VF-byggetid treffer bransjen som helhet på en god måte. Likevel må det nevnes at det har vært etterspurt en ekstra aktivitet for 34.41 Hvelv av betongelementer. Denne aktiviteten skulle dekke kompletterende arbeid. Fundamentsetting er heller ikke vurdert som en tidsbestemmende aktivitet. Betydningen av fundamentsetting og kompletterende arbeid for byggetiden burde videre undersøkes.

Logistikken i kombinasjonsløsning av 34.3 og 34.41 har vært spesielt krevende å modellere. Noen av grunnene er uenigheter i antall aktiviteter som skal telles som tidsbestemmende og spørsmål om hvor mange arbeidere som må anbefales. For eksempel er boring satt opp som to ulike aktiviteter som skjer med mange ukers mellomrom. Først bores hull i veggene, dernest utføres alle aktuelle veggaktiviteter. Deretter bores hull i heng. Grunnen er at samme borerigg ikke burde bore alle hullene samtidig. Da vil det gå bort mye tid til omstilling på grunn av ulik hulldimensjon.

En alternativ løsning kunne vært å bruke to borerigger rett etter hverandre, hvor den ene boret vegghull og den andre boret takhull. I så fall vil et annet problem være hvordan det skal beskrives i modellen. Det kan være én aktivitet med to arbeidere med forutsetning om to tilgjengelige borerigger eller to aktiviteter med en arbeider hver med samme pauseforutsetninger som andre aktiviteter. Slike problemstillinger har det vært mange av for både 34.3, 34.41 og kombinasjonsløsning. Disse problemstillingene er undersøkt med prosjektdata og diskutert med fageksperter så langt det har latt seg gjøre. Likevel burde ikke anbefalingene tolkes som en urokkelig fasit, men heller et utgangspunkt for videre diskusjon.

Alle kapasiteter og faktorer burde undersøkes videre i fremtiden for å sørge for en oppdatert byggetidsmodell. Spesielt faktoren som beskriver samtidighet for vann- og frostsikring og annet arbeid. Faktoren er relevant for tunnelinnredning generelt, og ikke bare vann- og frostsikring. Det er behov for å klargjøre hva slags situasjoner med samtidighet som skal gi de ulike verdiene. Dette er meget komplekst og kan være et utgangspunkt for en fremtidig masteroppgave.

## 5.4 Forskningsspørsmål

### 5.4.1 FS1: Hvordan utføres vann- og frostsikring i norske vegtunneler i dag?

I de fleste tilfeller utføres vann- og frostsikring i norske vegtunneler med prosess 34.3 Hvelv av sprøytebetong, 34.41 Hvelv av betongelementer eller en kombinasjon av disse prosessene. Tunnelklasse og frostmengde er avgjørende for valg av metode, som vist på Figur 62.

Vann- og frostsikring	Frostmengder <sup>(1)</sup> (kap.7.2)	Tunnelklasser						Føringskant	Membran Type I, II, III	PE-skum	Frost-isolasjon XPS
		A	B	C <sup>(4)</sup>	D	E	F				
Hvelv av sprøytebetong <sup>(2)</sup>	F <sub>10</sub> < 8 000 h°C	X	X	X				X	III	(X)	-
	F <sub>10</sub> ≥ 8 000 h°C	X	X	X				X	-	X	-
Hvelv av betongelementer <sup>(3)</sup>	F <sub>10</sub> < 8 000 h°C			(X)	X	X	X	-	I, III	-	-
	F <sub>10</sub> ≥ 8 000 h°C			(X)	X	X	X	-	I, III	-	X

**Figur 62:** 34.3 og 34.41 for ulike dimensjonerende kriterier.  
(Vegvesen, 2020b)

34.3 Hvelv av sprøytebetong betyr et komplett hvelv av armert sprøytebetong med membran eller PE-skum bak. Prosessen kan utføres som 34.31 Isolert vanntett hvelv av sprøytebetong eller 34.32 Uisolert hvelv av sprøytebetong. 34.31 utføres med PE-skum og 34.32 utføres med membran. Flere ulike maskiner kreves for å utføre prosessen. Videre følger en liste med eksempel på maskinpark som kreves for å utføre 34.3:

- AMV borerigg (Boring)
- Servicebil (Boring)
- Gyserigg (Bolting)
- Bakstuffbil (Bolting, stoling)
- MX-maskin (PE-skum, membran)
- Spider (Armering)
- Lift
- Sprøyterigg (Sprøytebetong)

34.41 Hvelv av betongelementer vil si betonghvelv med nødvendig isolasjon, membran, fundamenter inklusiv bakstøp mot berg, bolter, festemidler og fugemateriale. Flere ulike maskiner kreves for å utføre prosessen. Videre følger en liste med eksempel på maskinpark som kreves for å utføre 34.41 med anbefalte kapasiteter:

- AMV borerigg (Boring)
- Gravemaskin 14 ton CAT T13 (Membran)
- Bakstuffbil (Bolting)
- Gyserigg (Bolting)
- Lift
- MX-maskin (Membran)
- Elementmaskin (Element vegg og heng)

Kombinasjonsløsningen utføres med 34.41 på veggene og hengen utføres med 34.3. Alle maskiner som er listet opp er nødvendige for utførelse av kombinasjonsløsning.

I tillegg til disse tre løsningene, er 34.2 kontaktstøpt betonghvelv med membran en mulighet som er lite brukt i norske vegtunneler. Giertsenduk og Foamroxs er løsninger som ikke er mye brukt i tidligere prosjekter, men som muligens kommer til å bli brukt mer i fremtiden.

#### **5.4.2 FS2: Hvilke deloperasjoner kan en modell for vann- og frostsikring deles inn i?**

34.3 Hvelv av sprøytebetong kan deles inn i de tidsbestemmende deloperasjonene som vises i Tabell 27. I denne prosessen inngår også festebolter, opphengsdetaljer, brannseksjonering, dilatasjonsfuger



og endeavslutninger, samt fjerning av prelltap. Det er små forskjeller på 34.31 og 34.32 i utførelse. Disse forskjellene fremkommer av Tabell 27.

**Tabell 27:** Deloperasjoner 34.3 Hvelv av sprøytebetong.

<b>Deloperasjon</b>	<b>Forklaring</b>
Boring	Boring av hull i tunnelens vegg og heng, som det skal settes bolter i. M16 bolt antas for VF-byggetid.
Bolting	Montering av bolter for PE-skum, ventilator, skilt og annet teknisk utstyr. Inkluderer prøvetrekking. M16 bolt antas.
PE-skum (34.31)/ Membran (34.32)	Montering av plater av PE-skum/ Montering og sveising av membran. I prosess 34.32 inngår trekkerør i membran.
Armering	Montering av armeringsnett. For prosess 34.31 inngår trekkerør i armering.
Stoling	Montering av stoler som skaper avstand mellom armering og PE-skum/membran. Inkluderer komplettering.
Sprøytebetong	Sprøytebetong påføres vann- og frostsikringen for brannsikring.

34.41 Hvelv av betongelementer kan deles inn i aktivitetene som vises i Tabell 28. I denne prosessen inngår også fundamentering. Med fundamentering menes utsetting av fundamenter i sålen som skal støtte betongelementene.

**Tabell 28:** Poster i Fane 34.41 Hvelv av sprøytebetong.

<b>Post</b>	<b>Forklaring</b>
Boring	Boring av hull i tunnelens vegg og heng, som det skal settes bolter i.
Bolting	Montering av bolter for betongelementer, ventilator, skilt og annet teknisk utstyr. Anbefalt kapasitet forutsetter at monteringen gjøres av to lag med doble ressurser.
Membran	Montering av vanntett membran. Membran monteres langsgående bak veggelementer og tversgående bak takelementer. Membranen sveises i skjøtene.
Element vegg	Montering av prefabrikkerte betongelementer langs tunnelens vegg.
Element heng	Montering av prefabrikkerte betongelementer langs tunnelens heng.

For kombinasjonsløsning utføres alle deloperasjonene som er beskrevet i Tabell 27 og Tabell 28, utenom Element heng. Deloperasjoner for 34.41 utføres i veggene. Deloperasjoner for 34.3 utføres i hengen.

### 5.4.3 FS3: Hvilke kapasiteter har de ulike deloperasjonene?

Kapasitetene som anbefales for de ulike prosessene vises i Tabell 29 og Tabell 30. For kombinasjonsløsning vil kapasitetene være multiplisert med 0,9 som følge av 90% produktivitet på grunn av mer flytting av maskiner.

**Tabell 29:** Kapasiteter for 34.3.

<b>Post</b>	<b>Anbefalt kapasitet/verdi</b>	<b>Bemanning</b>
Boring	35 <i>stk/h</i>	1
Bolting	30 <i>stk/h</i>	2
PE-skum (34.31)/ Membran (34.32)	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	2/4
Armering	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	2
Stoling	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	3
Sprøytebetong	70 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	2

**Tabell 30:** Kapasiteter for 34.41.

<b>Post</b>	<b>Anbefalt kapasitet/verdi</b>	<b>Bemanning</b>
Boring	10 <i>stk/h</i>	1
Bolting	8 <i>stk/h</i>	4
Membran	45 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	4
Element vegg	2 <i>m<sup>2</sup>/h</i>	2
Element heng	1,8 <i>stk/h</i>	2

#### 5.4.4 FS4: Hvilke rammer må ligge til grunn for en byggetidsmodell for vann- og frostsikring?

En byggetidsmodell for vann- og frostsikring krever en veileder som beskriver hvordan modellen skal brukes og hvilke problemer som kan oppstå. Et eksempel på et slikt problem er optimalitetsparadokset. Veilederen for VF-byggetid ligger i vedlegg E - Veileder til VF-byggetid.

I tillegg til kapasiteter for de ulike deloperasjonene, må en del rammer ligge til grunn for en byggetidsmodell for vann- og frostsikring. VF-byggetid er programmert på en måte som gjør at en standard situasjon er utgangspunkt for kapasitetene og at ulike faktorer kan bidra til å justere byggetiden. Utgangspunktet for kapasitetene er den beskrivelsen av prosessene som er gitt i FS1 og FS2. I tillegg er det forutsatt:

- Ingen samtidighet med andre arbeider enn vann- og frostsikring
- Sikringsklasse I, II og III
- Tverrprofil T9,5, T10,5 eller T11,5
- Metode 34.3 eller 34.41

Dersom prosjektet som skal regnes på har andre forutsetninger, anbefales faktorer som vises i Tabell 31. Byggetid for de ulike deloperasjonene divideres med produktet av alle faktorene.

**Tabell 31:** Faktorer i prosjektinfo.

<b>Spørsmål</b>	<b>Anbefalte faktor</b>
Samtidighet for VF og annet arbeid?	Ja: 0,65-0,80 Nei: 1,00
Faktor for maskinpark	1,00
Hvilken metode skal brukes?	34.3: 1,00 34.41: 1,00 Kombinasjon: 0,9
Hvilken sikringsklasse? (boring)	I, II og III: 1,00 IV: 0,9 V: 0,75 VI: 0,5
Hva er tverrprofilen til tunnelen?	T9,5-T11,5: 1,00 Alle andre tverrsnitt: 0,95

Følgende spørsmål må også besvares, da de påvirker byggetiden:

- Hva er lengden som skal vann- og frostsikres?
- Hvor mange timer jobbes per uke?
- Ekstra areal fra utvidelser?
- Borehull per  $m^2$ ?
- Antall PE-layers?
- Antall elementer vegg?
- Antall elementer heng?
- Andel vegg? (For kombinasjonsløsning)

En viktig ramme som ligger til grunn for byggetidsmodellen, er prinsippene for togoppsettet:

- En deloperasjon starter tidligst en uke etter foregående aktivitet startet
- En deloperasjon slutter tidligst en uke etter foregående aktivitet avsluttet

VF-byggetid er spesialtilpasset rammene som er beskrevet gjennom tre faner:

- 34.3 Hvelv av sprøytebetong
- 34.4 Hvelv av betongelementer
- Kombinasjonsløsning

I og med at det er så mange ulike måter å løse vann- og frostsikring på, er det ytterligere tre faner som er laget med friere tøyler for brukeren:

- Annen løsning automatisk tog
- Annen løsning selvvalgt tog
- Annen løsning dager

## 6 Konklusjon

Følgende forskningsspørsmål er besvart i denne oppgaven:

- Hvordan utføres vann- og frostsikring i norske vegtunneler i dag?
- Hvilke deloperasjoner kan en modell for vann- og frostsikring deles inn i?
- Hvilke kapasiteter har de ulike deloperasjonene?
- Hvilke rammer må ligge til grunn for en byggetidsmodell for vann- og frostsikring?

I de fleste tilfeller utføres vann- og frostsikring i norske vegtunneler med prosess 34.3 Hvelv av sprøytebetong, 34.41 Hvelv av betongelementer eller en kombinasjon av disse prosessene. Kombinasjonsløsningen går ut på å utføre 34.41 i veggene og 34.3 i hengen. VF-byggetid er spesialtilpasset disse tre metodene. Det er også mulig å bruke andre metoder, men det krever mer bakgrunnskunnskap fra brukeren. Prosessene kan videre deles inn i deloperasjoner med anbefalte kapasiteter som vist i Tabell 29 og Tabell 30.

I tillegg til kapasiteter for de ulike deloperasjonene, ligger en del rammer til grunn for VF-byggetid. Tabell 31 med påfølgende punktliste viser hvilke faktorer som påvirker byggetiden. En viktig ramme som ligger til grunn for modellen, er prinsippene for togoppsettet:

- En deloperasjon starter tidligst en uke etter forrige aktivitet startet
- En deloperasjon slutter tidligst en uke etter forrige aktivitet avsluttet

Det er utført analyse av data på vann- og frostsikring fra 23 ulike tunneler. Tunnelene utgjør en samlet lengde på over 100 km.

*Masteroppgaven har resultert i en byggetidsmodell (VF-byggetid) for vann- og frostsikring med en tilhørende veileder. Oppsett og tall i modellen er forankret i analyse av produksjonsdata, innsyn i fremdriftsplaner og dialog med fageksperter. Modellen er validert og testet for reelle prosjekter. VF-byggetid er programmert på en måte som gjør at brukeren ikke låses til et bestemt oppsett. Modellen skal være brukervennlig og enkel å videreutvikle.*

## 7 Videre arbeider

En forutsetning for videre arbeid er god dokumentasjon av prosjekter fra entreprenør. I løpet av utarbeidelsen med masteroppgaven ble det kartlagt flere muligheter for videre arbeid med byggetidsmodellen. Disse er gitt i følgende punktliste:

- Analysere data fra vann- og frostsikring i jernbanetunneler, bestemme kapasiteter og eventuelt lage nye faner i byggetidsmodellen. For eksempel kan det lages en fane for 34.2 kontaktstøpt betonghvelv m/membran.
- Analysere data og lage faner for flere metoder som for eksempel Giertsenduk og Foamrox.
- Inkludere de andre arbeidspakkene som inngår i etterarbeider i modellen. Dette gjelder:
  - Grunnarbeid
  - Kompletterende arbeid
  - Elektroarbeid
- Sammenstille VF-byggetid med beregningsverktøyet for Tunnelbyggetid 2021.
- Hente inn og analysere mer data fra ulike prosjekter og tilpasse kapasiteter, faktorer og andre verdier til analysen. Spesielt faktor for samtidighet mellom VF og annet arbeid burde videreutvikles.
- Legge inn valgmuligheter for maskiner som kan brukes og lage kapasiteter som er tilpasset for de ulike maskinene.
- Undersøke de forkastede faktorene og hvor vidt det var riktig å forkaste de.
- Utvikle bedre mulighet for stokastisk beregning av byggetid. Dette kan for eksempel gjøres med Monte Carlo-metoden.

# Referanser

- AESA. A systematic approach to designing research methodology, 2020. URL <https://www.aesnetwork.org/research-onion-a-systematic-approach-to-designing-research-methodology/>.
- O. Andersen. To årsaker til dårlige prosjektplaner, 2016. URL `@misc{old,author="Oldroyd",title="Fraportaltilportal",url="https://oldroyd.no/uploads/dokumenter/Oldroyd_tunnelbrosjyre_skjerm_org.pdf",publisher="Prosjektbloggen",year="2018"}`.
- Arbeidstilsynet. Helseproblemer og ulykker i bygg og anlegg- rapport 2021, 2021. URL <https://www.arbeidstilsynet.no/globalassets/om-oss/forskning-og-rapporter/kompass-tema-rapporter/2020/kompass-tema-nr.-1-2021-helseproblemer-og-ulykker-i-bygg-og-anlegg.pdf>.
- M. Arestegui. Dialog og datautveksling med arestegui, 2021a.
- M. Arestegui. Tunnelinnredning. Skanska, 2021b.
- M. Arestegui. Dialog og datautveksling med arestegu, 2022.
- ASCE. About asce, 2022. URL <https://www.asce.org/about-asce>.
- A. Bruland. Dialog og datautveksling med arestegui, 1992. URL [https://folk.ntnu.no/pdj/Del%20II%20kompendium\\_2016%20kap%20IV-VI.pdf](https://folk.ntnu.no/pdj/Del%20II%20kompendium_2016%20kap%20IV-VI.pdf).
- A. Bruland. Veileder for beregningsverktøyet tunnelbyggetid 2021, 2021. URL <https://www.eba.no/siteassets/dokumenter/vei-og-jernbane/tunnellbyggetid/veileder-byggetidsmodell-november-2021-ver-1.0-16.12.21.pdf>.
- K. Buvik. Feltsamtaler som datakilde i kvalitativ samfunnsforskning, 2019. URL <https://www.idunn.no/doi/10.18261/issn.1504-291X-2020-03-02>.
- Bygg21. Nesete steg, 2015. URL <https://bygg21.no/wp-content/uploads/2021/03/veileder-for-stegstandard-ver-1.2-med-logoer-201116.pdf>.
- Clarivate. Wef of science, 2022. URL <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/>.
- F. Drevland. Kostnadsestimering under usikkerhet, 2013. URL [https://www.ntnu.no/documents/1261860271/1262010610/CONCEPT\\_kostnadsestimering\\_til+WEB.pdf/7fe95f32-0477-4468-b0e5-54589687c16d](https://www.ntnu.no/documents/1261860271/1262010610/CONCEPT_kostnadsestimering_til+WEB.pdf/7fe95f32-0477-4468-b0e5-54589687c16d).

- A. Ekanger. Slik må jernbanen ryddes, 2019. URL <https://www.nrk.no/vestland/slik-ma-jernbanen-daglig-ryddes-for-is-1.12761503>.
- Elsevier. Scopus - expertly curated abstract citation database, 2020. URL <https://www.elsevier.com/solutions/scopus>.
- Elsevier. Sciencedirect for rd, 2022. URL [https://www.elsevier.com/solutions/sciencedirect/r-and-d?dgcid=RN\\_CM\\_Sourced\\_400000892&gclid=CjwKCAjws8yUBhA1EiwAi\\_tpEVMmhEjOm5Jqqnd3M2\\_CGjWu7APVHhDdAGgw7pOqHsbmTHBk8KtkexoCT0YQAvD\\_BwE](https://www.elsevier.com/solutions/sciencedirect/r-and-d?dgcid=RN_CM_Sourced_400000892&gclid=CjwKCAjws8yUBhA1EiwAi_tpEVMmhEjOm5Jqqnd3M2_CGjWu7APVHhDdAGgw7pOqHsbmTHBk8KtkexoCT0YQAvD_BwE).
- A. Engebø. Forelesning: “litteratursøk og referanseverktøy“, 2021.
- E. Grøv. Contract philosophy in norwegian tunnelling, 2012. URL <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Publication-21.pdf>.
- E. Hedenstad. Byggtid for vegtunneler, 2014. URL [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/233231/755531\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/233231/755531_FULLTEXT01.pdf?sequence=2&isAllowed=y).
- D. I. Jacobsen. Hvordan gjennomføre undersøkelser. <https://www.uio.no/studier/emner/jus/afin/FINF4002/v14/metode1.pdf>, n.d. Accessed: 2022-26-04.
- Jernbanekompetanse. Underbygning/frost, 2021. URL [https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Underbygning/Frost#Jernbanens\\_problem\\_med\\_tele\\_i\\_grunnen](https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Underbygning/Frost#Jernbanens_problem_med_tele_i_grunnen).
- T. Jick. Mixing qualitative and quantitative methods: Triangulation in action, 1979.
- L. E. F. Johannesen. Mot en utvidet forståelse av «abduktiv analyse» og teoriutvikling, 2022. URL <https://www.idunn.no/doi/10.18261/nost.6.2.4>.
- M. Jørgensen. Hvordan få tak i reell usikkerhet av kost-nytte i en skjev verden?, n.d. URL <https://www.simula.no/sites/default/files/publications/files/prosjektnorgeusikkerhet-jorgensen.pdf>.
- H. K. Kvikne. Digitalisering og datainnsamling i tunnel - en studie av digital datainnsamling ved konvensjonell tunneldriving, 2019. URL <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2624722>.
- J. Lima. Dialog og datautveksling med lima, 2021.
- M. Marijo. Rock bolt tunnel, 2019. URL <https://www.youtube.com/watch?v=1jYkVsN30qY&t=34s>.



NFF. Subsea tunnels, 2009. URL <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Publication-18.pdf>.

NFF. Rock support in norwegian tunnelling, 2010. URL <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Publication-19.pdf>.

NFF. Håndbok for arbeidsmiljø under jord, 2015. URL [https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Haandbok\\_09.pdf](https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Haandbok_09.pdf).

NTH. Prosjektrapport 2e-95 - tunneldrift, 1995.

NTNU. Avanserte litteratursøk, 2010. URL <https://i.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/Avanserte+litteraturs%C3%B8k>.

NTNU. Hva er mrod, n.da. URL <https://www.ntnu.no/sekom/hva-er-imrod>.

NTNU. Finne kilder, n.db. URL <https://i.ntnu.no/wiki/-/wiki/norsk/finne+kilder>.

RIF. Sha i bygg- og anleggsprosjekter, 2019. URL [http://rif.no/wp-content/uploads/2019/12/RIF1018\\_Veiledning\\_SHA2\\_112019.pdf](http://rif.no/wp-content/uploads/2019/12/RIF1018_Veiledning_SHA2_112019.pdf).

R. Road. Drill and blast method, n.d. URL <https://railssystem.net/drill-and-blast-method/>.

C. Rønneberg. Gode løsninger for vann- og frostsikring, 2016. URL <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2625321/SVV>.

K. Samset. Forskningsmetodekurset - del 1 kvalitativ forskning, 2014.

G. Scholar. Google scholar, n.d. URL <https://scholar.google.com/intl/en/scholar/about.html>.

Skanska Norge. TUNNELINNREDNING, 2014. URL <https://www.youtube.com/watch?v=cMvpU9GEj9k>.

Snemyr. Brannsikring, n.d. URL <https://snemyr.no/tjenester/brannsikring>.

H. Storkås. Produksjonsoppfølging ved bruk av ditio og power bi, 2021.

V. Strype. Personlig kommunikasjon, 2022.

UIO. Modeller, 2020. URL <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/m/modeller.html>.

Unit. Oria søketjeneste, 2021. URL <https://www.unit.no/en/node/469>.

- N. Universitetsbiblioteket. Hvordan komme igang med oppgaven. [https://innsida.ntnu.no/documents/168357/0/Bibliotekets\\_introkurs\\_Skrivefestival.pdf/8d82b739-4438-4cb3-ab50-2ddd23c135ba](https://innsida.ntnu.no/documents/168357/0/Bibliotekets_introkurs_Skrivefestival.pdf/8d82b739-4438-4cb3-ab50-2ddd23c135ba), n.d. Accessed: 2022-26-05.
- S. Vegvesen. Vegtunneler, 2006. URL [https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/189827/Handbok\\_021\\_2006.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/189827/Handbok_021_2006.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- S. Vegvesen. Vegbygging, 2018. URL <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-n200-vegbygging-juli-2018.pdf>.
- S. Vegvesen. Håndbok r761 prosesskode 1 standard beskrivelsestekster for vegkontrakter (2018). 2020a. URL <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r761-prosesskode-1-05072018.pdf>.
- S. Vegvesen. Håndbok n500 vegtunneler, 2020b. URL <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-n500-vegtunneler.pdf>.
- S. Vegvesen. Konkurransgrunnlag, 2021a. URL <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/veg-og-gate/konkurranser-og-kontraktsmaler/mal-asfaltkontrakter-2021/r763-asfaltkontraktsmal-under-eos-terskelverdi-alle-dokumenter-samlet.pdf>.
- S. Vegvesen. Tunnelveiledning, 2021b.
- C. Wohlin. Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering, 2014. URL <https://www.wohlin.eu/ease14.pdf>.

# Vedlegg

Vedlegg A - Spørreskjema

Vedlegg B - NCC

Vedlegg C - AF

Vedlegg D - Norconsult

Vedlegg E - Veileder til VF-byggetid

Vedlegg F - VF-byggetid

Vedlegg G - Kapasitetsintervaller

Vedlegg H - Kapasitetsberegning Ditio (til november)

Vedlegg I - Kapasitetsberegning Ditio (fra november)

Vedlegg J - Kapasitetsberegning Formworks

Vedlegg K - Kapasitetsberegning Hæhre

Vedlegg L - Kapasitetsberegning Ditio (SKA)

Vedlegg M - Prosjektsammenligning

Vedlegg N - Svar på spørreskjema (H&S)

Vedlegg O - Kartlegging av mengdebeskrivelser (H&S)

Vedlegg P - Tidligfasemodell (brukerversjon) (H&S)

