

Britt Karin Moe

Mulighetsstudie av reduksjon av tverrsnittsstørrelsen til jernbanetunneler med hensyn på kostnader og miljø

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Albert Lau

Medveileder: Amund Bruland

Juni 2021

Britt Karin Moe

Mulighetsstudie av reduksjon av tverrsnittsstørrelsen til jernbanetunneler med hensyn på kostnader og miljø

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Albert Lau
Medveileder: Amund Bruland
Juni 2021

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



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet av Britt Karin Moe ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU. Oppgaven leveres som avsluttende arbeid i faget *TBA4955 - Jernbane, Masteroppgave*, utgjør 30 studiepoeng, og er skrevet gjennom vårsemesteret 2021. Tema og problemstilling for oppgaven, forskningsspørsmålene, deler av litteraturstudiet og metoden ble utarbeidet i forbindelse med kandidatens prosjektoppgave. Den ble gjennomført og skrevet høsten 2020 som et forstudium til masteroppgaven. Det ble nødvendig å gjøre enkelte modifikasjoner og en generell begrensning av oppgaven, som avviker fra beskrivelsen i prosjektoppgaven, da andre metoder for databehandling ble ansett som mer hensiktsmessige.

Takk til hovedveileder Albert Lau og medveileder Amund Bruland ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU, for fantastisk hjelp, råd og tilbakemeldinger gjennom arbeidet med oppgaven. Trine Bye Sagen og Odd-André Rustad ved Bane NOR takkes for tilgjengeliggjøring av faglitteratur, hjelp til faglige problemstillinger, samt formidling av kontaktpersoner til prosjektet. Det rettes også en takk til alle fagpersoner som har bistått og tatt seg tid til å møte meg for uformelle samtaler og intervju. Takk til KONNEKT for finansiering av feltundersøkelser og til prosjektgruppen i *TBA4853 EiT* med Vegard Tunheim, Irfan Suvalija, Jo Trønsdal Bævre, Magnus Greger Leinan, Øystein Øverlie Bakka og Nicklas Bekkevold for et godt samarbeid og utvikling av beregningsmodellen benyttet i masteroppgaven.

Jeg vil takke min medstudent Ådne Himle Matland for engasjerende faglige diskusjoner, innspill til oppgaven, samt utallige kopper med kaffe og gullkorn på vårt felles kontor denne våren. Sist, men ikke minst vil jeg takke samboeren min for støtten og tålmodigheten denne uvanlige våren, som har bestått både av en coronapandemi, flytting og masterskriving.

Trondheim, juni 2021

Britt Karin Moe

Britt Karin Moe

Sammendrag

Det har vært en økning i tverrsnittsstørrelsene til jernbanetunneler i tråd med den teknologiske utviklingen, fra de første togene begynte å kjøre på skinner i Norge. Økningen i tverrsnittsstørrelsen kan forsvares med økt- og endret plassbehov i tunneltverrsnittene, men det har vist seg å finnes svært lite litteratur og dokumentasjon knyttet til prosjektering av tverrsnittsstørrelsen til jernbanetunneler. Det er funnet at det for enkelte nyere prosjekter er prosjektert med større tverrsnittsstørrelse for tunnelene enn det som er anbefalt i standarden. Derfor ble det funnet nødvendig å undersøke hvor store tunneltverrsnittene behøver å være.

I prosjektet ble det foretatt målinger av tunneltverrsnittet på to tunneler på Gardermobanen, som videre ble modellert og analysert med tanke på å undersøke om det var mulig å redusere tverrsnittsstørrelsene. Disse tunneltverrsnittene ble videre sammenlignet med tunneltverrsnitt fra nyere prosjekter, for å undersøke potensialet for tverrsnittsreduksjon i henhold til dagens standard. Videre ble en beregningsmodell for kostnader og CO_2 -utslipp fra byggefasen etablert, for å undersøke hvilken effekt tverrsnittsreduksjon hadde på kostnader og CO_2 -utslipp fra byggefasen, og hvor data fra analysen av tverrsnitt ble anvendt som inngangsparametere.

Det ble funnet at sonen for evakuering, sonen for faste installasjoner og sporkonstruksjonen var områdene i tunneltverrsnittet med mest potensiale for reduksjon. Reduksjonspotensialet til evakuerings- og rømningssonen kom fra muligheten til å kombinere disse til en sone. Det ble videre funnet at ballastfritt spor som sporkonstruksjon gir et slankere tunneltverrsnitt. Ved å gjennomføre reduksjon på disse områdene ble det funnet et reduksjonspotensiale for tunneltverrsnittene i størrelsesorden $10m^2$. Dette gir følgelig en reduksjon av drivekostnader i størrelsesorden 4000 kr/m, reduksjon i CO_2 -utslipp på 500 kg CO_2 pr enhetslengde og en reduksjon i avgifter knyttet til CO_2 -utslipp på 900 kr pr enhetslengde. Gjennom prosjektet ble det funnet at dagens prosjekteringsmetoder i liten grad er egnet for optimalisering av tunneltverrsnitt, i lys av hvor stort reduksjonspotensiale som ble avdekket i prosjektet, i tillegg til flere faktorer knyttet til kompleksiteten av jernbanetunneler, som gjør prosjektering utfordrende.

Summary

There has been an increase in the cross section size of railway tunnels in line with the technological development the past 100 years, from when the first trains started to run on rails in Norway. The increase in the cross section size can be explained by increased- and changed space requirements in the tunnel cross section, but it has been limited literature and documentation on the subject of design and engineering of railway tunnels. It was shown from some newer projects, that the projects have designed the cross section larger than the requirements of the technical standards. Therefore it has been found necessary to investigate how big the cross section of railway tunnels are required to be.

Measurements of the cross section size of two tunnels on the Gardermoen-line was obtained, which were further modelled and analysed in regards to investigating if it were possible to reduce the cross sections. These cross sections were further compared with cross sections from newer projects to investigate the reduction potential in relation to today's technical standards. A simplified computational model for cost and CO^2 -emission from the building phase was established to investigate the effect of cross section reduction on the cost and CO^2 -emissions, where the data from the analysis of the cross sections were used as input parameters.

It was found that the area for evacuation, fixed installations and the track construction were the areas within the cross sections with the highest reduction potential. The reduction potential for the evacuation- and the installation area came from the possibility of combining the areas. It was further found that ballast-less track as the track structure can result in a smaller cross section. By conducting a reduction in these areas, it was found that the reduction potential for the cross sections was in the magnitude of $10m^2$. This gave a reduction in the construction cost in the magnitude of 4000 NOK/m, a reduction in the CO^2 -emissions of 500 kg CO^2 pr unit length, and a reduction in the costs related to the CO^2 -emissions of 900 NOK pr unit length. Through the project, it was found that today's designing method in little degree is suitable for optimization of tunnel cross section size, in light of the great reduction potential found in the project. In addition to this, several factors related to the complexity of railway tunnels also makes the design process challenging.

Oppgavens oppbygning

Denne masteroppgaven undersøker mulighetene for å redusere tverrsnittsstørrelsen til jernbanetunneler. Oppgaven består av en hoveddel, som utgjør masteroppgaven i sin helhet, og en vitenskapelig artikkel, som tilleggsdokument oppført i vedleggslisten. Masteroppgaven er i sin helhet skrevet av kandidaten, med forslag og anbefalinger fra veiledere. Masteroppgaven er strukturert i henhold til NTNUs retningslinjer for rapportskrivning ved prosjekt- og masteroppgaver (NTNU 2013). Kandidaten har forsøkt å dokumentere arbeidet på en logisk, klar, fullstendig og strukturert måte, hvor oppgavens struktur er illustrert i figur 1. Videre er det gitt en kort oppsummering av hvert kapitels innhold i masteroppgaven, samt en liste over vedlagte dokumenter.



Figur 1: Masteroppgavens struktur

Kapittel 1 - Innledning: Gir en introduksjon til oppgaven med oversikt over prosjektets problemstilling, forskningsspørsmål og relevans, samt en oversikt over prosjektets omfang og avgrensninger.

Kapittel 2 - Litteraturstudie: Presenterer et utfyllende litteraturstudie som gir et overblikk over de involverte fagfeltene innenfor temaet jernbanetunneler og presenterer hvilke problemstillinger som må tas stilling til under prosjektering av slik infrastruktur.

Kapittel 3 - Metode: Gir innsikt i oppgavens forskningsmetodikk som ble utviklet på bakgrunn av informasjonen funnet i litteraturstudiet. Kapitlet gir en strukturert gjennomgang av fremgangsmåten til prosjektet og gjør rede for hvorfor metoden er hensiktsmessig.

Kapittel 4 - Resultater og diskusjon: Presenterer forskningsarbeidets resultater. Videre presenterer kapitlet analyser og diskusjon av resultatene knyttet opp mot

forskningsspørsmålene i oppgaven, og drøfter funnene opp mot relevant faglitteratur.

Kapittel 5 - Konklusjon og videre arbeid: Det gis en konklusjon med svar på forskningsarbeidets problemstilling med tilhørende forskningsspørsmål. Litteraturstudiet, resultatene med tilhørende analyser har dannet grunnlaget for den presenterte konklusjonen. Videre redegjøres det også for videre arbeid til masteroppgaven.

Appendiks 1 - Scientific Article: Er bygget opp med mange av de samme kapitlene som masteroppgaven. Den er forfattet i korthet med et begrenset litteratur- og metodekapittel, og presentasjon av de viktigste resultatene. Artikkelen kan på mange måter leses som en oppsummering av masteroppgaven. Den er utformet slik at den er lesbar uavhengig av masteroppgaven, men egner seg best for lesere som allerede har grunnleggende forståelse av emnet. Artikkelen er sendt til følgende konferanse for vurdering: *BCRRA2020 - 11th International Conference on the Bearing Capacity of Road, Railways and Airfields.*

Følgende dokumenter er vedlagt i opplistet rekkefølge på slutten av oppgaven:

1. Scientific Article

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Summary	iii
Oppgavens oppbygning	iv
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Forskningsspørsmål	2
1.3 Omfang og avgrensninger	4
2 Litteraturstudie	6
2.1 Dimensjonering	6
2.2 Gauging-metoder	7
2.3 Tverrsnittsbehov	11
2.3.1 Profiler og lasttilfeller	11
2.3.2 Minste tverrsnitt	12
2.3.3 Normalprofilen	15
2.3.4 Tekniske installasjoner	16
2.4 Valg av tunnelkonsept	24
2.5 Drivemetode	26
2.6 Optimaliseringsanalyse	30
3 Metode	31
3.1 Datagrunnlag	34
3.2 Konstruering av tunneltverrsnitt	35
3.3 Optimalisering av tunneltverrsnittet	35
3.4 Sammenligning av tunnelprofil	36
3.5 Beregning av CO ₂ og kostnad	37

4	Resultater og diskusjon	40
4.1	Kontroll av empiriske data	40
4.2	Faste komponenter	46
4.3	Valg av sporkonstruksjon	55
4.4	Undersøkelse av muligheten for reduksjon av tunneltverrsnittene . .	56
4.5	Kostnad- og miljøpåvirkning	58
4.6	Valg av tunnelkonsept	61
4.7	Dokumentasjon av prosjektering	65
5	Konklusjoner og videre arbeid	68
5.1	Konklusjoner	68
5.2	Videre arbeid	69
	Bibliografi	71

Appendiks 1: Scientific Article

Figurer

1	Masteroppgavens struktur	iv
2	Konturer innenfor tunnelinfrastruktur	8
3	Dynamisk lastprofil NO1	12
4	Sammenligning av ulike minste tverrsnittene for eksisterende baner .	14
5	Minste tverrsnitt nye baner	15
6	Normalprofil dobbeltsporetunnel	16
7	Normalprofil Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 dobbeltsporetunnel	17
8	Fritt profil for strømvaktaker og tverrsnitt E for nye og eksisterende baner	19
9	Ballastprofil enkeltspor	24
10	Skjematisk oversikt over ulike tunnelkonsept	25
11	Skjematisk oversikt over forskningsmetoden	32
12	Geometrisk fremstilling av normalprofil til tunnel	38

13	Skjematisk illustrasjon av hvilken type tunnelkonsept med tilhørende drivemetode og vann- og frostsikringsmetode som er inkludert i modellen	39
14	Detaljtegning sporkonstruksjon Rashølet tunnel	41
15	Detaljtegning sprokonstruksjon Bekkedalshøgda tunnel	42
16	Detaljtegning Rashølet tunnel	43
17	Detaljtegning Bekkedalshøgda tunnel	44
18	Detaljtegning området for tekniske installasjoner Bekkedalshøgda tunnel	47
19	Detaljtegning forenklet modell enkeltspor Intercity-prosjektet	49
20	Detaljtegning forenklet modell dobbeltspor Intercity-prosjektet	50
21	Illustrerer optimalisert tverrsnitt av dobbeltsporstunnel fra Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16	51
22	Sammenligning enkeltsporstunnel - ny mot gammel	53
23	Sammenligning dobbeltsporstunnel - ny mot gammel	54
24	Detaljtegning av alternative plasseringer av tekniske installasjoner i området for tekniske installasjoner Bekkedalshøgda tunnel	57
25	Kostnader og utslipp for ulike tunneltverrsnitt pr meter tunnel	59
26	Kostnader og CO^2 utslipp fordelt på kostnadsmoduler, hvor (a) og (b) hører til tverrsnitt $53m^2$, mens (c) og (d) hører til tverrsnitt $59m^2$	60
27	Illustrerer trykkrefter i enkeltsporstunnel	62
28	Illustrerer trykkrefter i dobbeltsporstunnel	63
29	Illustrerer hvordan styring av hjulakselen foregår som følge av hjulets konisitet. R_L og R_R er rulleradiusen til henholdsvis høyre og venstre hjul	64

Tabeller

1	Komponenter relatert til sikkerhet med funksjoner og krav	21
2	Komponenter relatert til sikkerhet med funksjoner og krav	22
3	Skjematisk oversikt over hvilke tunneler som sammenlignes med begrunnelse	36

Formelliste

3.1 Tverrsnittsstørrelse	37
------------------------------------	----

1 Innledning

I innledningen presenteres bakgrunnen for oppgaven, og det gis en forklaring på hvorfor muligheten for reduksjon av tverrsnittsstørrelsen til jernbanetunneler er interessant å undersøke. Videre presenteres oppgavens forskningsspørsmål, som forsøksvis besvares i prosjektet, og overordnet fremgangsmetode for å besvare disse.

1.1 Bakgrunn

Nasjonal transportplan (NTP) for 2018-2029 presenterer en historisk satsning på jernbane. Dette trekkes frem som et konkurransedyktig, attraktivt og effektivt transportmiddel som bør styrkes, spesielt i arbeidet med å redusere miljøbelastningen fra transportsektoren. Planen presenterer spesielt arbeidet med dobbeltspor og nye jernbanetunneler, for å redusere reisetid og logistikkutfordringer på jernbanenettet ([Meld St. 33 \(2016-2017\)](#)). Jernbanedirektoratet slår fast i sin strategi for forskning og utvikling at "...vi skal sørge for at jernbanesektoren drives mest mulig effektivt, sikkert og miljøvennlig til beste for de reisende, godstransport og samfunnet", og legge til rette for utvikling i sektoren ([Jernbanedirektoratet 2019](#)). Mer kunnskap knyttet til NTP sitt satsningsområde jernbanetunneler vil bidra i utviklingen av sektoren, i henhold til Jernbanedirektoratet sin strategi for forskning og utvikling, og denne masteroppgaven kan bidra i arbeidet.

Jernbanen har gjennomgått en revolusjon siden de første togene begynte å kjøre på skinner. Med denne utviklingen har også tunnelprofilene for jernbane gjennomgått geometriske endringer gjennom årene. Dette for å møte de nye kravene knyttet til elektrifisering, større hastighet, større lastprofiler og større sikkerhetsfokus. Som følge av de geometriske endringene har tunnelenes normalprofil hatt en økning. Normalprofilen er den profilen som skal holdes fritt for faste gjenstander unntatt spor, signal og kontaktledningsanlegg, i tillegg til å være av tilstrekkelig størrelse til å ivareta gitte komfort- og sikkerhetskrav ([Bane Nor 2020e](#)).

I 1914 var normalprofilen for enkeltsporstunnel 27 m^2 , med en gradvis økning mot slutten av 1990-tallet, da den var $43,3 \text{ m}^2$ ([Bane Nor 2020e](#)). Til sammenligning er dagens normalprofil for høyhastighetstog presentert i Teknisk regelverk skjematisk, og beregnet til å være $53,9 \text{ m}^2$ i en enkeltsporstunnel ([Bane Nor 2020l](#)). Dette

viser en økning av normalprofilen gjennom tiden, og følgelig også tverrsnittsstørrelsen på tunnelen, da normalprofilen er innlemmet i dette tverrsnittet. Eksempel på nye jernbanetunneler under planlegging vises i Teknisk designbasis for Intercity. Her presenteres en normalprofil på 59 m^2 (Bane Nor 2020h) for enkeltspor, som er større enn den beregnede størrelsen til normalprofilen for denne tunneltypen gitt i Teknisk regelverk. Størrelsesavviket synes å komme fra mer avsatt plass til faste installasjoner for Intercity prosjektet.

Teknisk regelverk (Bane Nor 2021f), Teknisk designbasis for Intercity (Bane Nor 2020h), samt andre saksdokumenter fra Bane Nor, som omhandler tematikken tunneltverrsnitt, tydeliggjør i liten grad forutsetninger og beregningsgrunnlag for enkelte aspekter ved tunneltverrsnittsdimensjoneringen. Eksempel på dette vises blant annet gjennom saksdokumentet Risikovurderingsrapport - Endring av den dynamiske refejansprofilen for rullende materiell på JBVs sporanlegg (Jernbaneverket 2016), et saksdokument som beskriver endring i konturen for det minste tverrsnittet, hvor beregningsgrunnlaget ikke er tilgjengelig. Et annet eksempel vises i saksdokumentet (Bane Nor 2018) som viser detaljplan og teknisk plan for tunnelkonsept for nye Ringeriksbanen. Dimensjoneringsgrunnlaget er her utydelig med henvisning til Teknisk designbasis for Intercity (Bane Nor 2020h). Videre diskuterer saksdokument (Bane Nor 2020c) fra samme prosjekt muligheten for redusert tverrsnitt. Undersøkelser om tverrsnittsreduksjon utdypes i (Bane Nor 2020c), som ser på tverrsnittsreduksjon som følge av aerodynamikk i tunnelen. Her kommer det frem at det dimensjonerte tverrsnittet er større enn det som er nødvendig for å ivareta tilfredsstillende aerodynamiske betingelser.

Den store forskjellen mellom dagens normalprofil og nye foreslåtte normalprofiler, ligger i uklårheter i beregningsgrunnlaget for enkelte aspekter ved tunneltverrsnitts dimensjonering og saksdokument som peker i retning av mulighet til å redusere allerede dimensjonerte tunneltverrsnitt. Dette peker i retning av at det er et behov for å undersøke hvor store tunneltverrsnittene behøver å være, ved å se på muligheten for å redusere dagens tunneltverrsnitt og videre finne den optimale tverrsnittsstørrelsen.

1.2 Forsknings spørsmål

Prosjektering av jernbaneanlegg i Norge gjennomføres i henhold til kravene, bestemmelsene og normene innenfor de ulike jernbanetekniske fagområdene gitt i Teknisk regelverk (Bane Nor 2021f) med tilhørende prosjekteringsveileder (Bane Nor 2020b). Prosjekteringen må også oppfylle kravene til samtrafikkevne (interoperabilitet) fra samtrafikkforskriften (Samtrafikkforskriften 2010) som reguleres

gjennom teknisk spesifisering for interoperabilitet (TSI). Ved prosjektering skal jernbaneanlegg oppfylle relevante TSI krav som implementeres gjennom samsvars-lister i Teknisk regelverk ([Bane Nor 2020a](#)). Jernbaneprosjektering fremstår som en krevende prosess gjennom at det følger et omfattende rammeverk og lovverk med flere fagområder involvert i planleggingen. Dette vises også gjennom variasjon i de tekniske spesifiseringene for ulike prosjekter, og flere runder med revisjoner av prosjektene. Det finnes begrenset litteratur om hvordan jernbaneprosjektering foregår i praksis, og samtidig fremstår det som om mye av prosessen baserer seg på erfaring og samarbeid mellom de ulike fagområdene ([Høifors 2012](#)).

- I hvilken grad er dagens prosjekteringsmetode egnet for optimalisering av tunneltverrsnittet?

I oppgaven vil prosjekterte tverrsnitt for nyere prosjekter hentet fra litteraturen sammenlignes med tegningsgrunnlaget og målinger gjort av eksisterende tunneler. Formålet med dette er for å undersøke mulighetene for å redusere tverrsnittene, gjennom å optimalisere plassbruken i tverrsnittene. Tunnelene modelleres ved bruk av programvaren Autocad, hvor det gjøres et arbeid med å optimalisere plassbruken i tverrsnittene begrenset av jernbane- og anleggstekniske krav og forutsetninger.

- Hvilke tiltak kan potensielt gjøres i utformingen av tunneltverrsnittet for å redusere tunneltverrsnittsstørrelsen?

Fra litteraturen kommer det frem at materialbruk og massetransport fra tunnelprosjekt fremstår som de største utfordringene når det kommer til klimagassutslipp og kostnadskontroll. Fra Follobaneprosjektet sitt miljøbudsjett kom det frem at materialer (betong, stål og sprengstoff) til tunnelens hovedløp utgjorde 50% av det totale klimagassutslippet for prosjektet, mens massetransport utgjorde 10% ([Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk 2014](#)). Det er gjort et betydelig arbeid for å redusere materialbruken på tunnelprosjekter; gjennom prosjekter som Kortreist Stein ([SINTEF 2016](#)) og arbeid med reduksjon av sprøytebetongmengden ved å lage slankere konstruksjoner ([SINTEF 2018](#)), samt annet arbeid knyttet til optimalisering av massetransport. Det viktige arbeidet innenfor reduksjon av materialbruk henger også nøye sammen med kostnadskontroll. Materialbruken og mengden av masser for massetransport generert på prosjektene, henger sammen med arbeidsmengden, som igjen henger sammen med tidsforbruket. Alle disse faktorene er kostnadsdrivere for tunnelprosjekt ([Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk 2014](#)).

I prosjektet er det blitt utviklet en forenklet beregningsmodell for CO_2 -utslipp og kostnader, samt for kostnadene knyttet til drivingen av tunneler, med tunneltverr-

snitt som inngangsparameter.

- Hvordan vil en reduksjon av tverrsnittsstørrelsen til jernbanetunneler påvirke drivekostnadene til tunnelprosjekter, samt kostnader og miljøavtrykket til tunnelene knyttet til utslippene av CO_2 ?

1.3 Omfang og avgrensninger

Masteroppgaven utgjør 30 studiepoeng og gjennomføres i et tidsrom på 20 uker. Dette legger føringer for hvor omfattende prosjektet kan være. Dette delkapitlet gjør rede for masteroppgavens omfang og hvilke avgrensninger som er lagt til grunn under arbeidet.

Hovedmålet med oppgaven er å undersøke om det finnes muligheter for å redusere tverrsnittsstørrelsen til jernbanetunneler, og samtidig øke forståelsen for temaet jernbanetunneler generelt. Det er lagt til grunn for oppgaven en forenklet antagelse/forutsetning om at den horisontale lengden i tunnelen er det området av tunneltverrsnittet som er mest regulerbart (hvor det er mest 'løsning' med plassen). Det er derfor også den horisontale lengden av tverrsnittet som forsøkes å reduseres i denne oppgaven for å redusere det totale tverrsnittet. Med en tilhørende forenklet geometri av det totale tverrsnittet som bare er avhengig av den horisontale lengden. Problemstillinger knyttet til den vertikale høyden og geometrien til tunneltverrsnitt er i noe grad belyst og diskutert i oppgaven, men dette er ikke hovedmålet. Oppgaven begrenses til å se på hvordan de anleggstekniske og jernbanetekniske aspektene ved jernbanetunneler påvirker tverrsnittsstørrelsen til jernbanetunneler. Fagområder som geologi, elektro, signal og underbygning er i liten grad belyst i oppgaven. Forskningen som er gjennomført er induktiv og fortolkende, og begrenses til å vurdere jernbanetunneler tilknyttet det norske jernbanenettet som følger norske prosjekteringsstandarder- og regler.

For å begrense omfanget av oppgaven ble det også foretatt flere avgrensninger og forenklinger knyttet til beregningsmodellen brukt i oppgaven. Formålet og nøyaktigheten til modellen ble begrenset til å kunne brukes for å si noe om størrelsesordenen til drivekostnader, samt kostnader og utslipp knyttet til CO_2 . Beregningsmodellen ble begrenset til å gjelde for enkeltsporstunneler. Bakgrunnen for dette er at 94% av Norges jernbanetunneler har enkeltsporstunneler som tunnelkonsept ([Tuchschnid et al. 2011](#)). Videre ble det valgt å begrense modellen til å gjelde for konvensjonell driving med boring og sprengning, da 95% av tunnelene i Norge er under 2 km som generelt impliserer konvensjonell drift som den mest kostnads- og tidseffektive metoden ([Nowiki 2021](#)), ([Bane Nor 2021a](#)). Modellen ble videre begrenset til å kun inkludere tradisjonelle vann- og frostsikringsmetoder, med

kontaktstøpt betonghvelv med membran og hvelv av betongelementer([Bane Nor 2020k](#)). Det ble også gjort forenklinger knyttet til beregningen av det geometriske tverrsnittprofilen.

Videre er oppgaven begrenset av kandidatens tilgang til relevant litteratur og rapporter knyttet til temaet. Oppgaven er basert på og avgrenset av den informasjonen som har vært åpent tilgjengelig for allmenheten, i tillegg til interne dokumenter kandidaten har fått fra Bane NOR.

2 Litteraturstudie

Arbeidet med litteraturstudiet ble startet i forprosjektet og videreført i masterarbeidet. Formålet med litteraturstudiet var å tilegne seg kunnskap knyttet til tema, oppnå en oversikt over forskningsfeltet og avdekke eventuelle kunnskapshull knyttet til problemstillingen. Et innledende litteraturstudie bidrar også i utformingen av metoden til forskningsarbeidet, gjennom muligheten til å hente inspirasjon og erfaringer knyttet til lignende arbeid innenfor fagfeltet.

Det ble gjennomført systematiske søk i de akademiske databasene; Oria, Compendex og Scopus, og det ble gjennomført en kildeanalyse av potensielt relevante treff. Ytterligere relevant litteratur ble gjort tilgjengelig av veiledere og bidragsytere. Bane Nor har vært en betydningsfull bidragsyter hvor store deler av litteraturen har sin opprinnelse. Dette er naturlig på grunn av oppgaven sin natur knyttet til jernbane og Bane Nor sin rolle som baneinfrastruktur eier. Men det påpekes at stor overvekt av bruken av interne kilder kan føre til en skjev representasjon av forskningsfeltet, som er en begrensning for arbeidet.

Litteraturstudiet avdekket begrenset mengde tilgjengelig litteratur direkte knyttet til problemstillingen. Dette peker i retning av at forskning på dette området med masteroppgavens vinkling og valgte metode ikke foreligger per dags dato. Det påpekes at masteroppgaven i høyeste grad er tverrfaglig, noe som skapt utfordringer med å hente relevant litteratur fra forskjellige fagfelt og samle trådene.

2.1 Dimensjonering

Dimensjonering av jernbaneanlegg har Teknisk regelverk ([Bane Nor 2021d](#)) som forutsetning. Den grunnleggende oppgaven i dimensjoneringen er å sørge for tilstrekkelig plass og gunstig plassering for de ulike komponentene på jernbaneanlegget for å sikre trygge og effektive operasjoner både innen drift og vedlikehold av linjen ([Bane Nor 2020b](#)).

For jernbanetunneler er problemstillingen knyttet til tilstrekkelig plassbehov for komponenter; særlig aktuell på grunn av den faste avgrensningen på området tilgjengelig for komponenter gitt av tunnelprofilet. For å håndtere denne utfordringen legger Teknisk regelverk føringer for størrelsen til det teoretiske tunneltverrsnittet. Størrelsen på tverrsnittet er avhengig av en rekke parametere og plassbe-

hovet til ulike komponenter som ligger innenfor det teoretiske tunneltverrsnittet. Disse parameterne og komponentene følger med tilhørende regler og krav i regelverket ([Bane Nor 2021d](#)). Noen av parameterne og komponentene som legger føringer for tunneltverrsnittsstørrelsen er følgende;

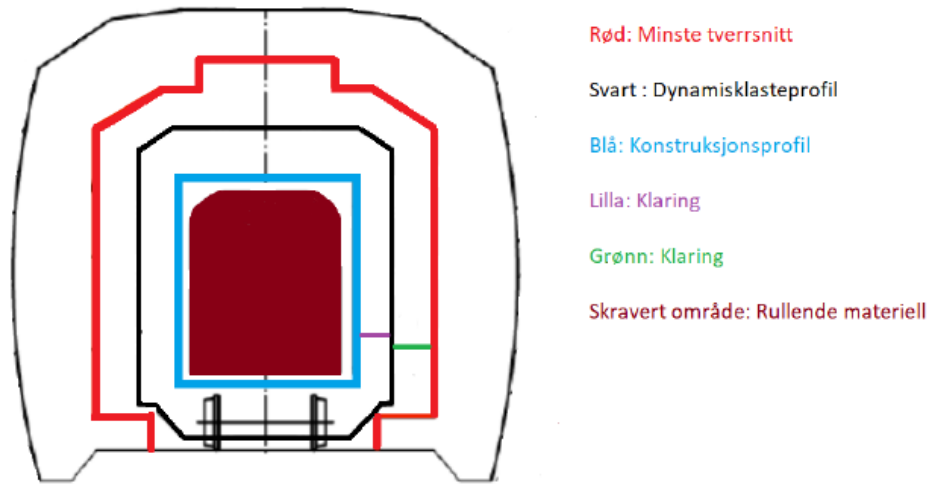
- funksjonskrav til tunnelen; fart, antall spor, linjegeometri m.m.
- konturen (lastprofil) til de ulike togene som skal okkupere linjen, og følgelig minste tverrsnitt
- tunnelens normalprofil
- drivemetode som legger føringer for valgt løsning for stabilitets-, vann- og frostsikring utenfor normalprofil
- valgte tekniske løsninger knyttet til overbygning, underbygning, de elektriske systemene, drenering, kontaktledningsanlegg m.m.
- dimensjonering i henhold til aerodynamikk

For at dimensjoneringsmetoden skal være så entydig som mulig, presenterer Teknisk regelverk forskjellige målsatte profil relatert til tunneltverrsnittet, som oppfyller kravene for forskjellige parametere og komponenter. Eksempel på disse profilene er tunnelens normalprofil, minste tverrsnitt, lastprofiler og tverrsnittsprofil E for strømvaktaker og kontaktledningsanlegg ([Bane Nor 2020l](#)). Teknisk regelverk presenterer også forskjellige illustrasjoner av tunnelprofil med definerte områder designert til ulike formål ([Bane Nor 2020l](#)), predefinerte løsninger for stabilitet-, vann- og frostsikring for ulike profiler ([Bane Nor 2020k](#)) samt veileder for sikringsarbeidet ([Bane Nor 2020i](#)).

2.2 Gauging-metoder

Gauging er det engelske begrepet på metodikken som skal sørge for at togvogner på linjen kan passere gjennom infrastrukturen og ved siden av hverandre uten kollisjon ([Iwniki 2006](#)). Metoden bestemmer størrelsen på frie tverrsnittsområder under bestemte forutsetninger for en strekning, og kan brukes både for åpne linjer og linjer i tunnel. Ulike tverrsnittsområder (konturer) designert til ulike formål i linjetverrsnittet bestemmes ([Anderson et al. 2014](#)), som sikrer tillatt og nødvendig plass for komponenter på strekningen, og gir garanti for at kollisjon mellom ulike komponenter ikke vil skje ([Løhren 2019](#)). Ved å sammenligne plassering og størrelse på konturene i linjetverrsnittet, vil det være klart hvor stort ulike frie tverrsnitt for linjen må være ([Anderson et al. 2014](#)).

Figur 2 konstruert med utgangspunkt i figur fra ([Løhren 2019](#)) illustrerer forskjellige konturer innenfor en tunnelinfrastruktur. Det skraverte området illustrerer det rullende materiellet som må holdes innenfor konstruksjonsprofilen. Konstruksjonsprofilen tar hensyn til det rullende materiellet sitt statiske plassbehov, samt tar hen-



Figur 2: Konturer innenfor tunnelinfrastruktur
(Løhren 2019)

syn til enkelte av togets dynamiske plassbehov, ved å ta hensyn til forskjellige lasttilfeller, dempningsystemets forskyvning av det rullende materiellet og begrensninger for kurveoverslag (Løhren 2019). Den dynamiske lastprofilen tar hensyn til alle dynamiske bevegelser til toget, og ligger innenfor det minste tverrsnittet. Denne konturen inkluderer toleranser og bevegelser til toget under vanlig drift. Den inkluderer også konturutvidelser i kurver, avvik for å ta hensyn til at toget svaier, overhøyde og toleranse for slitasje og kurveoverslag. Det minste tverrsnittet er den største konturen som skal være fri for alt hinder og sikre fri bevegelse for toget (Anderson et al. 2014). Mellom konstruksjonsprofilen og den dynamiske lastprofilen, og mellom den dynamiske lastprofilen og minste tverrsnitt, er det klaringer som representerer at den utenforliggende konturen tar inn flere betingelser som gir ytterligere plassbehov. Det ønskes altså å maksimere størrelsen på konstruksjonsprofilen, som tar hånd om det rullende materiellet, mens man ønsker et minimum størrelse på minste tverrsnitt som tar hånd om infrastrukturen, med en klaring mellom profilene for å tillate ukjente parametere eller parametere som var kjent, men ikke inkludert i konturen (Iwniki 2006).

Det finnes flere forskjellige gaugingmetoder som kommer med forskjellige regler, prosedyrer og standarder. Disse angir hvordan konturene bestemmes, hvilke

antagelser som legges til grunn, funksjonen til konturene og hvilke komponenter og togbevegelser som er tillatt innenfor konturene. De varierende antagelsene for de ulike metodene fører til ulik bruk av sikkerhetsmarginer mellom lastprofilen og minste tverrsnitt. Dette gjør at noen av metodene er mer konservative enn andre ([Anderson et al. 2014](#)).

Det har vært en betydelig utvikling de siste årene med bedre gauging-metoder, som har redusert metodenes konservativisme ved å bedre predikere togets dynamiske oppførsel og tillatte konturer med mindre toleranser og klaring ([Johnson 2007](#)). Togets bevegelse er parameteren som i størst grad er bestemmende for dimensjoneringen av de viktigste konturene ([Anderson et al. 2014](#)). Ved å bruke togets dynamiske bevegelse har man fått utnytte ekstra plass i den dynamiske konturen, som tidligere var dårlig utnyttet av statiske/faste konturer ([Johnson 2007](#)). Dette har også ført til muligheten for å ha større gods på linjene. De viktigste konturene er minste tverrsnitt og konstruksjonsprofilen, fordi de representerer samarbeidet mellom togkonstruktør og infrastrukturkonstruktør, og illustrerer hvilke konturer de forskjellige ansvarsområdene må holde seg innenfor ([Anderson et al. 2014](#)).

Den enkleste og mest konservative gauging-metoden er statisk gauging, også referert til i litteraturen som enkel gauging. Denne metoden baserer seg på at togkonstruktør bygger tog til et maksimalt konstruksjonsprofil, mens infrastrukturkonstruktør sørger for at infrastrukturen holder seg utenfor det minste tverrsnittet. Klaringen mellom minste tverrsnitt og konstruksjonsprofilen tar høyde for variasjon i sporposisjon og togbevegelse ([Iwniki 2006](#)). Konstruksjonsprofilen til toget ble dimensjonert etter et referansetog sitt statiske lastprofil, og ville være fri fra alle andre komponenter når toget står i ro. I tillegg legges det til ekstra marginer (utvidelser av konturen) for å ta hensyn til maksimal lateral og vertikal forskyvning av lastprofilen, som følge av kurveorverslag. Disse ekstra marginene ble beregnet ut fra geometriske formler, og baserer seg på enkle antagelser som gir de verste tilfellene for forskyvning av lastprofilen ([Anderson et al. 2014](#)). Dette betyr at metoden baserer seg på maksimal dynamisk bevegelse i beregningene av klaring, noe som sjeldent er tilfelle ([Johnson 2007](#)).

Kinematisk gauging er en annen metode som er noe mindre konservativ. Den ble utviklet som en videreføring av statisk gauging, hvor det ble forsøkt å ta høyde for geometrien til linjen og togbevegelsene. Det viste seg at med endring i geometrien på banen brukte toget også mer plass. I tillegg til utviklingen av det rullende materiellet, med bedre dempningssystemer, viste det seg at de eksisterende statiske gaugene ikke var tilstrekkelig, da det ga høyere kinematisk bevegelse (bevegelse

assosiert med farten til togene). Det ble funnet at hvis man relaterte den kinematiske bevegelsen til operasjonsmiljøet, kunne størrelsen på den lokale utvidelsen i infrastrukturen bli minimert (Iwniki 2006). Metoden baserer seg på bestemmelsen av en referansekontur for maksimal konstruksjonsprofil, som inkluderer alle togbevegelser som er lik for alle linjer. Ytterligere bevegelser som vil variere, for eksempel på grunn av variasjon i tillatt overhøyde, ivaretas gjennom regler for utvidelser for konturen ved spesielle bevegelser. Også disse bevegelsene bestemmes gjennom geometriske formler. Denne metoden gir en noe mer presis betraktning av togbevegelser, da den tar hensyn til varierende bevegelser på forskjellige linjer og en praktisk metode hvor referansekonturen er felles for alle linjer (Anderson et al. 2014).

Den siste og mest korrekte gauging-metoden, som gir en lastprofil nærmest minste tverrsnitt, er dynamisk gauging. Denne metoden er en utvikling av de foregående metodene i tråd med utviklingen innen datateknologi, som skapte avanserte dataprogrammer designet for gauging og programmer for simulering av togets dynamiske bevegelse. Disse programmene gjorde det mulig å gjennomføre millioner av beregninger for dynamisk bevegelse på kort tid, og gjorde at de enkle antagelsene for togbevegelse, gjort for å muliggjøre manuell kalkulasjon, kunne erstattes med presise modeller i beregningene (Iwniki 2006). Ved dynamisk gauging inkluderes alle toleranser og bevegelser til toget under vanlig drift. Den inkluderer utvidelser av kontur på grunn av kurveoverslag og utvidelser i kurver, avvik for å ta hensyn til at toget svaier, overhøyde og toleransje for slitasje (Anderson et al. 2014). Den dynamiske togbevegelsen bestemmes gjennom simuleringer og statistisk analyse for forskjellige parametere knyttet til toget og linjen. Prosessen går ut på at man henter spordata fra sporet toget skal kjøre på, før man kjører toget på linjen med variasjon i dempningen på toget, for flere forskjellige situasjoner med ulik overhøyde, overflødig høyde og fart. Dette resulterer i forskjellige tabeller for togets bevegelse i horisontal, lateral og vertikal retning, og kurvebevegelse kan beregnes. Videre er det statistiske beregninger som danner grunnlaget for forholdet mellom spordataene og den dynamiske bevegelsen til toget. Generelt gir lavere fart høyere dynamisk bevegelse, og den resulterende bevegelsen for hver kombinasjon av overhøyde og fart summeres statistisk som gjennomsnitt og standardavvik av lateral, vertikal og rullebevegelse, hvor 95% sikkerhetsmargin brukes. (Iwniki 2006) Når man har sammenlignet alle konturene, gjelder den som ligger tettest opp mot det minste tverrsnittet som er gjeldende for lastprofilet. Videre i analysen kan man også bruke sannsynlighetsfordelinger for å anslå hvor sannsynlig det er at en av de mest ekstreme bevegelsene vil inntreffe, og dermed neglisjere disse bevegelsene.

Utviklingen innenfor teknologi til bruk i gauging-metoder har ført til at toleranser, klaringer og andre ukjente har blitt både definert på en mer tilstrekkelig måte, og også blitt beregnet med større nøyaktighet. Dette har ført til at man har mindre klaringer for de mindre gjenværende ukjente eller ikke kalkulerbare effektene. Etter hvert som flere ukjente effekter blir undersøkt og forstått, vil de etter hvert forsvinne fra klaring og gå over til å bli kalkulert som en toleranse. Gauging-metoder vil bli mindre og mindre konservative i denne prosessen.

Toleranse og klaring er forskjellige ting. Hvor toleranser ser på usikkerhet knyttet til posisjonen til infrastrukturen gjennom livsløpet til strukturen, handler klaring om risiko. Klaringen skal stå for den trygge avstanden mellom konturene til infrastrukturen og toget. Vanlige toleranser idag er linjeføringsfeil på sporet, hvor det kan skje bevegelse i sporet over vedlikeholdsperioden. Vertikal spor posisjons toleranse handler om sporets degradering som følge av setninger og sideveis nivåavvik, og handler om differensielle setninger eller målefeil. Man kan også ha side slitasje på sporet som man trenger toleranse for.

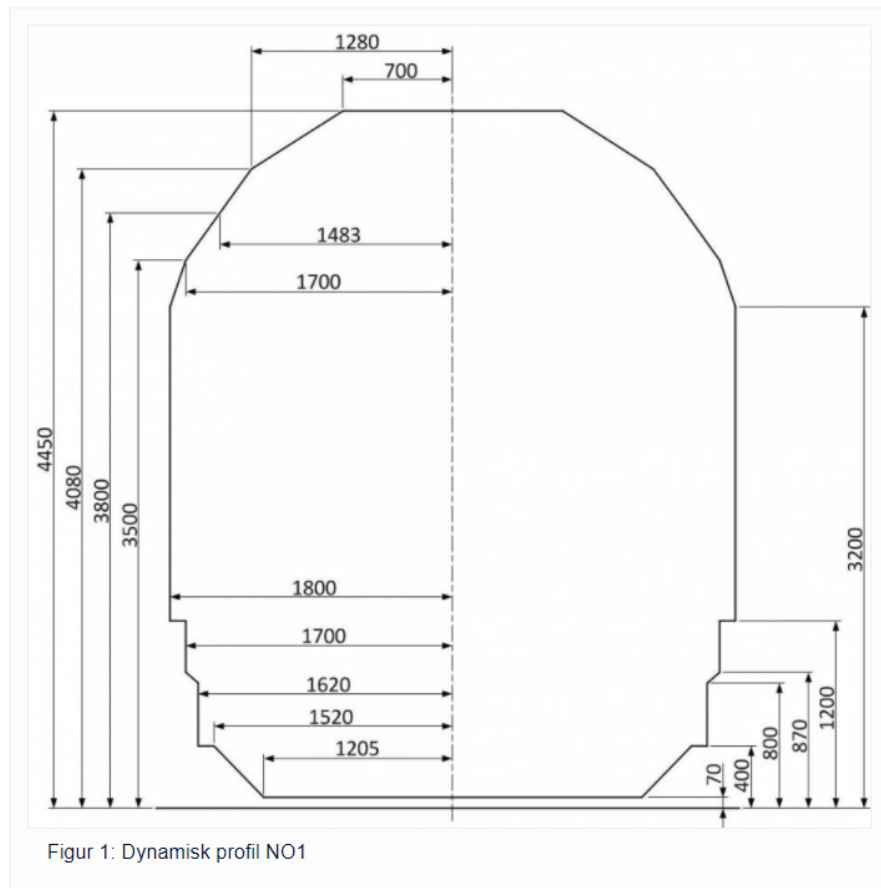
2.3 Tverrsnittsbehov

Infrastrukturen på dagens jernbanelinjer i Norge er prosjektert gjennom bruk av ulike gauging-metoder i tråd med at infrastrukturen og det rullende materiellet er av varierende alder ([Bane Nor 2020d](#)). Det har skjedd mye utvikling på området, hvor hovedtrender har vært større konstruksjonsprofiler og mindre plass til infrastruktur på linjene, for å optimalisere plassbruken ([Iwniki 2006](#)). Dette gjør at man har ulike konturer å forholde seg til på det norske jernbanenettet.

2.3.1 Profiler og lasttilfeller

Fremføringsmuligheten for ulike rullende materiell med hensyn på materiellet sin høyde og bredde med og uten last på en banestrekning, uttrykkes gjennom bruk av profiler (konturer) med tilhørende lasttilfeller. Da ulike tog er bygget geometrisk forskjellig, med ulike lastprofiler og lasttilfeller betyr det at man må forholde seg til ulike profiler på en banestrekning. Fremføring av lastvogner (tømmertog, lasttog og industritog) må ikke overskride det maksimale profilet for strekningen. Standard vogner for kombinerttransport lastet standardisert må som eksempel følge combi transport profile number C/P. Dette forutsetter også at de enklete profilene og lasttilfellene bare er gyldige for fremføringen av vogner som tilfredsstillende tekniske forutsetninger, som vognlengde, høyde, akselavstand, overheng og forutsetninger om sporets beliggenhet med mer ([Bane Nor 2021h](#)). Disse er gitt i Network Statement ([Bane Nor 2020g](#)).

For det norske jernbanenettet brukes det i dag i hovedsak profilene dynamisk refe-



Figur 3: Dynamisk lasteprofil NO1
(Bane Nor 2020l)

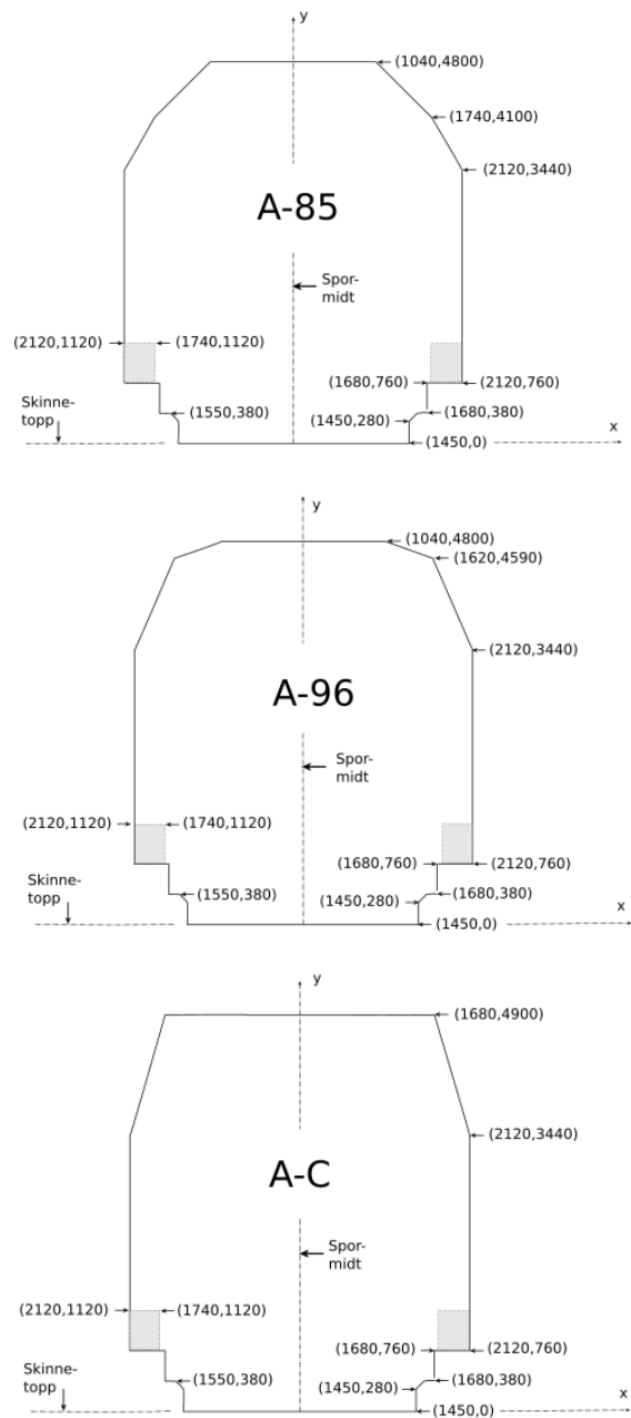
ransekontur NO1, som gjelder samtlige banestrekninger med ordinær togtransport som oppfyller tekniske spesifikasjoner fra Network statement (Bane Nor 2020g). Multipurpose vognprofil (vognprofil for kombinerttransport) og combi transport profil er statiske profiler og gjelder for enkelte banestrekninger. Figur 3 viser konturen for det dynamiske lasteprofilet NO1.

2.3.2 Minste tverrsnitt

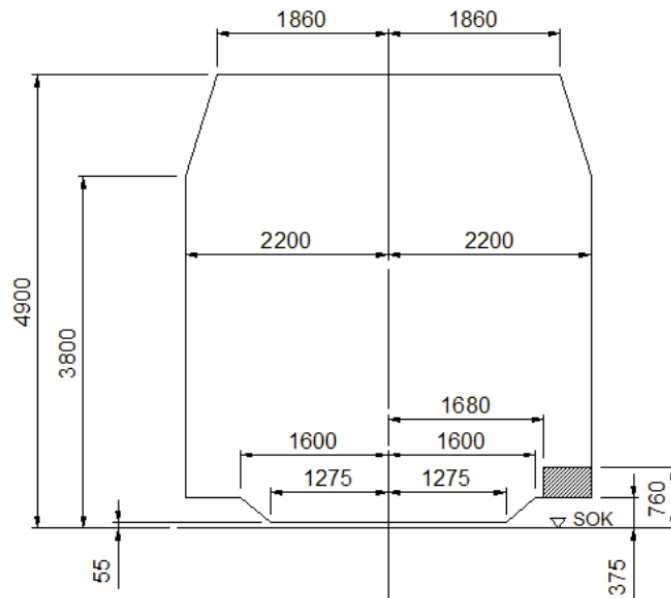
Ulike banestrekninger har blitt bygget på ulike tidspunkt, og har følgelig blitt bygget med ulike lastprofiler og lasttilfeller tiltenkt banene på byggetidspunktet. Dette har ført til at man opererer med en rekke forskjellige minste tverrsnitt, med en rekke ulike lasttilfeller for eksisterende baner. Ved fornyelse av regelverk i 1993 ble det bestemt at man for eksisterende baner kun skulle operere med ett tverrsnitt

A-85 som følgelig måtte være tilpasset alle de ulike lastprofilene og lasttilfellene for togene som skal okkupere de eksisterende linjene. Senere har ytterligere to nye minste tverrsnitt blitt innført for eksisterende bane; A96 og A-C ([Bane Nor 2020l](#)).

Figur 4 viser en sammenligning mellom de ulike konturene for minste tverrsnitt på eksisterende linjer. Tverrsnitt A-96 sammenfaller med A-85 opp til høyden hvor profilet har en innsnevring, hvor profil A-96 er noe bredere for å tilfredsstille togføringen av kombinert transport (konteinere og semihengere). Videre er tverrsnitt A-C utformet med annen innsnevring, for å kunne fremføre materiell med betingelser for nye bane tverrsnitt på eksisterende bane ([Bane Nor 2020l](#)). Figur 5 illustrerer det norske minste tverrsnitt for nye baner. Dette tverrsnittet er basert på et tverrsnitt utviklet av UIC - International Union of Railways, kalt UIC GC, og vil sammenfalle med flere europeiske land sine minste tverrsnitt ([Bane Nor 2020d](#)). Tverrsnittet er av den størrelse at det vil inkludere tidligere diskuterte minste tverrsnitt for eksisterende bane, og fører til større fleksibilitet knyttet til ulike togtyper for nyere baner. Ved å sammenligne figur 5 med figur 3 ser man at disse har en klaring (horisontal forskjell i avstanden fra senterlinjen på 400 mm på hver side. Dette er ifølge Nemanja Kocick ([Nemanja Kocic 2020](#)) for å ta hensyn til at også andre lastprofiler enn NO1 eller kjøretøy som behandles som spesialtransport, skal kunne okkupere linjen. Klaringen mellom det dynamiske lasteprofilet og det minste tverrsnittet ivaretar sikkerhet for togfremføring om uforutsette hendelser på kjøretøyet i det minste tverrsnittet eller utenfor minste tverrsnitt skulle oppstå. Akkurat bestemmelsen av klaringen, og dermed dimensjonen av det minste tverrsnittet, har historiske grunner (slik at alle togene skulle få plass), og er ikke mulig å finne tilbake til.



Figur 4: Sammenligning av de ulike minste tverrsnittene for eksisterende baner (Bane Nor 2020l)

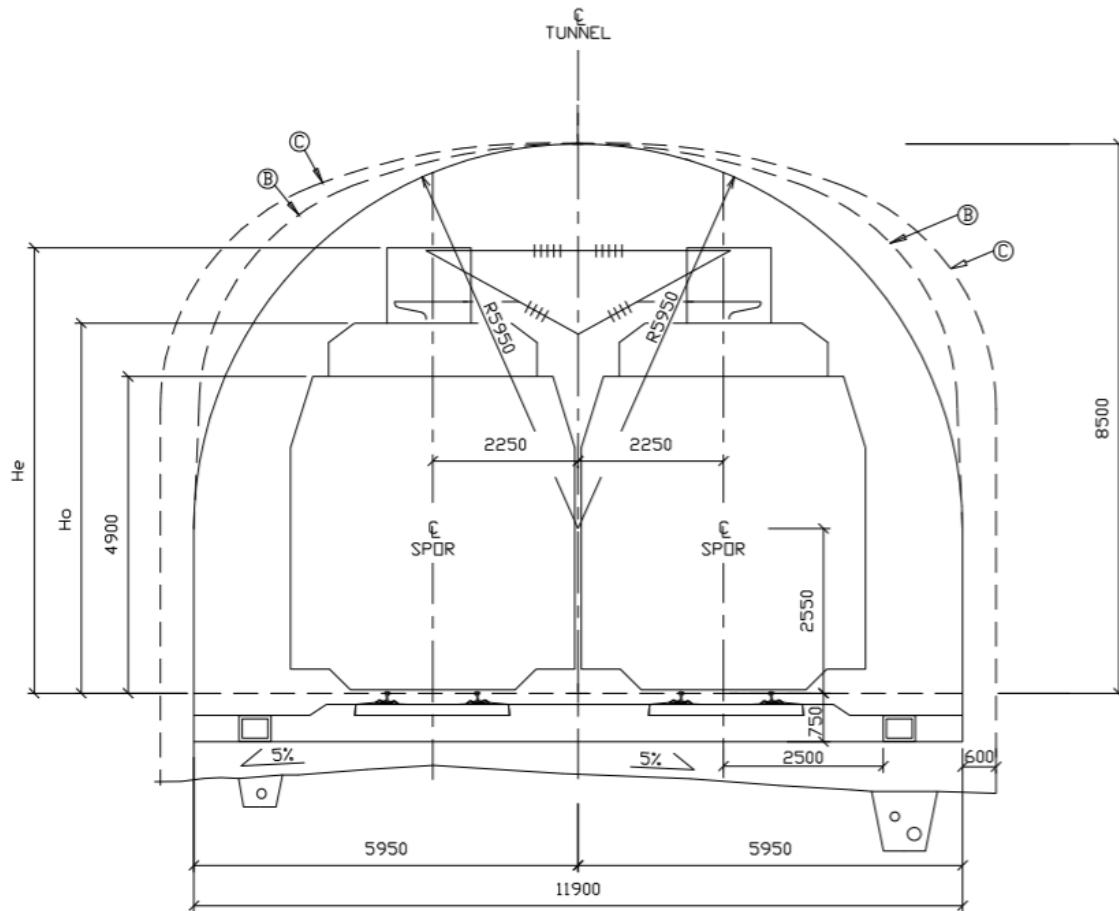


Figur 5: Minste tverrsnitt nye baner
(Bane Nor 2020l)

2.3.3 Normalprofilet

Normalprofilet ble definert i innledningen til å være den profilet (tverrsnittet) som skal holdes fritt for faste gjenstander unntatt spor, signal og kontaktledningsanlegg, i tillegg til å være av tilstrekkelig størrelse til å ivareta gitte komfort- og sikkerhetskrav (Bane Nor 2020e). Ivaretagelse av komfort- og sikkerhetskrav inkluderer behovet for flere faste installasjoner, som blir videre diskutert i litteraturstudiet, i tillegg til behovet for tilstrekkelig luftareal i tverrsnittet, og potensielle utvidelser av tverrsnittet for å blant annet ivareta aerodynamiske betingelser.

Normalprofilet kan ansees som det nødvendige tunneltverrsnittet for å få plass til alle komponentene i tunneltverrsnittet, med hensiktsmessig plassering og dimensjoner. Dette tverrsnittet er spesielt viktig knyttet til anleggsteknikk, fordi normalprofilet dikterer utenforliggende profiler som teoretisk sprengprofil/borprofil, som igjen er avhengig av drivemetode, sikringsmetode og vann- og frostsikringsmetode. Området utenfor normalprofilet må også være dimensjonert til å innlemme kabelkanaler og sporoppbygning, da normalprofilet regnes fra skinnetopp av laveste skinne (Bane Nor 2020e). Figur 6 illustrerer normalprofilet til en dobbeltsporet



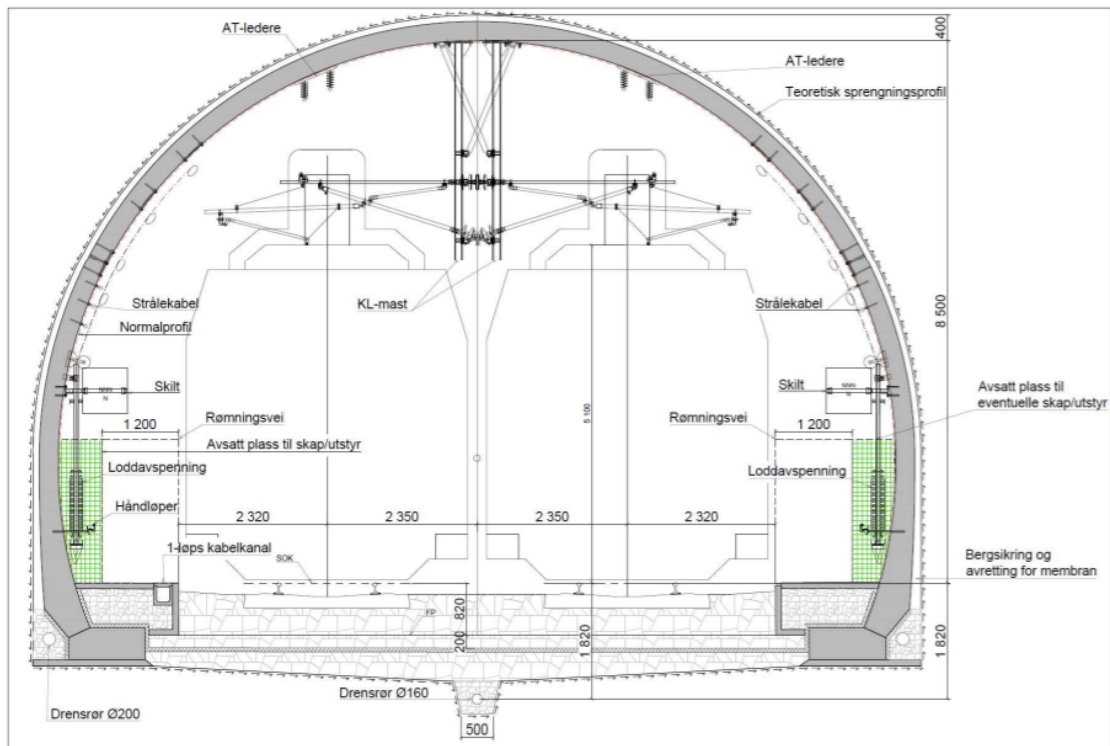
Figur 6: Normalprofil dobbeltspørtunnel
(Bane Nor 2020m)

jernbanetunnel. Her er det også markert normalprofiler for nisjer til kontaktledningsanlegget (linje B og C) (Bane Nor 2020m).

2.3.4 Tekniske installasjoner

Hvor de foregående delkapitlene har diskutert dimensjoneringsmetoder og profiler relatert til materiellets bevegelse og fremføringsevne, skal dette delkapittelet diskutere plassbehov for andre faste installasjoner i tunneltverrsnittet.

Normalprofiler presentert i (Bane Nor 2020h), (Bane Nor 2018) og (Bane Nor 2020c) viser avsatte soner for tekniske installasjoner med varierende detaljerings-



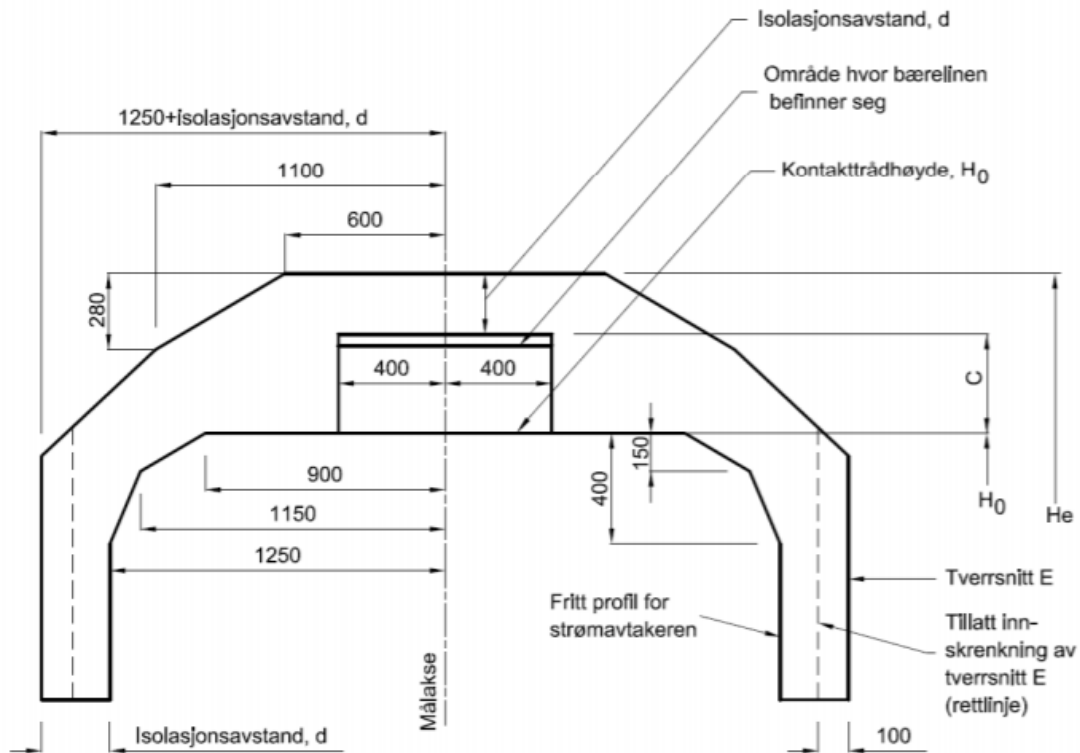
Figur 7: Normalprofil Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 dobbeltsporstunnel (Bane Nor 2018)

grad. Det er foreslått installasjonssoner, evakueringssoner og soner knyttet til signal- og kontaktledningsanlegget i tunneltverrsnittene. Sonenes plassering og størrelse varierer i sammenheng med tunnelenes kledningstype og tunnelprofil. Dimensjonene og plasseringen til sonene er forankret i behovet for effektiv og praktisk installasjon, drift og vedlikehold. Et eksempel fra Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 vises i figur 7, med viktige plassavgrensninger til komponenter som rømningsveg, skilt, loddavspenning, håndløper, avsatt plass til skap/utstyr, kabelkanal og strålekabel definert innenfor normalprofilet. Eksempler på skap/utstyr som kan være aktuelt i tunneltverrsnittet er tekniske skap tilknyttet kontaktledningsanlegget/strømforsyningen, hvor man blant annet kan finne kontaktledningsbryter/jordingsbryter. Andre tekniske skap kan være tilknyttet kommunikasjonssystemet (GSM-R), nødutstyr eller manuell styring av signalanlegg og sporveksler.

Kontaktledningsanlegg

For elektrifiserte linjer oppstår det plassbehov i tunnelens heng for kontaktledningsanlegg og materiellets strømvaktaker. Det reguleres gjennom to avhengige profiler: fritt profil for strømvaktaker og tverrsnitt E, som er illustrert i figur 8. Fritt profil for strømvaktaker er et dynamisk profil, som angir plassbehovet for fri fremføring av materiellets strømvaktaker. Tverrsnitt E er definert som tverrsnittet som kreves til fri passasje av strømvaktakeren og kontaktledningsanlegget (kontakttråd og bæreline). Fritt profil for strømvaktaker inngår i tverrsnitt E. Tverrsnitt E dimensjoneres slik at det er tilstrekkelig avstand mellom konturlinjene til tverrsnittet og de spenningsførende komponentene som inngår, for å ha tilstrekkelig isolasjonsavstand. Dette for å sikre at de spenningsførende komponentene ikke gjør skade på andre komponenter i tverrsnittet (Bane Nor 2020m). Eksempel på dette kan være at den avgitte varmen fra spenningsledere kan degradere betongen i tunnelens heng.

Teknisk regelverk har definert at tverrsnitt E ikke garanterer for at alle komponenter tilknyttet kontaktledningsanlegget får plass innenfor tverrsnittet. Det er ikke nødvendigvis plass til opphengskonstruksjoner og avspenningskonstruksjoner. På steder hvor tilgjengelig areal er begrenset, slik som i tunneler, skal det etableres nisjer for kontaktledningsanleggets opphengs- og avspenningskonstruksjoner. Nisjer skal også etableres for andre konstruksjoner tilknyttet kontaktledning/strømforsyning tilpasset det enkelte prosjekt (Bane Nor 2020m). Dette for å åpne opp for muligheten for optimalisering av det enkelte prosjekt i henhold til tunneltverrsnittet. Det er likevel for nyere prosjekt tatt høyde for plassbehov for opphengs- og avspenningskonstruksjoner innenfor normalprofilen, gjennom definering av plassbehov for blant annet loddavspenning i figur 7.



Figur 8: Fritt profil for strømvaktaker og tverrsnitt E for nye og eksisterende baner (Bane Nor 2021c)

Installasjoner underbygning

Som illustrert i figur 7 skal det avsettes plass i underbygningen til dreneringssystem og kabler. Dreneringssystemet er regulert i (Bane Nor 2021g), mens kanaler og kummer for elektro er regulert i (Bane Nor 2021c). Dreneringsløsningene er fleksible og mindre plasskrevende. Tunneler har generelt et tørrere miljø enn jernbanestrekninger i dagen, og derfor har vannsikringen og dreneringssystemet som funksjon å lede vannlekkasjer i tunnel frostsikkert ut av tunnelen. For dreneringssystemet er det kummene som er de mest plasskrevende. Kabelkanaler og kummer for elektro kan være plasskrevende avhengig av konfigurasjon og type kabler hvor det kreves skille mellom lavspent- og høyspent kabler.

Sikkerhetsinstallasjoner

Veileder for tunnelsikkerhet (Bane Nor 2020a) er utformet som en veileder for Teknisk spesifisering for interoperabilitet - sikkerhet i jernbanetunneler (TSI SRT).

Teknisk spesifisering for interoperabilitet er EU sitt felles regelverk for jernbane-fremføring, som Bane Nor er underlagt og Teknisk regelverk. (Bane Nor 2020a) legger føringer for tunnelberedskap, materialvalg, tekniske løsninger for strømfor-syning og teleinstallasjoner, samt evakueringsløsninger, og gir følgelig behov for ytterligere installasjon av komponenter og faste installasjoner i tunneltverrsnittet, for å ivareta sikkerheten.

For tunneler lengre enn 1 km er det krav til tilgang til sikre områder. For dob-beltsporede tunneler skal det minimum være en nødutgang per 1000 meter, og i enkeltsporede tunneler for hver 500 meter. Et sikkert område skal være dimensjo-nert med tilstrekkelig brannmotstand og kan være et annet tunnellop med tverrfor-bindelse eller utsiden av aktuell tunnel. For å kunne evakuere til et sikkert område kreves blant annet nødutstyr, nødkommunikasjon og rømningveier. Rømningveiene må ha tilstrekkelig belysning, skilting og legge til rette for effektiv evakuering med håndløpere, flatt underlag og tilstrekkelig plass for evakuering. I tabellene 1 og 2 vises en oversikt over funksjoner og noen aktuelle krav til en rekke komponenter i tunneltverrsnittet relatert til sikkerhet.

Tabell 1: Komponenter relatert til sikkerhet med funksjoner og krav

Komponenter	Funksjon	Krav
Dør til sikkert område	Sikre tilgang til sikkert område for evakuerende og nødeta-ter fra gangbanen	<ul style="list-style-type: none"> • Minimum fri åpning: 1,4 m bred og 2,0 m høy
Belysning	Skal lyse opp røm-ningsgangbanene og vise vei til sikkert om-råde	<ul style="list-style-type: none"> • Plassering: lavest mulig over gangbanen • Skal ikke hindre fri passasje • Manuell bryter/fjernstyring
Skilt	Vise nødutganger, av-stand og retning til sikkert område	<ul style="list-style-type: none"> • Skal monteres på sidevegger langs gangbanen • Max avstand mellom skiltene: 50 m • Skal opplyse om plassering av nødutstyr og alle nødutganger • Plassering 1-1,5 m over gang-bane og i overkant av dører
Gangbaner	Lede evakuerende til sikkert område	<ul style="list-style-type: none"> • Skal anlegges gangbane på ene siden av sporet for enkeltporet tunnel, og på begge sider for flersporede tunneler. • Gangbanens bredde: minst 0,8 m • Fri høyde over gangbanen: minst 2,25 m • Gangbanen skal ligge i høyde med skinneunderkant eller høyere • Lokale innsnevring i røm-ningsområdet skal unngås

Tabell 2: Komponenter relatert til sikkerhet med funksjoner og krav

Komponenter	Funksjon	Krav
Håndlist	Lede evakuerende til sikkert område	<ul style="list-style-type: none"> • Skal være ubrutt • Skal monteres 0,8-1,1 m over gangbane • Skal plasseres utenfor gangbanens minstebredde • Før og etter en hindring skal håndlisten vinkles 30 – 40° på tunnelens lengdeakse
Nødkommunikasjon	Sikre nødvendig kommunikasjon mellom toget/evakuerende og infrastrukturforvaltningen/nødetater	<ul style="list-style-type: none"> • Skal være et radio-kommunikasjonssystem med bruken av GSM-R • Skal sikre stabil radiodekning
Bryter for nødbelysning	Sikre belysning av gangbanen under evakuering	<ul style="list-style-type: none"> • Skal være en manuell bryter for nødbelysning pr 250 m • Bryteren skal være tydelig merket • Bryteren skal være i ergonomisk høyde

Komponentene i tunneltverrsnittet relatert til sikkerheten, har varierende grad av plassbehov. Mindre komponenter, som ikke er dimensjonerende for tverrsnittet, er blitt viet lite oppmerksomhet når det kommer til optimalisering. Plasskrevende komponenter som er dimensjonerende for arealet av området avsatt til tekniske

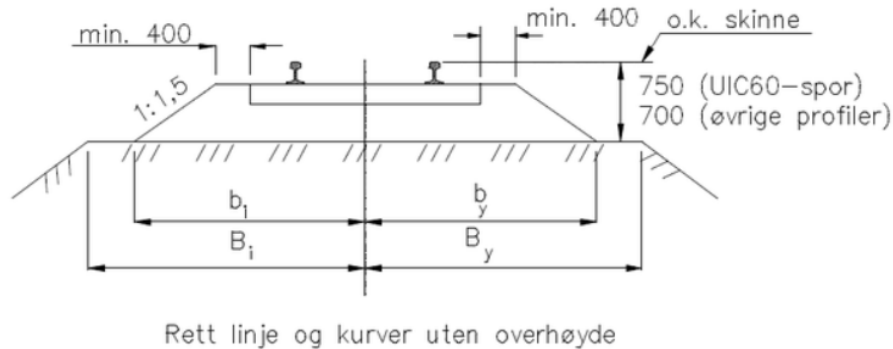
installasjoner har blitt optimalisert i (Bane Nor 2020a) gjennom anbefaling om å legge rømningsgangbanen over kabelkum og bruk av nabospor som gangbane ved ballastfritt spor dersom sporkonstruksjonen følger TSI sine krav til gangbane.

Sporkonstruksjonen

Ifølge (Profillidis 2014) består sporkonstruksjonen av skinner, sviller og sporets bærende struktur. Andre, som (Chandra & Agarway 2007) vil også inkludere befestning, skjøter og valgfrie tilleggskomponenter som mellom- og underlagsplater som en del av sporkonstruksjonen. Innenfor de ulike sporkomponentene finnes det ulike produkter med ulike design og bruksområder, for å gi jernbanen optimal framføringsevne under ulike forhold på hele strekninger og redusere slitasje og behov for vedlikehold. Teknisk regelverk gir i (Bane Nor 2021e) en oversikt over tillatt sporoppbygning med tillatte produkter, materialer, kombinasjon av produkter og anleggelse av sporet. Det vil som følge av nyanser i den tillatte sporoppbyggingen være ulikheter ute i sporet. Den største forskjellen vil dog være valget av sporets bærende struktur. Ifølge (Profillidis 2014) kan man velge mellom ballastet spor eller ballastfritt spor som den bærende sporkonstruksjonen. Dette valget må baseres på faktorer som; konstruksjonskonstanter, vedlikeholdskostnader og tekniske krav, da det både vil være fordeler og ulemper med de ulike bærende strukturene. Fordelene og ulempene er ofte omvendt proporsjonale, slik at fordelene med den ene strukturen er ulempene med den andre.

Ballastfritt spor gir ifølge (Profillidis 2014) et smalere tverrsnitt og slankere tykkelse, og fasiliterer vedlikehold og drift på en god måte, noe som vil være en fordel i tunneler. Den har høy levetid men høyere investeringskostnader. (Profillidis 2014) hevder at man i mange tilfeller vil spare inn investeringskostnaden ved den betydelig lavere vedlikeholdskostnaden. Ballastfritt spor er en fast konstruksjon som gir problemer ved setninger og ved utskifte av konstruksjonen ved enden av livsløpet. Ballastet spor er en fleksibel sporkonstruksjon, som enkelt kan repareres ved for eksempel differensielle setninger. Den har lavere konstruksjonskostnader, men har variasjon i stivhet og lavere tverrs gående kraftresistans. Et studie av ballastfrie spor i Tyskland, viser levetid på 50-60 år, og konstruksjonskostnader mellom 680 euro/m - 575 euro/m. For ballastet spor var kostnaden 365 euro/m. Studiet viste dog at vedlikeholdskostnadene til ballastfrie spor bare var 10% av vedlikeholdskostnadene for ballastet spor.

For ballastet spor fastslår (Profillidis 2014) og (Esveld 2001) at ballastskulderen, ballastskråningen og tykkelsen på ballasten er avgjørende for den bærende strukturens stabilitet og evne til lastbæring. (Profillidis 2014) utdyper at en økning i tverrgående kraftresistans kommer av økt ballastskulder, overhøyde for skulder,



Figur 9: Ballastprofil enkeltspor
(Bane Nor 2020j)

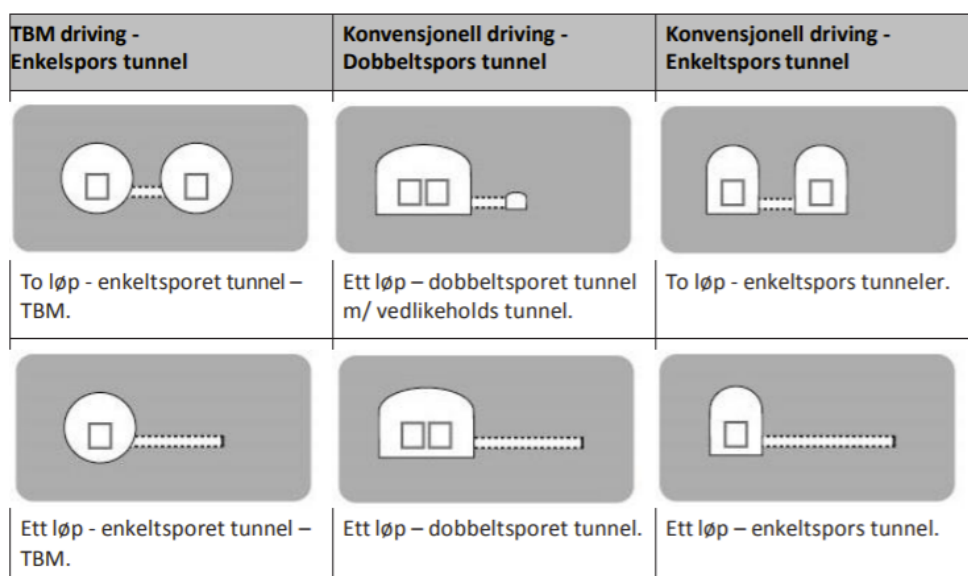
men hevder at effekten av ballastskråningens helning er sekundær sammenlignet med de overnevnte effektene. Figur 9 hentet fra (Bane Nor 2020j) viser standard ballastprofil for enkeltspor uten overhøyde med standard svilletype for nye spor. Figuren illustrerer minimumsbredde på skulder, helningen til skulderskråningen og angir tykkelsen på ballasten. Ifølge kravene fra Teknisk regelverk er minimum skulderbredde 400 mm, helningen er 34° , og tykkelse på ballast er 578 mm ved standard skinnetype 60EI for nye spor (UIC60-spor). (Pen & Powrie 2016) diskuterer mangelen på dokumentasjon knyttet til profilet til skulderen utenfor enden av svillen, og hevder at dagens spesifikasjoner er basert på erfaring og resultater fra enkle eksperimenter. Men det anerkjennes at det er vanskelig å finne det eksakte grunnlaget for spesifikasjonene knyttet til ballastprofilen.

Ifølge (Pen & Powrie 2016) ansees det å være akseptabelt med skulder med eller uten overhøyde, hvor ballastskråningen heller bort fra svillen, med en helning som kan være opp mot ballastens naturlige vinkel for skjærmotstand. Det ble også funnet at skulderbredde over 600-800 mm ga lite fordel med tanke på tverrgående motstand, og at 400 mm skulder ble ansett som det beste. Det ble funnet at en overhøyde på 125 mm ga relativt lite bidrag til tverrgående motstand, men det kunne være en fordel. (Jing et al. 2020) viser til samme konklusjoner, og viser i tillegg til at tykkelsen på ballasten har stor betydning for den tverrgående kraftmotstanden. Men i samsvar med (Esveld 2001) påpekes det at effekten av tykkelsen på ballasten er begrenset når tykkelsen overstiger 30 cm.

2.4 Valg av tunnelkonsept

Under utredning og prosjektering av tunnelprosjekt, er valget av tunnelkonsept svært bestemmende for videre beslutningsprosesser og prosjektering av tunnelpro-

sjektet, samt for byggefasen og driftsfasen av prosjektet. En generell trend er at lange jernbanetunneler (>15 km) bygges som enkeltspors tunneler, mens kortere tunneler (<5 km) bygges som dobbeltspors tunneler. Dette forutsetter at normalt vedlikehold kan utføres i tunnelene. Hyppigheten av tverrrtunneler må også vurderes som funksjon av lengden på hovedløpet. Figur 10 viser skjematisk prinsipielle tunnelkonsept, som har ulike geometriske- og tekniske løsninger. Her vises det for dobbeltspor, tre ulike alternativer: en stor dobbeltsporet tunnel med rømningsveier til det fri eller annet sikkert sted min. hver 1000 m, en stor dobbeltsporet tunnel med parallell service-/rømningstunnel med tverrforbindelse for rømning for min. hver 1000 meter, og to separate enkeltsporstunneler med tverrforbindelse mellom disse hver 500 m (Bane Nor 2020h). Det kan også være to separate enkeltsporstunneler med servicetunnel forbundet med rømningsvei mellom tunnelene (Bane Nor 2020f).



Figur 10: Skjematiske oversikt over ulike tunnelkonsept (Bane Nor 2020h)

Tunnelkonsept og deres tilpassede tekniske løsninger velges basert på en RAMS-analyse, med en rekke kriterier med ulike variabler. Fagfeltene som undersøkes under RAMS-analysen er sikkerhet, geologiske forutsetninger, anleggsteknikk, kostnader, samt drift og vedlikehold (Bane Nor 2020n). Gjennom å se på konkrete kriterier som; tunnellengde, trafikkmengde, trafikktype, beliggenhet, hastighetsnivå og økonomi, vurdert ved å bruke variablene (som også må fastsettes som en

del av beslutningsprosessen): levetid, overbygning, drivemetode, kontaktledning og sporveksler, kan tunnelkonsept og tilhørende tekniske løsninger velges. Kriteriene og variablene får betydning for valget, gjennom at de påvirker blant annet antall løp, sikkerhetstiltak, profilutforming og drivemetode (Bane Nor 2020f). Det fremstår som et krevende arbeid å velge tunnelkonsept og tekniske løsninger. Det kan også være noe av grunnen til at det i den senere tid er blitt pekt på at det er blitt gjort fordyrende og feil vurderinger i valg av tunnelkonsept på nyere tunnelprosjekt. Eksempel på dette er fra Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 (Bane Nor 2021b) (Bane Nor 2020c) og (Bane Nor 2018).

En annen utfordring ved valg av ulike konsept er at konseptvalgene kan ha ulike fordeler/ulempes, som ofte er omvendt proporsjonale. Det kan ofte være at det ikke alltid er ett åpenbart valg, men ulike nyanser legges til grunn, og hvor man sitter igjen med et konsept med både fordeler og ulemper. I forhold til byggefasen nevnes noen av fordelene ved ettløpstunnel og toløpstunnel i (Bane Nor 2020f) som illustrerer at det ikke alltid er ett åpenbart valg:

Fordeler med ettløpstunneler:

- færre arbeidsfronter
- mindre masser som må fjernes
- mindre bergoverflateareal for sikring
- større tverrsnitt gir mindre laster på konstruksjonene
- enklere håndtering av trykkutjevning
- enklere å etablere overkjøringsløyper
- mindre utstyr som må vedlikeholdes
- mulighet for å plassere teknisk utstyr i rømningstunneler som ikke krever sportilgang ved vedlikehold
- lavere trykk- og sugkrefter på installasjoner og konstruksjoner

Fordeler med toløpstunneler:

- kortere rømningsveier
- full kapasitet i ett løp ved vedlikehold i det andre løpet
- lavere krefter ved togmøter

2.5 Drivemetode

I forrige kapittel kom det frem at valg av tunnelkonsept i stor grad er styrende for senere beslutningsprosesser i forbindelse med et tunnelprosjekt. Dette inkluderer også valg av drivemetode. Det er også derfor drivemetoden og gjennomførelsen blir kontraktsfestet. Den legger føringer for størrelsen på tverrsnittet for å få plass til stabilitet-, vann- og frostsikring (Bane Nor 2020i) og de tekniske løsningene in-

nenfor kledningen. Det er to aktuelle drivemetoder presentert i Teknisk regelverk: konvensjonell drift med boring og sprengning eller bruk av tunnelboremaskin (heretter kalt TBM).

Kriteriene som er avgjørende for valg av drivemethode er ifølge [Bane Nor \(2020e\)](#) mange av de samme som for valg av tunnelkonsept: geologiske forhold byggetid, hensyn til omgivelsene, helse og sikkerhet, jernbaneteknikk, anleggsteknikk, byggekostnader, prosjektorganisering og RAMS. Listen er ikke uttømmende og det store antallet beslutningsparametere indikerer at bestemmelse av drivemethode er en kompleks prosess med mange forhold som spiller inn. Ifølge [\(Baklien & Moi 2018\)](#) har både TBM og konvensjonell drivemethode fordeler og begrensninger. Det er derfor viktig at parameterne som inngår som beslutningskriterier blir vurdert nøye i forhold til hverandre på hvert enkelt prosjekt. Basert på en rekke norske prosjekter, virker det som at kostnad og byggetid er de to hovedfaktorene som veier tyngst under valg av drivemethode. Strengere krav i NTP i forhold til bygg- og anleggsbransjens miljøpåvirkning fører til at miljøparametere i større grad vil være styrende i beslutningsprosesser for fremtidige prosjekt. I tillegg påpeker [\(Bane Nor 2015b\)](#) at prosjekters livsløp, samt vedlikehold, er kommet mer i fokus, hvor TBM blir pekt på som den beste løsningen for lavere vedlikeholdskostnader og lengre livsløp.

Det er blitt lagt ned mye arbeid i bransjen de senere årene for å forbedre drivemetodene gjennom blant annet forbedret materialkvalitet, lavere CO₂ avtrykk, høyere virkningsgrad og større nøyaktighet på utstyret. Men også høyere grad av digitalisering og automatisering har gitt mer effektive anleggsplasser.

Innenfor TBM maskineriet har man fått bedre ytelse og effektivitet gjennom økt TBM diameter og penetrasjonsrate. Denne utviklingen sees i sammenheng med bedre stålqualität, bedre teknologiske løsninger og mer kunnskap på området. Dagens maskiner produseres med større kuttere, og kutteravstanden kan varieres. Maskinytelsen kan optimaliseres gjennom større mengde verktøy på kutterhodet (som gir høyere matekraft og dreiemoment) mot en marginal økning i maskindiameter [\(Jakobsen 2015\)](#). Det har også blitt utviklet bedre modeller for å estimere tid, kostnad og kutter slitasje, parallelt med bedre maskindata [\(Vassenden 2019\)](#). Leverandørene har dermed økt fleksibilitet og nøyaktighet til metoden, gjennom muligheten til å skreddersy maskiner til det enkelte prosjektet. Man kan ifølge [\(Pål Drevland Jakobsen 2020\)](#) i teorien bestille TBMer med diameter med nøyaktighet på cm-nivå. Borenøyaktigheten til maskinen er også svært god. Ifølge [\(Pål Drevland Jakobsen 2020\)](#) vil små variasjoner i tverrsnittets diameter forekomme, som

følge av slitasje på kutterutstyr, og gi omtrent 3 cm mindre diameter ved utslitte kuttere. Dette vil gi en variasjon i tverrsnittsstørrelsen gjennom hele tunnellengden på opptil 3 cm.

Andre fordeler med metoden er blant annet at flere operasjoner kan gjennomføres samtidig eller sekvensielt, og at metoden åpner for ferdigstilling parallelt med driving. Slik som for eksempel installasjon av berg- og vannsikring samtidig som drivingen pågår ([Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk 2015](#)). I mange tilfeller gir dette en raskere fremdrift, da behovet for forinjeksjon kan reduseres og totalt sett gi en tettere tunnel som er ferdig når drivingen er over ([Solberg 2016](#)). Metoden åpner også for effektiv massetransport, og kan i mange tilfeller gi et bedre arbeidsmiljø og omliggende ytre miljø ([Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk 2015](#)).

Innenfor konvensjonell drift har det, ifølge Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (heretter kalt NFF), vært gjort et betydelig arbeid i senere tid for å forbedre konturkvaliteten (kvaliteten på tunneltverrsnittprofilen med ønske om å få konturen så tett opp mot teoretisk sprengprofil som mulig), da konturkvaliteten er direkte relatert til kostnad og byggetid ([Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk 2012](#)). I samarbeid med næringslivet ble Teknisk rapport nr 12 om konturkvalitet i sprengte tunneler utarbeidet, som gir anbefalinger knyttet til hvordan entreprenører kan forbedre konturkvaliteten. Fra rapporten kommer det frem at konturkvaliteten kan forbedres betydelig ved å fokusere på nøyaktig boring, redusere ladningsmengden i konturhullene, ha tettere bormønstre og sørge for at de tekniske løsningene i forhold til ladning og detonasjon er gode. Dette for at ladningsfordelingen i hullet og detonasjonen blir gjennomført som planlagt ([Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk 2012](#)). Det arbeides kontinuerlig fra leverandørens side for å forbedre produktene som anvendes, men det har i lang tid vært utfordringer knyttet til å sette teorien ut i praksis på feltet sprengningsteknikk.

I ([Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk 2012](#)) kommer det frem at entreprenøren i stor grad kan påvirke konturkvaliteten (størrelsen på avviket fra teoretisk kontur). ([Miguel Arestegui 2021](#)) påpeker at konturkvaliteten er avhengig av en rekke faktorer som kan relateres til både geologi, gjennomførelsesmetode for driving og sikring av fjell, og ikke minst fagkompetansen til de utførende. Toleranser og kvaliteten på ulike arbeidsoppgaver er gitt i kontraktens prosesskoder eller relevante tegninger. Eksempler på slike prosesskoder er gitt i ([Statens vegvesen 2015](#)) og ([Bane Nor 2015a](#)). Eksempler på toleranser på sikrings- og kledingsprosesser i ([Statens vegvesen 2015](#)) er:

- betongvelv -0 mm/+ 10 mm
- sikringsstøp +/- 50 mm
- sprøytebetongtykkelse + 30mm /-10 mm
- tykkelse veggelement -0 mm/ + 10 mm

Ved en slik gjennomføringsmodell får entreprenøren flere insentiver for å ønske nøyaktig kontur, ved at entreprenøren får betalt for de mengdene som produseres og som skal måles i henhold til mengdereglene som angis i hver enkelt prosess. På denne måten må entreprenøren forholde seg til toleransen definert i prosessene og kan ikke bygge mer enn det som er prosjektert, dersom de ikke klarer å vise til at endringer er begrunnet i noe som byggherren må bære ansvar for, for eksempel geologi ([Miguel Arestegui 2021](#)). I ([Norsk Forening for Fjellsprennings-teknikk 2014](#)) vises det til at større kontur fører til mer uttransportering av stein og potensielt mer forbruk av sprengstoff, borkroner og annet forbruksmaterieell. Avhengig av løsningene knyttet til fjellsikring og kledning kan i flere tilfeller en dårlig kontur skape utfordringer. I prosjekter med full lining etter drivingen vil en unødvendig stor kontur utenfor den teoretiske kontur måtte erstattes med betongstøp for å oppnå den normalprofilen som er kontraktsfestet. Dette kan føre til store ekstrakostnader for entreprenøren. Avhengig av kledningstype vil byggherre i mange tilfeller akseptere overfjell, men dette vil likevel bli fordyrende for entreprenøren når tverrsnittet er større enn nødvendig.

Vannsikring som en del av tunnelkledningen er ofte betydelig overdimensjonert. Det er blitt gjort mye arbeid de siste årene for å oppnå slankere konstruksjoner som vil være positivt for klimaavtrykket til tunnelene, men som også gir potensiale for mindre tverrsnitt. En ny løsning som er forsket frem ved NTNU, er bruken av sprøytbar membran og sprøytebetong som vann og frostsikring ([SINTEF 2018](#)). Her foreslås det at man kan bruke et, ideelt sett, minst 8 cm tykt bergsikringslag av sprøytebetong, med et 4 cm utjevningsslag over, og med et 6 cm beskyttelseslag over den sprøytbare membranen mellom de forestående lagene. alternativt med velv gir 8 cm bergsikring over 8 cm dekklag, og dermed 40 cm full utstøpning. Metoden ansees å ha bortimot 60% lavere klimaavtrykk ([SINTEF 2018](#)). Det må likevel sees opp mot drivemetode, hvor for TBM bruken av prefabrikerte betongelementer ansees å være en svært effektiv metode.

([Miguel Arestegui 2021](#)) påpeker at et annet plassbesparende tiltak som gjøres dersom man møter på utfordrende geologiske forhold under driving, er at man utvider tunnelprofilen for å få tilstrekkelig større plass til den tunge sikringen for å passe på at liningen blir jevn. Dette er en fordel i forhold til aerodynamiske betingelser i jernbanetunneler. Avhengig av teknisk løsning vil det ofte være avstand

mellom kledningen og bergoverflaten (avstand mellom ferdig sikret berg og baksiden av vann- og frostsikringskonstruksjonen). Ved ujevn kontur vil den avstanden variere gjennom tunneltverrsnittet. Dette kan være et eksempel på et tilfelle hvor byggherren aksepterer overfjell og avvik i utførelsen, da vann- og frostsikringskonstruksjonen likevel opptar den angitte plassen i tunneltverrsnittet ([Miguel Arestegui 2021](#)).

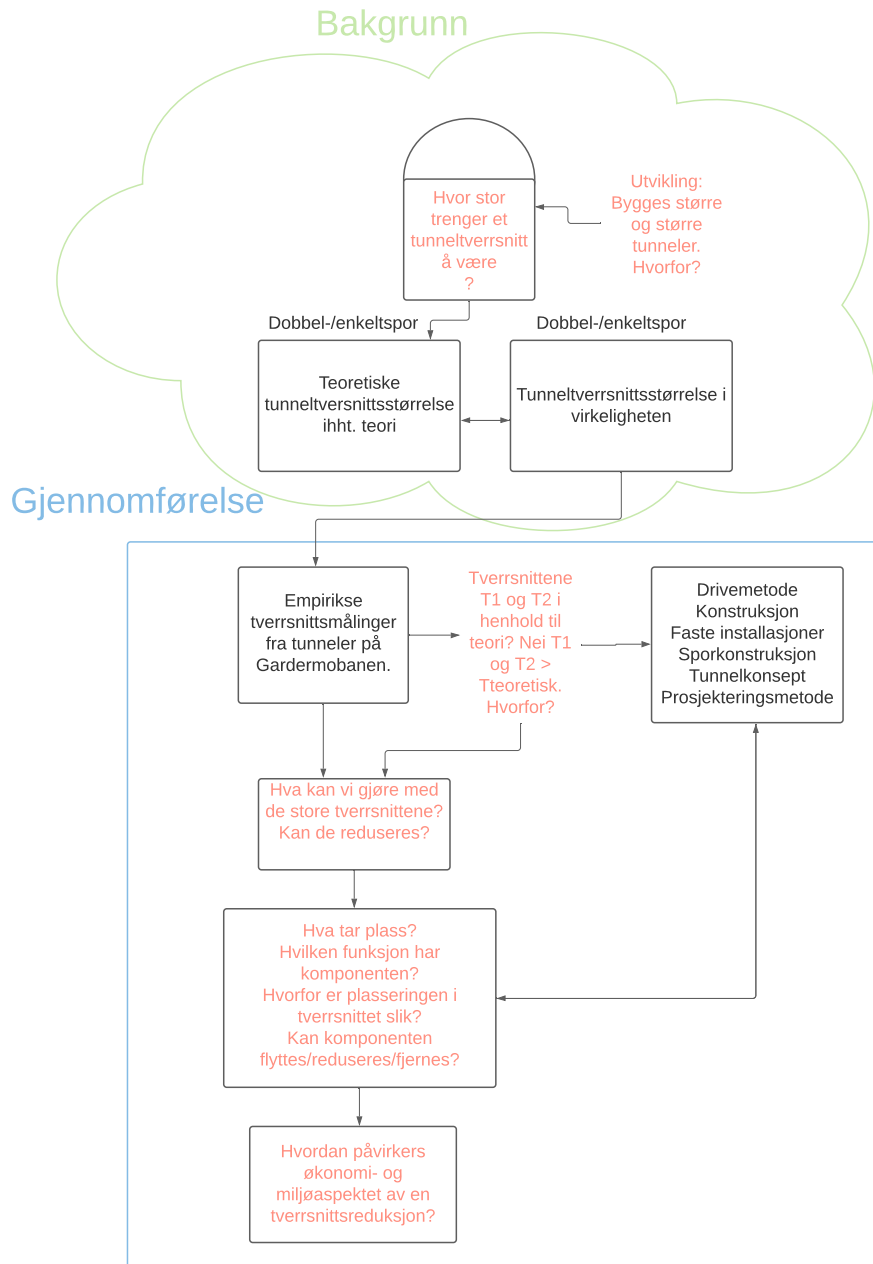
2.6 Optimaliseringsanalyse

Innenfor fagfeltet er det funnet lite litteratur som viser direkte til tverrfaglig arbeid knyttet til optimalisering av tunneltverrsnitt eller reduksjon av tverrsnittdiameter til tunneler. ([Abdi & Ghanbarpour 2014](#)) diskuterer problemstillingen med hva som er den optimale indre diameter for T-bane tunneler med tanke på et økonomisk- og teknisk perspektiv. Abdi og Ghanbarpour diskuterer fremførelsen av T-banen knyttet opp mot tunneldiameteren ved å se på parametere som faste installasjoner i tunnel, T-banens dynamiske referansekontur og T-banens fremføringstid (reisetid). Disse parameterne blir analysert opp mot de totale kostnadene knyttet til T-banetunnelen, både konstruksjonskostnader og driftskostnaderinstallasjoner. Denne økonomiske kost og nytte analysen, basert på de ulike parameterne med variabelen tunneldiameter, resulterer i en optimal tunneldiameter på 8,4 m med dobbeltspor med hensyn på både de tekniske spesifikasjonene og parameterne i tillegg til det økonomiske perspektivet.

Videre viser rapporten ([Bane Nor 2020c](#)) en optimalisering av tunneltverrsnitt gjennom bruk av aerodynamisk analyse, og vurderinger som førte til behov for mindre luftareal i tverrsnittet. Dette førte til at det var mulig å komprimere tunneltverrsnittet.

3 Metode

Metoden benyttet til forskningsarbeidet kan sies å være en hybrid mellom kvalitativ og kvantitativ forskningsmetode, ved bruk av både kvantitative og kvalitative data som grunnlag. Det ble i valget av forskningsmetode lagt vekt på kvalitetssikring, gjennom å vurdere metodens grad av gjennomførbarhet, pålitelighet, etterprøvbarhet, gyldighet og generaliserbarhet, som ifølge (Tjora 2017) er faktorer som gjenspeiler kvalitet i forskningen. Forskningsspørsmålene til masteroppgaven ble vurdert til å ha både kvalitativt og kvantitativt preg, og krevde dermed en metode som både har evne til å skape oversikt og forståelse, i tillegg til å være systematisk og forklarende. Forskningsfeltet til oppgaven ble også vurdert i metodevalget. Det ble vurdert til å være et stort kunnskapshull innenfor forskningsområdet, derfor var det viktig at metoden ga en god systematisk oversikt og evnet å danne grunnlag for videre arbeid knyttet til temaet. I tillegg ble metodens egnethet i forhold til arbeidets begrensninger, omfang og definerte forskningsspørsmål vurdert.



Figur 11: Skjematisk oversikt over forskningsmetoden

Figuren 11 viser en skjematisk oversikt over forskningsmetoden benyttet i oppga-

ven, og er ment som en oversikt for å konkretisere metodekapittelet. Illustrasjonen er overordnet delt inn i bakgrunn og gjennomførelse, med piler som viser rekkefølge og avhengighet mellom de ulike stegene i prosessen. Videre illustrerer stegene skrevet i rødt, de spørsmål som besvares i trinnene, mens de svarte boksene beskriver konkrete handlinger, etablerte fakta eller resultat. Bakgrunnsboksen gjennomgår spørsmålet som vekket kandidatens interesse og nysgjerrighet til temaet, i tillegg til å illustrere inndelingen av teoretisk og praktisk kunnskap innenfor feltet. Videre viser gjennomføringsdelen hvordan kandidaten valgte å undersøke om teorien stemte i praksis, ved å innhente empiriske og kvalitative data til videre analyse. Som en forsmak på resultatkapittelet avsløres det at de empiriske tverrsnittene var av større størrelse enn teorien. Det ble videre undersøkt hvorfor dette var tilfelle. En stor del av arbeidet bestod i å undersøke hvordan de empiriske dataene kunne bearbeides for i større grad å være i overensstemmelse med teorien, i tillegg til å videre forbedre de empiriske dataene. Etter å ha gjennomgått den blå gjennomførelseboksen, har kandidaten resultater til å kunne svare på forskningsspørsmålene. Videre i de neste delkapitlene, blir de ulike stegene i prosessen belyst på et høyere detaljnivå.

3.1 Datagrunnlag

Datagenereringen ble foretatt ved bruk av dokumentanalyse, observasjoner, diskusjoner med fagmiljøet gjennom e-postintervju, samt generering av kvantitative målinger gjennomført på ekskursjon. Variasjonen i datatyper tilgjengelig fra datagenereringen ble sett på som en styrke for å skape oversikt, forståelse og gi mulighet for å samle tråder og kunne generalisere funn.

Målinger og observasjoner

Avstandsmålinger, geometriske målinger og observasjoner ble gjort i to tunneler på Gardermobanen; Rashølet tunnel (enkeltspors løsmassetunnel) og Bekkedals- høgda tunnel (dobbeltspors fjell tunnel). Målingene og observasjonene ble generert under en ekskursjon sammen med Bane Nor og Spordrift 11.01.21-13.01.21. Det ble gjort observasjoner av komponentene i tunneltverrsnittet, med spesielt fokus på sporkonstruksjonen og de tekniske installasjonene. Komponentenes plassering i forhold til hverandre ble observert, og det ble foretatt avstandsmålinger og geometriske målinger av størrelsen på komponentene og deres plassbehov innenfor kledningen. Avstandsmålingene ble gjort ved bruk av tommestokk og lasermåler, hvor kledningen ble brukt som referansepunkt i x-planet, og bakkenivå ved kledningen (formasjonsplanet) ble brukt som referansepunkt i z-planet. Dataene kan ikke bli kvalitetssikret og kan ha betydelig usikkerhet. Det er dog antatt at feilregistreringer ikke vil påvirke resultatene i nevneverdig grad.

Dokumentstudie

Det ble anskaffet dokumentasjon på byggegrunnlaget/prosjekteringsgrunnlaget fra eldre og nyere jernbanetunnelprosjekt. For nyere prosjekterte tunneler ble det tatt utgangspunkt i tunneltverrsnitt fra Intercity prosjektet ([Bane Nor 2020h](#)) og Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 ([Bane Nor 2018](#)). I tillegg ble tunneltverrsnittene presentert i saksdokumentet ([Bane Nor 2020c](#)) som tar høyde for aerodynamiske betingelser knyttet til tverrsnittsreduksjon undersøkt. For eldre tunneler ble byggetegninger for Rashølet tunnel fra 1998 undersøkt ([NSB 1998](#)).

E-postintervju

For faglige diskusjoner knyttet til masteroppgaven ble det opprettet kontakt med relevante aktører i Bane Nor og fra bransjen. Korrespondansen ble gjennomført per e-post, hvor problemstillinger ble beskrevet og utfyllende spørsmål ble stilt, og dialog ble ført vekselvis mellom undertegnede og intervjuobjekt. For å identifisere og engasjere riktige fagpersoner og bidragsyttere, har personlig nettverk og tips fra veiledere blitt benyttet. Under kommunikasjonen med ulike bidragsyttere ble det generert store mengder relevant informasjon omkring temaet jernbanetunneler, hvor alt ikke fremkommer direkte i oppgaven. Informasjonen var likevel svært nyttig

under tolkning av genererte data, og informasjonen har derfor bidratt indirekte i form av økt forståelse for temaet under arbeidet med oppgaven.

3.2 Konstruering av tunneltverrsnitt

Programvaren Autocad ble benyttet for å konstruere modeller av tunneltverrsnitt, basert på kvantitative målinger fra tunnelene Rashølet og Bekkedalshøgda. Som forutsetning for konstruksjonen av tverrsnittene, ble det antatt at senterlinjen for sporkonstruksjonen, med tilhørende komponenter, ble plassert på tunnelens senterlinje. Det ble foretatt geometriske beregninger i henhold til Bane Nor sine prosjekteringsregler ([Bane Nor 2020j](#)) og ([Bane Nor 2021e](#)) for overbygningens geometriske utforming og spordesign. Modellerte tunneltverrsnitt ble konstruert i Autocad, ved bruk av programmets geometriske funksjoner. Tverrsnittene ble detaljert med omriss av kledningen og formasjonsplan, samt alle øvrige nødvendige komponenter og tekniske installasjoner. Tverrsnittene ble målsatt for å vise nøyaktige størrelser og sammenhenger. I tillegg til konstruksjon av tunneltverrsnittene ble konturene minste tverrsnitt og dynamisk lastprofil NO1 detaljert i modellene. Disse konturene ble plassert med overlapp i korrekt avstand fra sporet, i henhold til ([Bane Nor 2020l](#)). Det ble i tillegg til tunneltverrsnitt konstruert fra tunneldata, konstruert forenklede modeller av tunneltverrsnittene, presentert i ([Bane Nor 2020h](#)), til bruk som sammenligningsgrunnlag.

3.3 Optimalisering av tunneltverrsnittet

Det er videre forsøkt å gjøre en komprimering av tunneltverrsnittene på samme måte som i ([Bane Nor 2020c](#)). De modellerte tunneltverrsnittene konstruert gjennom tunneldata ble analysert med hensyn på å finne de styrende/kritiske komponentene for tverrsnittsstørrelsene. Med styrende/kritiske komponenter menes de komponentene som tar størst horisontal plass i tverrsnittet, samtidig som komponenter av mindre geometrisk størrelse kan okkupere samme horisontale område, og derfor er dimensjonerende for tverrsnittsstørrelsen. Under dette arbeidet ble fagmiljøet hyppig konsultert i undersøkelsen av funksjoner, plassbehov og plassering av de ulike komponentene i tverrsnittene. Etter de styrende/kritiske komponentene var konstatert, ble det gjort et arbeid med å optimalisere tunneltverrsnittene ved å endre plassering av, endre geometri av eller eliminere de styrende komponentene. Endringene av tunneltverrsnittene under optimaliseringen ble gjort gjennom nøye vurderte løsninger som regnes som jernbaneteknisk og anleggsteknisk tilfredsstillende.

3.4 Sammenligning av tunnelprofil

Tabell 3: Skjematisk oversikt over hvilke tunneler som sammenlignes med begrunnelse

Tunnel1	Tunnel2	Tunnel3	Begrunnelse
Rashølet	Rashølet (reduisert)	IC- enkeltspor	Sammenligne eldre tunnel med redusert versjon og ny prosjektert tunnel for å undersøke om tverrsnittene er blitt større med tiden
Bekkedalshøgda	Bekkedalshøgda (reduisert)	(IC-dobbeltspor)	Sammenligne besparelse fra opprinnelig til redusert tverrsnitt for å se dette opp mot ny prosjektert tunnel for å undersøke om tverrsnittene er blitt større med tiden
IC-dobbeltspor	IC-dobeltspor optimal		Sammenligne orginal og optimal tunnelstørrelse
Enkeltspor	Dobbeltspor		Drøfte valg av tunnelkonsept

I henhold til bakgrunnen for oppgaven og forskningsspørsmålene presentert i kapittel 1 og metodeprosessen og spørsmålene stilt i figur 11, var det hensiktsmessig å sammenligne ulike tunneltverrsnitt. Tabell 3 gir en skjematisk oversikt over hvilke tverrsnitt som sammenlignes videre i oppgaven, med en tilhørende kort begrunnelse.

De omtalte tunneltverrsnittene i tabell 3 er de empiriske tverrsnittene *Rashølet* og *Bekkedalshøgda*, hvor tverrsnittene sammenlignes med sine tilhørende reduserte tverrsnitt, etter prosessene i kapittel 3.2 og 3.3 er gjennomført. De optimaliserte

tunneltverrsnittene sammenlignes også med forenklede modeller av tunneltverrsnitt fra Intercityprosjektet (her betegnet som *IC-enkelt og -dobbeltspor*). Bakgrunnen for sammenligningen av tverrsnittene er for å undersøke ulikheter/likheter og potensialet for tverrsnittsreduksjon og følgelig besparelser på fremtidige prosjekter.

Sammenligningen ble gjort i Autocad ved å legge tverrsnittene i designerte lag og legge tverrsnittene med overlapp i programmet. Fra sammenligningen ble det hentet ut tall på hvor stor overlappene til tverrsnittene var og følgelig potensialet for tverrsnittsreduksjon, til å bruke i videre beregninger.

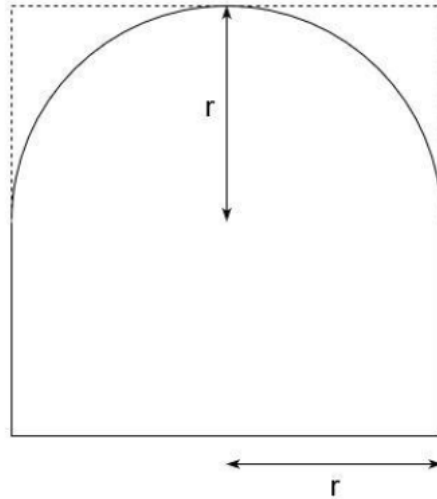
3.5 Beregning av CO₂ og kostnad

I samarbeid med gruppe 5 fra *TBA4853 EiT - Punktlig og Effektiv Jernbane* ble det forsøkt opprettet en modell som skulle belyse de økonomiske og miljømessige aspektene ved tverrsnittsreduksjon av jernbanetunneler. Gruppen brukte kvalitative data (empiriske gjennomsnittstall/anerkjente modeller for kostnadsestimering av ulike parametere) og etablerte modeller for kostnadsestimering, for videre å generalisere modellene for å anvende estimatene til å beskrive effekten av tverrsnittsstørrelsen i tunneler. For å etablere modellen, ble kostnadsmoduler identifisert og beskrevet som en-variabel-funksjoner, hvor tverrsnittsstørrelsen var eneste variabel, mens andre faktorer ble behandlet som modellparametere. Tverrsnittsstørrelsen ble i utarbeidelsen av modellen beskrevet gjennom formelen til en enkel geometrisk figur illustrert i figur 12 og gitt i formelen 3.1 hvor tverrsnittsstørrelsen bare er avhengig av radiusen til tunnelen (halvparten av den horisontale tverrsnittslengden). Modellen tar inn tverrsnittsstørrelsen som variabel, men den er ikke begrenset til at tverrsnittsstørrelsen må regnes ut gjennom arealformelen $T(r)$, når tverrsnittsstørrelsen velges som variabel.

$$T(r) = \frac{1}{2}r^2(4 + \pi) \quad (3.1)$$

I etableringen av modellen ble det gjort flere antagelser og forenklinger, som representerer svakheter og potensielle feilkilder ved modellen. Det bemerkes at kostnader tilknyttet et tunnelprosjekt vil være avhengig av en rekke parametere og valg underveis i prosjekteringsprosessen, under drivingen av tunnelen, og kan være helt situasjonsspesifikt som vist i kapittel 2. Hensikten med modellen er å belyse størrelsesordenen på potensielle besparelser som kan gjøres ved å redusere tverrsnittet, og til denne funksjonen er modellen tilstrekkelig nøyaktig. Figur 13 viser en grafisk illustrasjon av hvilken type tunnelprosjekt som er inkludert i modellen og hvilke

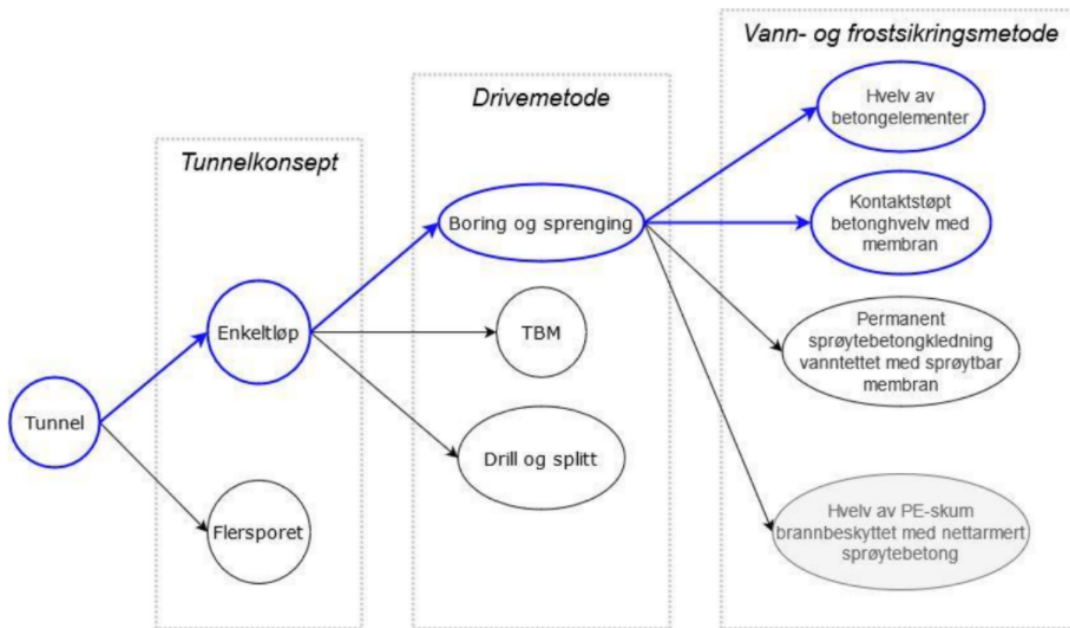
valg som er tatt underveis for å begrense modellens størrelse.



Figur 12: Geometrisk fremstilling av normalprofil til tunnel
([Tunheim et al. 2021](#))

Modellen kan finnes ved å bruke følgende [link](#), med tilhørende dokumentasjon knyttet til modellen i prosjektrapporten ([Tunheim et al. 2021](#)).

Modellen ([Tunheim et al. 2021](#)) benyttes i masteroppgaven for å beregne kostnader og CO₂ avtrykk for reduserte tunneltverrsnitt, ved å sammenligne det reduserte tverrsnittet mot et referansetverrsnitt. Slik modellen benyttes i oppgaven, velges det standardverdier for alle modellparametrene slik som bergmassekvalitet, sikringsmetode og vann- og frostsikringstiltak, for å gi like betingelser som grunnlag for sammenligning av tverrsnittene. De opprinnelige tverrsnittene målt fra empiriske data blir satt som referansetverrsnitt, mens de sammenlignes opp mot reduserte tverrsnitt, i tillegg til eksisterende tverrsnitt fra litteraturen. Tverrsnittsstørrelsen til de empiriske tverrsnittene finnes gjennom bruk av areal-funksjonen i Autocad, hvor geometrien til tverrsnittene er forenklet og samsvarer med den geometriske modellen fra figur 12.



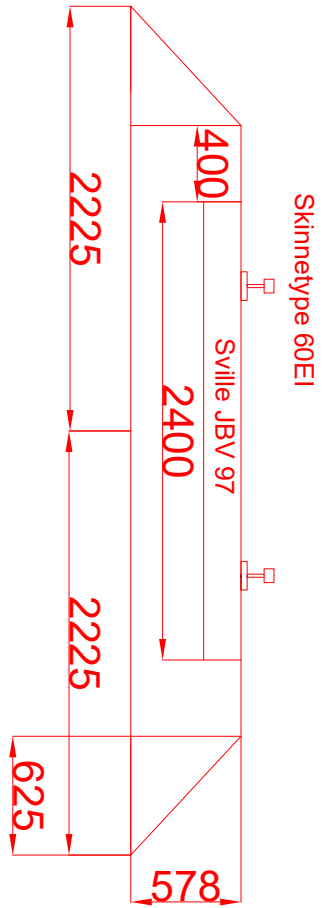
Figur 13: Skjematisk illustrasjon av hvilken type tunnelkonsept med tilhørende drivemetode og vann- og frostsikringsmetode som er inkludert i modellen (Tunheim et al. 2021)

4 Resultater og diskusjon

4.1 Kontroll av empiriske data

Figur 15 og 14 viser sporkonstruksjonen til henholdsvis Bekkedalshøgda dobbelt-spørtunnel og Rashølet enkeltspørtunnel. Figur 16 og 17 viser detaljtegning av de tunneltverrsnittene for to tunnelene som også inkluderer konturene minste tverrsnitt og dynamisk referanseprofil NO1. For å kontrollere de empiriske dataene ble det foretatt sammenligninger mot byggetegninger, der hvor disse var tilgjengelige (NSB 1998). I tillegg til en kontrollert tegningene sammen med Bane Nor (Trine Bye Sagen 2021), (Christopher Schive 2021) og (Odd-Andre Rustad 2021).

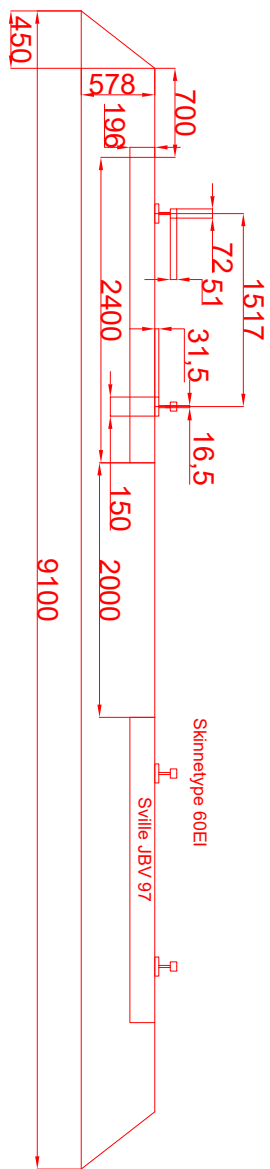
Sporoppbygning enkeltspor



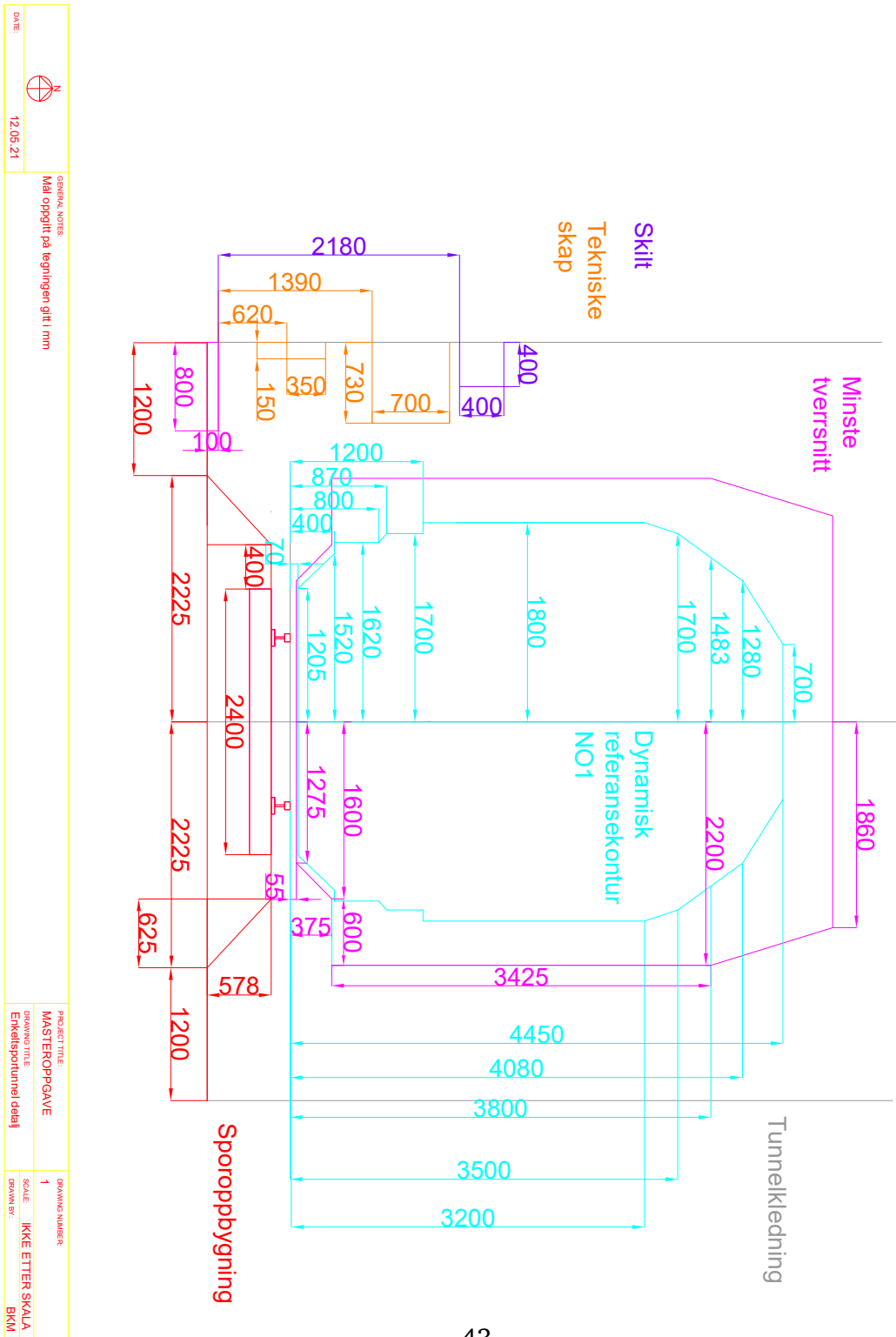
DATE	16.05.21	GENERAL NOTES	PROJ. ECT TITLE	DRAWING QUANT.
		Mål oppgitt på tegningen er gitt i mm	Masteroppgave	7
			DRAWING TITLE	SCALE
			Sporoppbygning enkeltspor	IKKE EITTEK SKALA
				DRAWN BY
				BKM

Figur 14: Detaljtegning sporoppbygning Rashølet tunnel


DATE	16.05.21	GENERAL NOTES	Mål oppgitt på tegningen gitt i mm	PROJECT TITLE	MASTEROPPGAVE	DRAWING SCALE	2
				DRAWING TITLE	Sporkonstruksjon dobbeltspor	DRAWING BY	IKKE ETTER SKALA BKVI

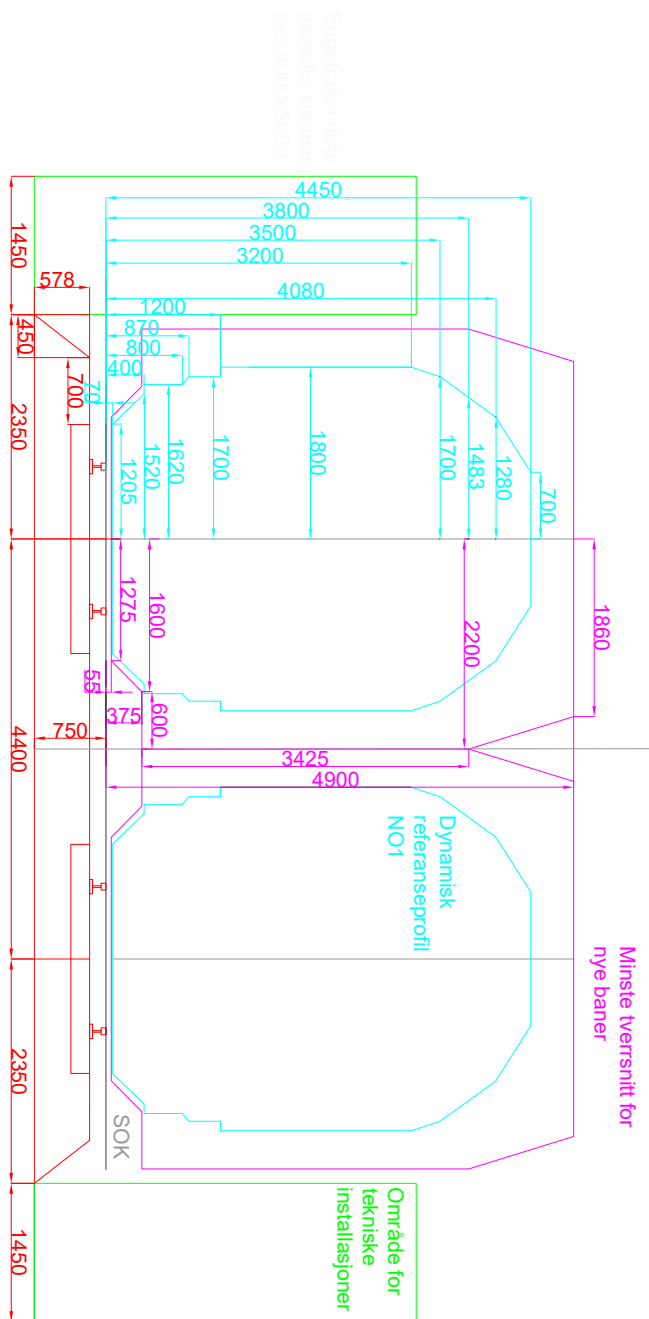


Figur 15: Detaljtegning sporkonstruksjon Bekkedalshøgda tunnel



Figur 16: Detaljtegning Rashølet tunnel

DATE: 16.05.21		GENERAL NOTES Mål oppgitt på tegningen gitt i mm	PROJECT TITLE: Mastertoppøpave	DRAWING QUANTITY: 3
			DRAWING TITLE: Dobbeltspor tunnel detalj	SCALE: IKKE ETTER SKALA
				DRAWN BY: BKVI



Figur 17: Detaljtegning Bekkedalshøgda tunnel

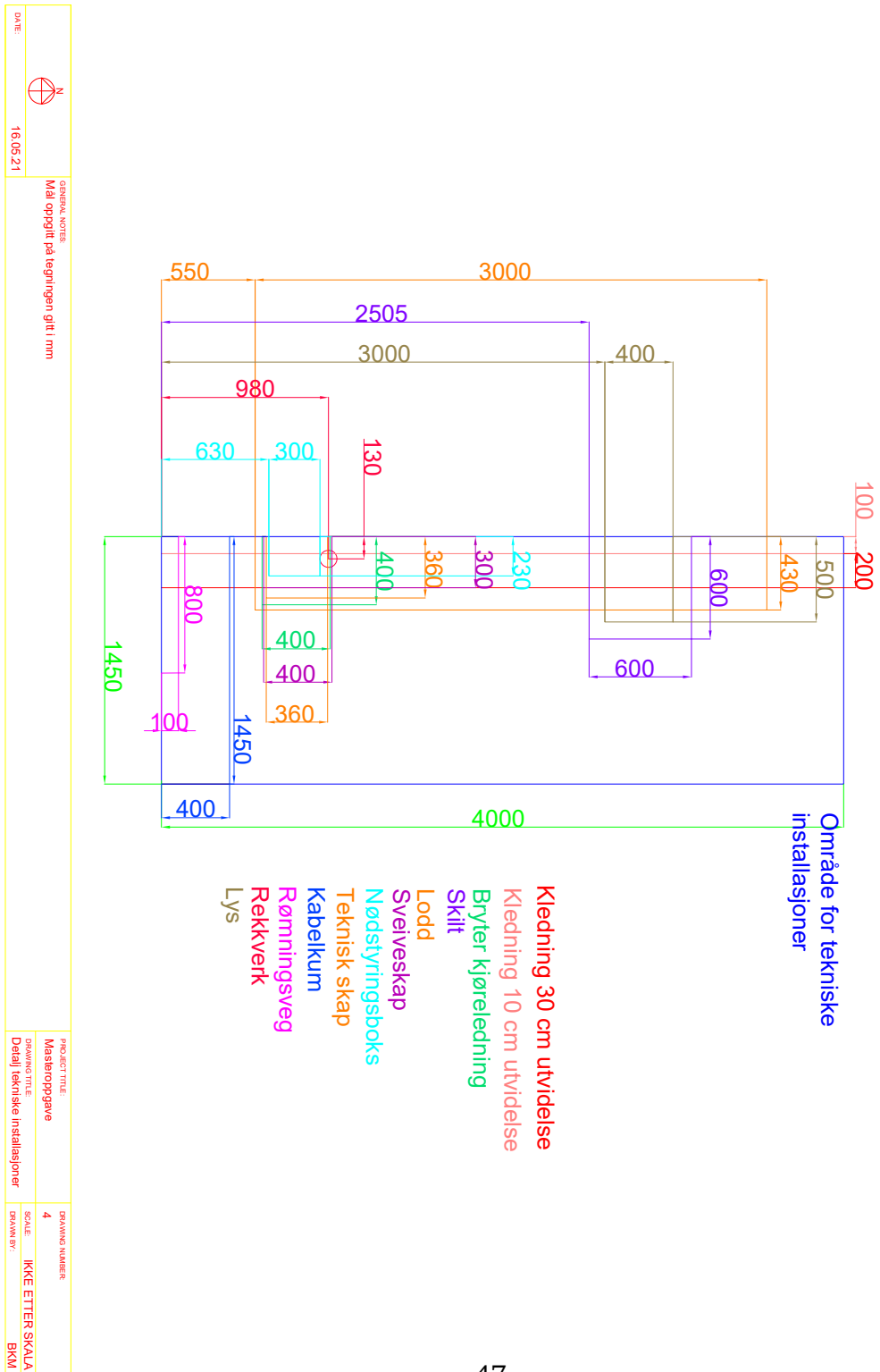
Det ble avdekket under kontroll at de empiriske dataene fra tunnelen Rashølet avvok betraktelig fra byggetegningen, og at tunnelen var bygget med et betraktelig større tverrsnitt enn angitt fra tegningene. Ifølge (Miguel Arestegui 2021) var det overveiende sannsynlighet for at grunnen til at det ble bygget større var på grunn av uforutsette utfordringer i forbindelse med gjennomføringen av prosjektet. Han påpeker at fra entreprenørens side vil det svært sjelden kunne gjennomføres et prosjekt fra A til Å uten å gjøre endringer fra opprinnelig plan, fordi det oppstår komplikasjoner utenfor entreprenørens kontroll. (Christopher Schive 2021) kunne bekrefte at under byggingen av Rashølet tunnel, raste tunnelen - slik navnet tilsier, og dette er et godt eksempel på en uforutsett hendelse som (Miguel Arestegui 2021) peker på. Rashølet tunnelen ble bygget på en utradisjonell måte, med bruk av spuntgrop med overbygg, og dette førte til behov for ytterligere stabilitetssikring i gjenoppbygningen, som igjen førte til det økte tunneltverrsnittet. Utover muntlige kilder finnes det lite dokumentasjon knyttet til denne casen. Videre ble tegningene for Bekkedalshøgda tunnel kontrollert. Her ble det påpekt feil i de empiriske målingene knyttet til oppbygningen av sporkonstruksjonen. Dette ble avdekket fordi konturene til de minste tverrsnittene knyttet til de to sporene har overlappende ytterpunkt. I realiteten skal det være ett gap mellom disse konturene på totalt 300 mm, i tråd med de jernbanetekniske dimensjoneringsreglene for fremføring av rullende materiell i (Bane Nor 2021f). Selv med avvik i målingene knyttet til sporkonstruksjonen har det kommet frem at Bekkedalshøgda dobbeltsportunnel ble bygget med tverrsnitt på $116m^2$, som trolig er svært konservativt, da det er større enn tunneltverrsnitt som bygges i dag. Det store tverrsnittet ble antatt begrunnet med at det ble gjort konservative ekspertvurderinger i prosjekteringen i forbindelse med prosjektet, muligens i forbindelse med trykk- og sug beregninger. Dette ble senere korrigert av (Christopher Schive 2021) som forklarte at det var prosjektet selv om økte tverrsnittet for å lage plass til rømningsveier og annet type kjeft å ha utstyr. Dette var ikke i tråd med de prosjekterendes rapport.

Med teorien om at eldre prosjekterte og bygde tunneler har mindre normalprofil og følgelig mindre tunneltverrsnitt, bygget på historiske data fra (Bane Nor 2020e) og (Bane Nor 2020l), for så å sammenligne de eldre tunnelene med nyere prosjekterte tunneler kan vise seg å være utfordrende med dette empiriske grunnlaget. Da det har vist seg at begge tunnelene i det empiriske grunnlaget er bygget større enn anbefalingene, i tillegg til at noe av datagrunnlaget har avdekket betydelige avvik. Dette kan peke i retning av at det ikke nødvendigvis er hold i teorien om at man bygget mer romslige tunneler tidligere, men dette er vanskelig å si noe konkret om da datagrunnlaget bare består av to caser. Det kan også være så enkelt som at man var litt uheldig i utvelgelsen av tunneler. I tillegg fremstår det som interessant

at det i byggefasen i begge tilfeller ble foretatt endringer som er lite dokumentert i seg selv, og hvor også årsaken er lite dokumentert, dersom dette er et generelt fenomen. Casene ble videre undersøkt og analysert med validiteten til datagrunnlaget i bakhånd.

4.2 Faste komponenter

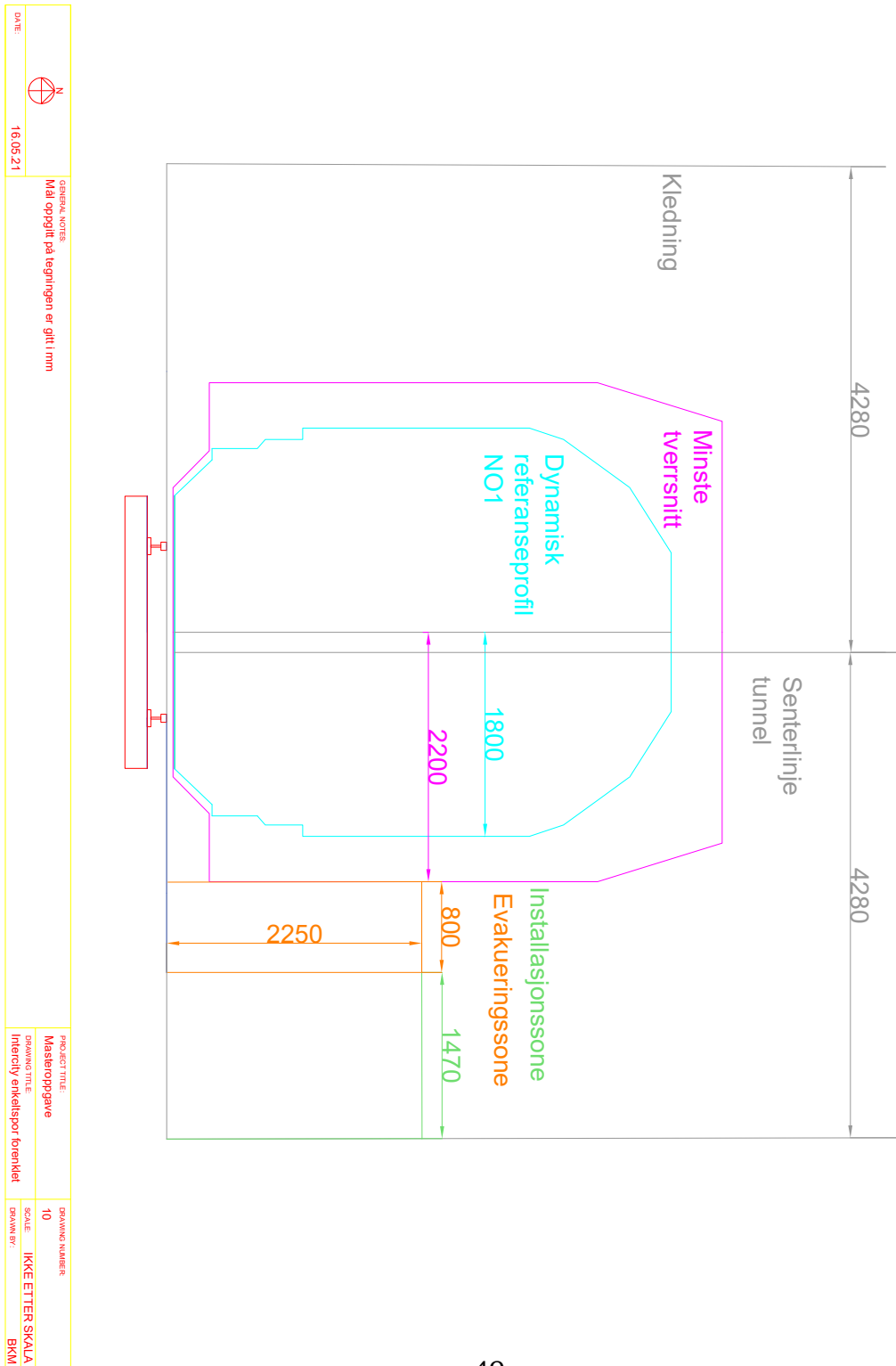
Det ble under ekskursjonen gjort flere kvalitative observasjoner knyttet til de faste komponentene i område for tekniske installasjoner i tunnelene og deres geometriske størrelse og plassering i tverrsnittene. Dette er indikert på figur 16 og 17, i tillegg til detaljtegning av område for tekniske installasjoner for Bekkedalshøgda dobbeltsporetunnel i figur 18. Det bemerkes at det fra tegningene fremstår som de faste komponentene overlapper. Tegningene er tegnet i xz planet, og komponentene får stor fleksibilitet i plassering på kledningen dersom tegningene strekkes ut i y-planet.



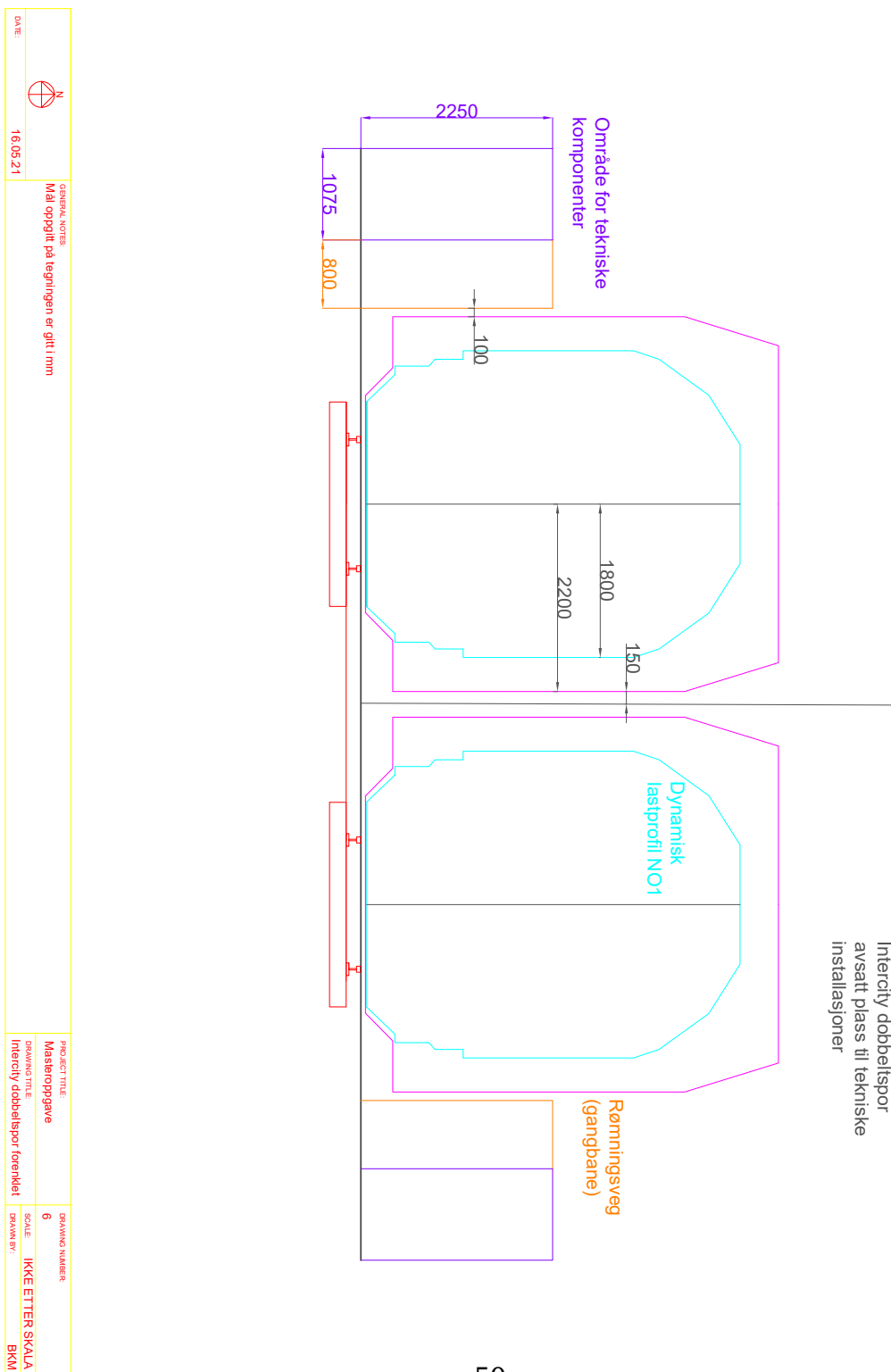
Figur 18: Detaljtegning området for tekniske installasjoner Bekkedalshøgda tunnel

Den første observasjonen knyttet til komponentene i tunnelene, var at man kunne konstatere at Rashølet enkeltsporstunnel hadde betraktelig færre tekniske komponenter enn Bekkedalshøgda dobbeltsporstunnel. Videre ble det observert at enkelte av komponentene i tunneltverrsnittet var betraktelig mer plasskrevende enn andre, og fremstår som kritiske/begrensende for en mulig reduksjon av tunneltverrsnittene. For Bekkedalshøgda tunnel var det kabelkum med horisontale mål på 1450 mm, som hadde det geometrisk mest plasskrevende designet, dernest var rømningsveien på 800 mm den andre mest krevende. Det påpekes også at overbygningen hadde en horisontal avstand på 400 mm utenfor rømningsveien. For Rashølet enkeltsporstunnel var det rømningsvegen med horisontale mål på 800 mm som var mest plasskrevende. Det ble også observert at det var relativt få faste installasjoner som skulle monteres på kledningen over et lengre strekke i tunnelen, og dette ga stor fleksibilitet i plasseringen av faste installasjoner. Det ble også observert at enkelte av de faste installasjonene hadde gjensidig avhengigheter, og ikke kunne defineres som kritiske komponenter i tverrsnittet, da de strengt tatt ikke var nødvendige for å sikre togfremføring. Dette gjaldt komponenter som sveiveskap og kabelkum knyttet til sporveksel i Bekkedalshøgda tunnel.

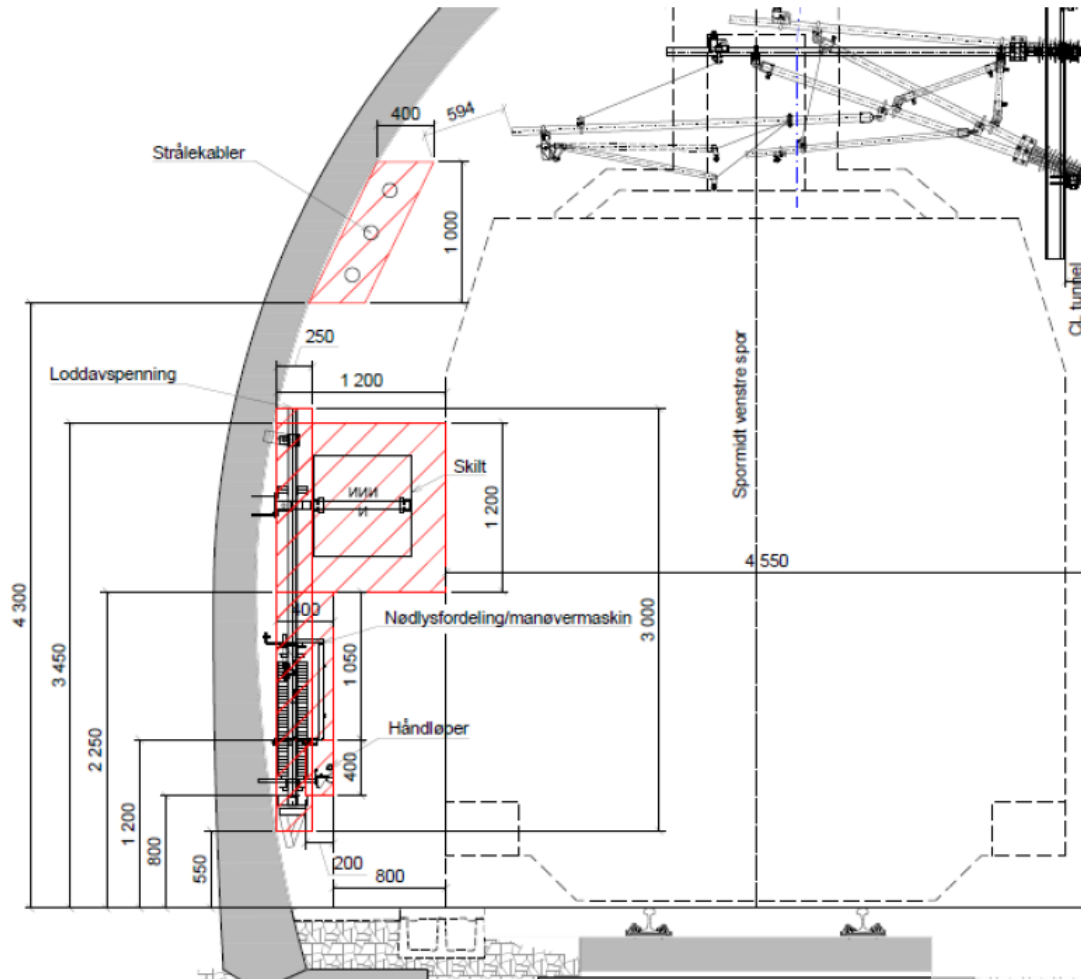
Nye prosjekterte tunneler er her representert gjennom forenklet modell av Intercity-prosjektet i figur 19 og 20. Her skilles det mellom installasjonssone og evakueringsone for de faste installasjonene, hvor installasjoner knyttet til evakuering, som rømningsskilt, håndløper og belysning installeres i installasjonssonen utenfor evakueringssonen. Dette for å unngå hinder i evakueringssonen i henhold til (Bane Nor 2020a). Den totale sonen som kan benyttes for rømning har også blitt betraktelig større for de nyere tunnelene, gjennom at det benyttes anbefalingene i (Bane Nor 2020a) fremfor kravene når det gjelder rømningsgangbane, hvor den anbefalte størrelsen er 1200 mm (dersom tunneltverrsnittet tillater det) og kravet er 800 mm. Dette peker mot at man i større grad enn tidligere prioriterer sikkerhet i tunneltverrsnittet, gjennom at man behandler (Bane Nor 2020a) på en konservativ måte, gjennom at også anbefalingene i regelverket er blitt rådende for dimensjoneringen av tverrsnittene.



Figur 19: Detaljtegning forenklet modell enkeltspor Intercity-prosjektet



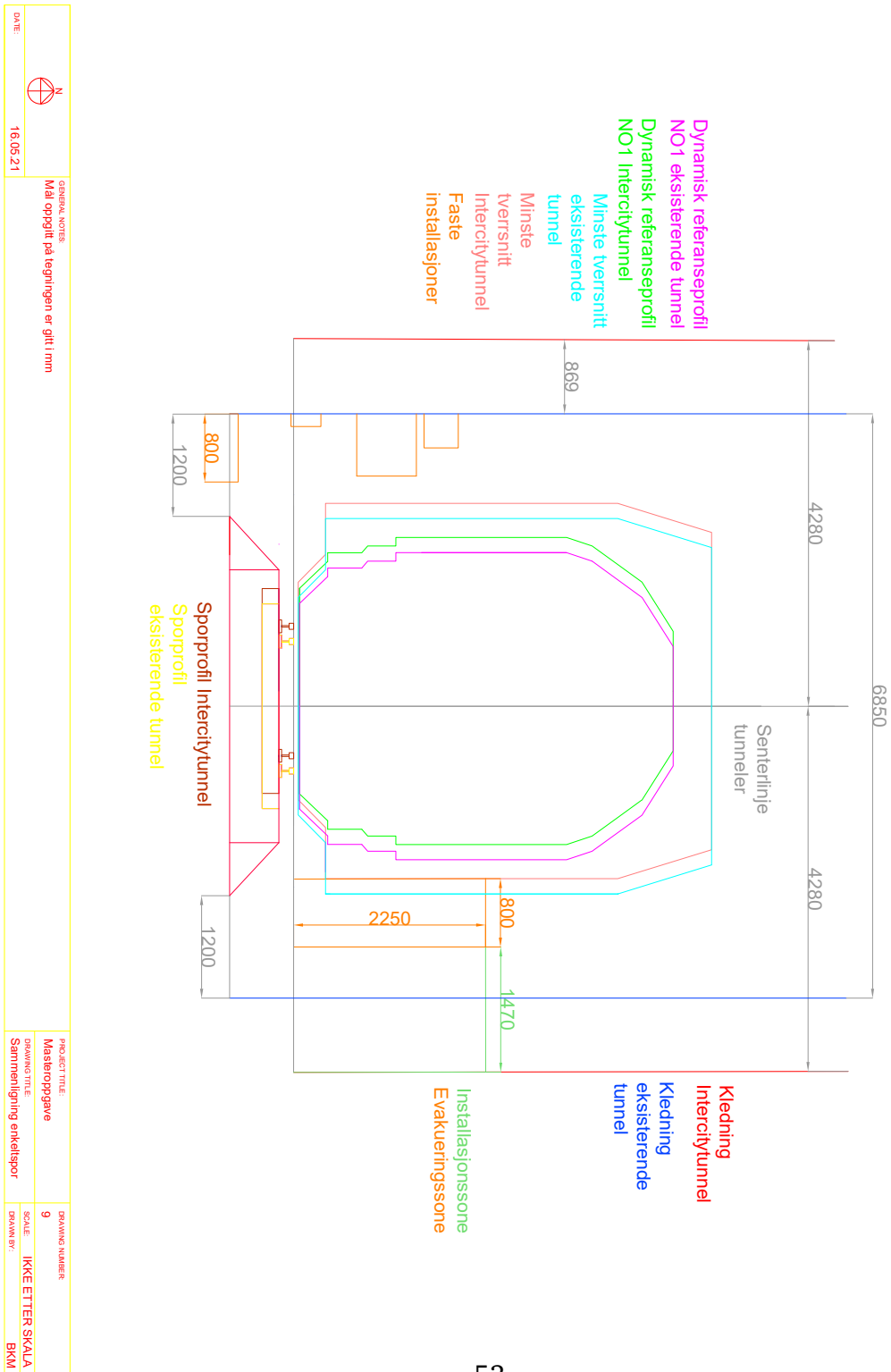
Figur 20: Detaljtegning forenklet modell dobbeltspor Intercity-prosjektet



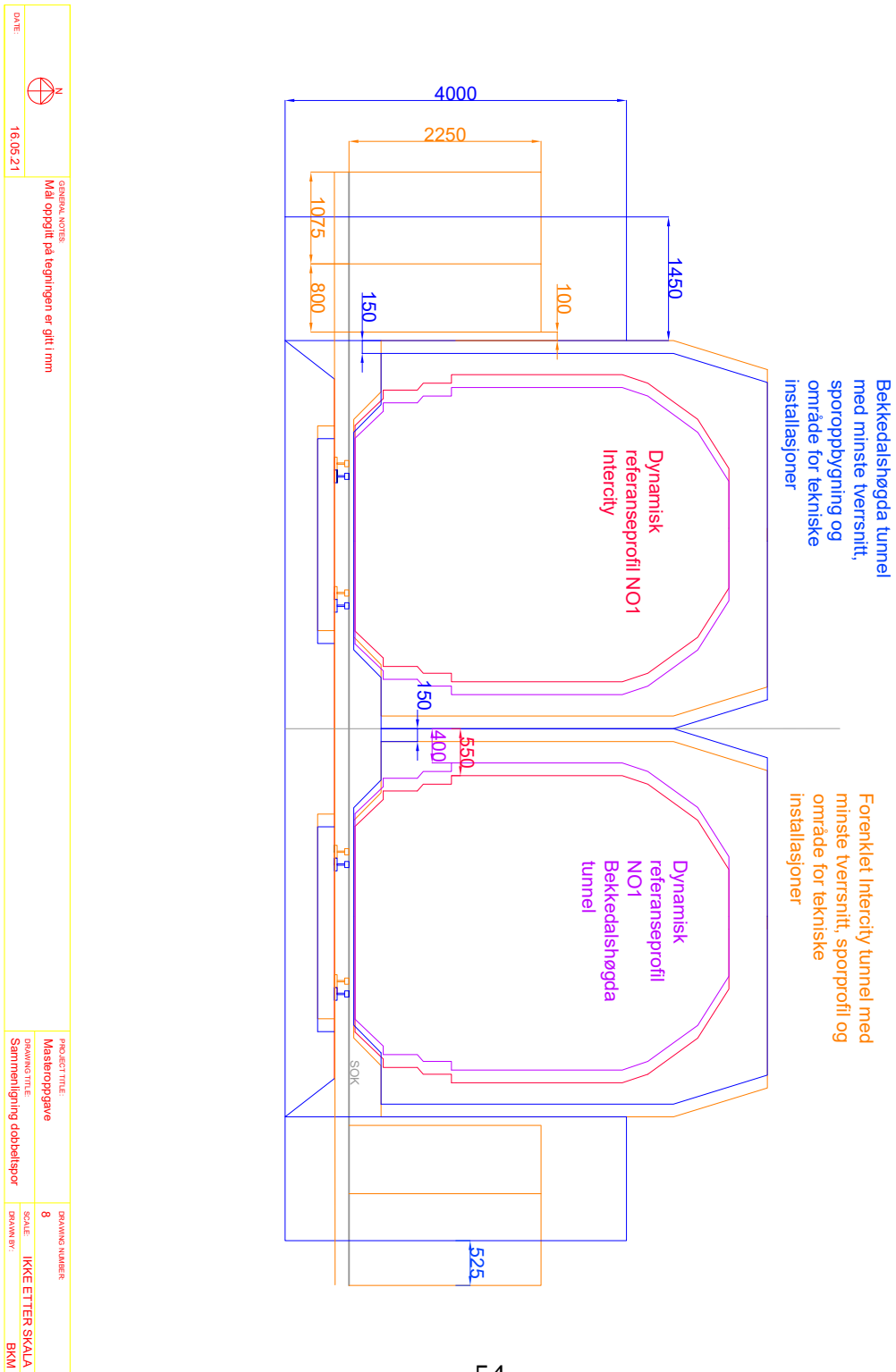
Figur 21: Illustrerer optimalisert tverrsnitt av dobbeltsporstunnel fra Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16

Figur 23 sammenligner Bekkedalshøgda tunnel mot forenklet modell for dobbeltspor fra Intercity-prosjektet. Her observeres det at Intercity-tunnelen har en horisontal lengde på tverrsnittet som er $2 * 525\text{mm}$ (1050mm) større enn Bekkedalshøgda tunnel. Dersom man tar høyde for målingsavviket for sporkonstruksjonen som var på 300mm og ble konstatert i kapittel 4.1, gir dette en horisontal lengde på 850mm . Denne horisontale forskjellen fastslås å komme fra større avstand mellom sporkonstruksjonen og installasjonssonen/evakueringssonen, i tillegg til at installasjonssonen/rømningsssonen er større for Intercitytunnelen. Videre viser figur 22 en sammenligning av Rashølet tunnel mot forenklet modell for enkeltspor

fra Intercity-prosjektet. Her observeres det at Intercity-tunnelen har en horisontal lengde på tverrsnittet som er $2 * 869mm$ ($1738mm$) større enn Rashølet tunnel. Denne horisontale forskjellen kommer utelukkende fra større installasjonssone og evakueringszone for Intercity-prosjektet. Dette kan peke i retning av at evakueringssonen og installasjonssonen har blitt betraktelig større de siste årene. Noe av grunnene til dette som det pekes på som mulige årsaker er at det har blitt rettet et betydelig større fokus mot sikkerhet de senere årene (Trine Bye Sagen 2021), (Christopher Schive 2021), i tillegg til at det ønskes enklere vedlikehold på installasjoner i tunneltverrsnittet som reduserer nedetiden. Eksempel på dette kan være at størrelsen på installasjon+evakueringssonen er stor nok til at man kan vedlikeholde lys med elektrisk lift, mens spor på motsatt side av tunnelen er i drift for å redusere nedetiden for jernbanen (Christopher Schive 2021). Selv med sikkerhetsaspektet i bakhånd kan det stilles spørsmål med hvor mye arbeid som er lagt ned i (Bane Nor 2020h) for å optimalisere sonene knyttet til faste installasjoner og rømning, da kandidaten finner lite dokumentasjon på dette. (Bane Nor 2020c) presenterer analyse og vurdering av redusert tverrsnitt for Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 basert på aerodynamisk analyse. Her vises det at man med dobbeltspor kan oppnå en normalprofil på $83m^2$ mot $93m^2$ som var anbefalingene i Intercityprosjektet. Her observeres det at reduksjonen kommer fra at man har optimalisert evakueringssonen og rømningssonen, gjennom at man har plassert de faste installasjonene, som skal monteres på kledningen innenfor området til rømningsgangbanen på 1200 mm, mens gangbanen på 800 mm er fri illustrert fra figur 21. Det hører med til bildet at en av forutsetningene for tverrsnittsreduksjonen er valg av tunnelkonseptet, hvor det bygges en parallell rømnings- og servicetunnel. Det kan tenkes at dette tilrettelegger for noe av tverrsnittsreduksjonen. Dersom man sammenligner tverrsnittet fra figur 21 med normalprofilet i figur 7 ser man tydelig at tverrsnittet er optimalisert. Dette viser at det i aller høyeste grad kan være mulig å optimalisere fremtidige og eksisterende tunneltverrsnitt. Spesielt ved å se på valg av tunnelkonsept. Det bør stilles spørsmål om det er kostnadmessig forsvarlig å tilegne installasjons og evakuerings sonen så store områder i tverrsnittet, når det er vist at det med enkle grep kan reduseres betraktelig. Et viktig spørsmål å drøfte bør være hvorfor det ikke blir gjort. Det er pekt på beleilighet og kostnad- og tidsaspektet som mulige årsaker. I mange tilfeller har det ikke vært ønskelig å sette inn store ressurser for å optimalisere et tunneltverrsnitt, dersom det eksisterer maler av tunneltverrsnitt fra andre prosjekter, som man vet er tilstrekkelig store. Dette fører til konservative dimensjoner på tverrsnittene. Kandidatens inntrykk er at det i Bane Nor de senere årene har blitt et mye større fokus på optimalisering av løsninger, og at dette vil fortsette videre i fremtiden.



Figur 22: Sammenligning enkeltsporstunnel - ny mot gammel



Figur 23: Sammenligning dobbeltsporstunneler - ny mot gammel

4.3 Valg av sporkonstruksjon

Figur 14 og 15 viser detaljtegning av sporkonstruksjonene til Rashølet enkeltspors-tunnel og Bekkedalshøgda dobbeltsportunnel, figur 17 viser fullstendig tegning av Bekkedalshøgda tunnel, mens figur 16 viser detaljtegning av Rashølet tunnel. Det observeres for Bekkedalshøgda tunnel at skulderen til sporkonstruksjonen har en dimensjon utover det som er anbefalt i Teknisk Regelverk (Bane Nor 2020j). For Rashølet tunnel i figur 14 observeres det en avstand mellom nederste punkt på skulderskråningen og rømningsveg på 400 mm på begge sider av sporet, som ifølge (Stormoen 2016) kan skyldes fremføring av vedlikeholdsmaskiner for ballastet spor. Denne geometriske avstanden er dog lite dokumentert i (Bane Nor 2021f). Fra (Stormoen 2016) kommer det frem at ballastrensverket krever et fritt profil på 2200 mm fra senter av spor for å gjennomføre renseoperasjonene. Videre påpekes det i (Stormoen 2016) at dersom kabelkanalen ligger på løse masser må den frie avstanden økes ytterligere, siden rensverket graver tett inntil kanalen og undergraver fundamentet. Dette er tilfellet for Rashølet og Bekkedalshøgda tunnel som kan være med å forklare hvorfor det er anlagt stor avstand mellom rømningsgangbane og nederste punkt på skulderskråningen. Videre følger sporkonstruksjonen til Rashølet tunnel retningslinjene fra (Bane Nor 2020j) og (Bane Nor 2021e).

Det er vist at ballastfritt spor gir en betydelig slankere sporkonstruksjon fra tunnelprofilene i (Bane Nor 2020h), basert på at man slipper å ta hensyn til skulderbredde, skulderskråning og ekstra fri avstand for vedlikehold. Fra litteraturen er det vist at ballastfritt spor har mange fordeler; lengre levetid og lavere drifts- og vedlikeholdskostnader (Profillidis 2014). I tråd med litteraturen er ballastfritt spor valgt som sporkonstruksjon for tunnelprofilene i (Bane Nor 2020h). Dette er å betrakte som et godt tiltak for å redusere tverrsnittsstørrelsen til tunnelene, dersom det sammenlignes med bruk av ballastet spor, som ville krevd større horisontal plass.

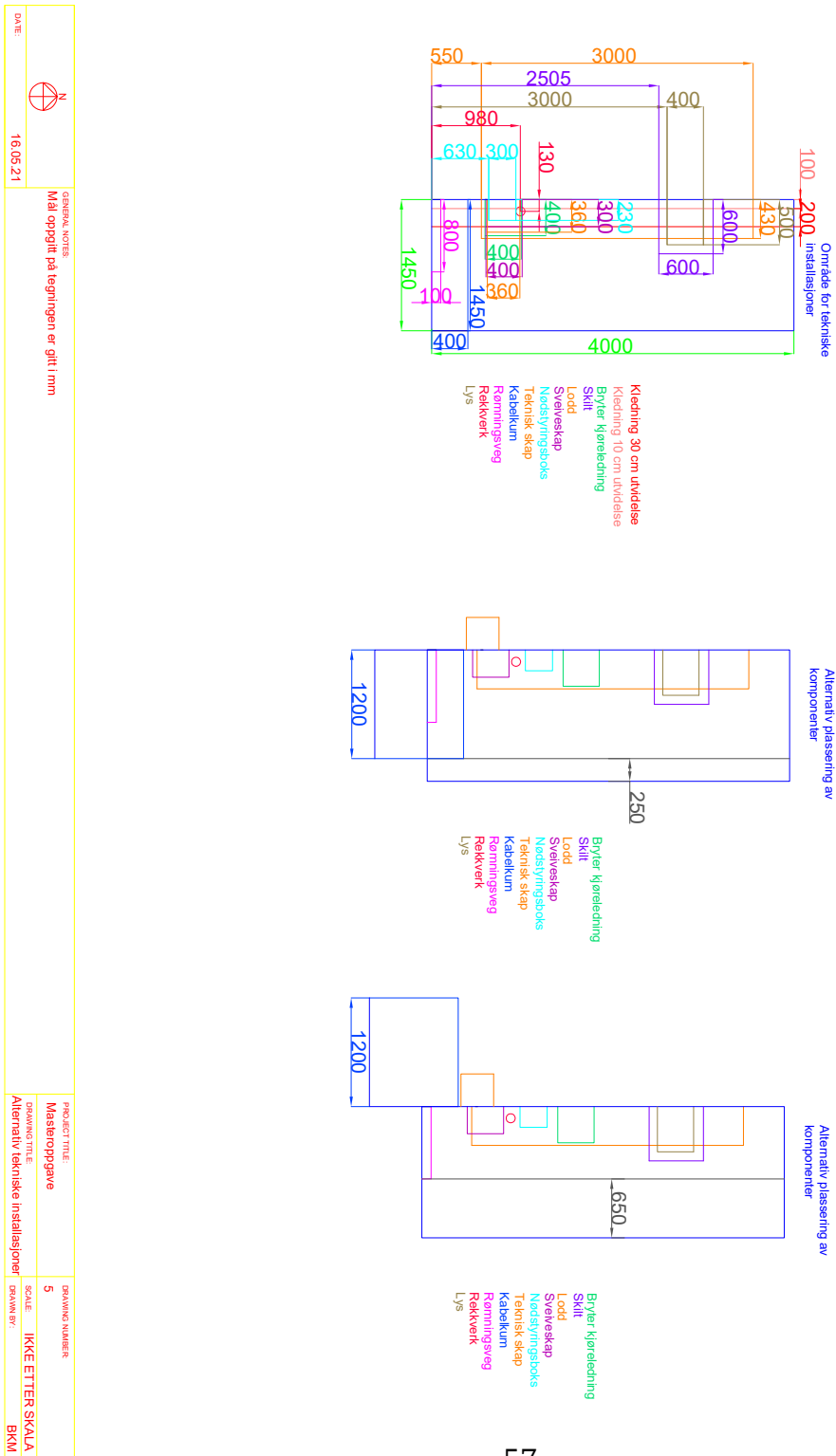
Det bør også drøftes i lys av valg av sporkonstruksjon, hvordan plassbehovet for rømning kan reduseres. For nyere tunneler med ballastfritt spor som overbygningskonstruksjon, er det tilsynelatende ved komprimering av evakueringssonen og installasjonssonen det ligger størst potensiale når det kommer til en mulig reduksjon av tunneltverrsnitt. Det er vist i kapittel 4.2 at disse sonene kan og bør sammenfalle for best mulig utnyttelse av område for tekniske installasjoner. Videre åpner valget av ballastfritt spor for å benytte sporkonstruksjonen som rømningsvei, som foreslått i litteraturen (Bane Nor 2020a), dersom sporkonstruksjonen tilfredstiller kravene til rømningsgangbane, og at bruken av sporkonstruksjonen som rømningsgangbane er beskrevet i prosjektets beredskapsdokumentasjon. Bruken av sporet

som rømningsgangbane representerer ytterligere muligheter for reduksjon av tunneltverrsnittet.

4.4 Undersøkelse av muligheten for reduksjon av tunneltverrsnittene

For enkeltsporstunnel er det diskutert i de øvrige delkapitlene hvordan de faste installasjonene og sporkonstruksjonen spiller inn i størrelsen på tunneltverrsnittet. En reduksjon av den enkeltsporede tunnelen kan være mulig dersom sporkonstruksjonen endres til ballastfritt spor i henhold til teorien. Det kan likevel være problematisk å komprimere tverrsnittet mer enn de eksisterende målene, basert på at det skal være tilstrekkelig fritt areal som følge av aerodynamiske hensyn.

For Bekkedalshøgda dobbeltsporstunnel ble området for tekniske installasjoner undersøkt. I figur 18 vises område for tekniske installasjoner fra Bekkedalshøgda tunnelen. Videre i figur 24 vises endringer som er blitt gjort på området for å undersøke muligheten for å komprimere installasjonene, og følgelig gjøre området for tekniske installasjoner mindre.



Figur 24: Detaljtegning av alternative plasseringer av tekniske installasjoner i området for tekniske installasjoner Bekkedalshøgda tunnel

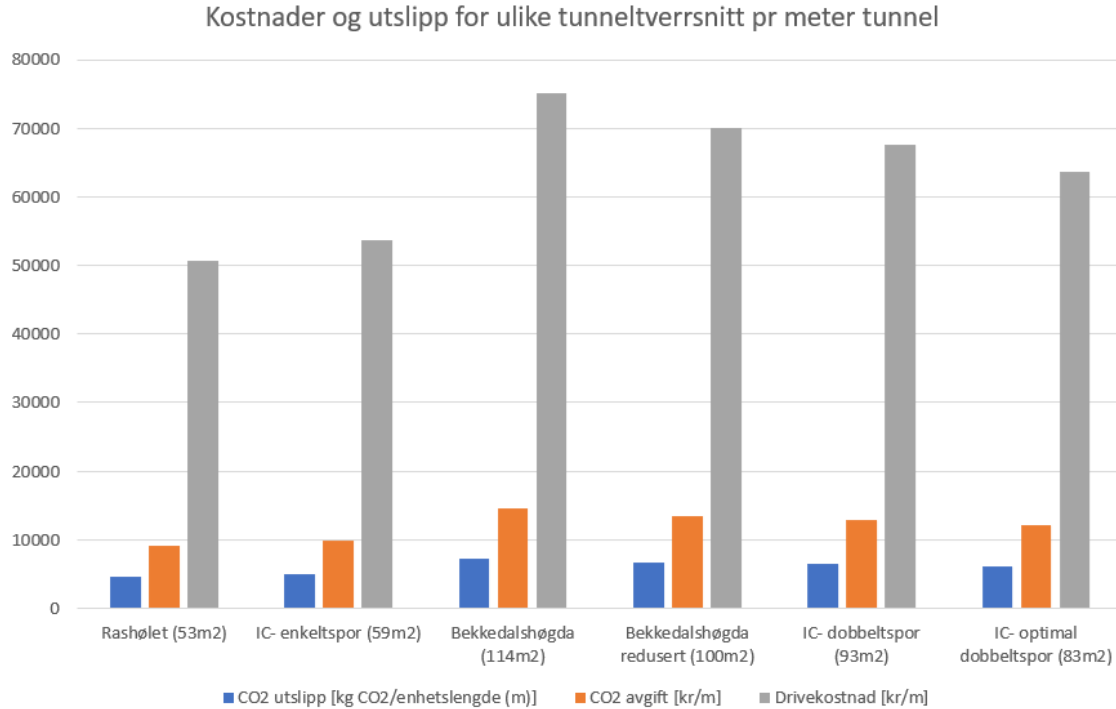
I henhold til identifiseringen av de mest plasskrevende komponentene i tunneltverrsnittet fra kapittel 4.2, ble kabelkummen undersøkt, da denne utgjør den største horisontale størrelsen av de faste komponentene for Bekkedalshøgda. Den er følgelig styrende for den totale horisontale størrelsen på området for tekniske installasjoner for Bekkedalshøgda tunnel. Størrelsen på kabelkum ble foreslått redusert til minimum størrelse 1200 mm i henhold til (Bane Nor 2021c). Dette gir en potensiell reduksjon av området for tekniske installasjoner på 250mm. Videre påpekes det at kabelkum ikke er en absolutt nødvendig komponent i et tunneltverrsnitt, da den er knyttet til valget av sporveksel i tunnelen for Bekkedalshøgda. Kabelkummen kunne vært fjernet dersom det ikke ble anlagt sporveksel i tunnelen, evt. lagt i nisje/bak kledningen. Da det bare er kabelkum i tunnelen i forbindelse med sporveksel, ansees det som lite hensiktsmessig å bestemme tverrsnittsstørrelsen basert på størrelsen til kabelkummene. Dersom kabelkum ble fjernet eller lagt i nisje, kunne man spart 650mm for området for tekniske installasjoner for den aktuelle tunnelen.

Det påpekes at disse undersøkelsene gjelder for en eldre tunnel med en noe uvanlig sporkonstruksjon, da det er sporveksel i tunnelen. Dette betyr at casen ikke nødvendigvis er det beste eksempelet, men det er en god illustrasjon på at det finnes muligheter for å komprimere sonen for faste installasjoner. Det illustrerer også at det ikke er å anbefale å legge sporveksel i tunnel, da dette vil være plasskrevende med bruk av ekstra faste installasjoner for togfremføring.

4.5 Kostnad- og miljøpåvirkning

Resultatene fra modellberegninger med ulike tunneltverrsnitt er presentert i figur 25, hvor blå søyle viser CO^2 utslipp, oransje søyle viser CO^2 avgift og grå søyle viser drivekostnader. Tunneltverrsnittene, som det er gjort beregninger på er valgt basert på tabell 3 gitt i kapittel 3. De empiriske tunneltverrsnittene tidligere presentert i oppgaven, er presentert på søylediagrammet. I tillegg er Bekkedalshøgda tunnel presentert med et redusert tverrsnitt i henhold til reduksjonspotensialet til tverrsnittet, presentert i kapittel 4.4. Det bemerkes også at Rashølet enkeltspors-tunnel ikke er presentert med et redusert tverrsnitt, slik det var angitt i tabell 3, da det ble funnet i kapittel 4.4 at potensialet for en mulig reduksjon var liten. Videre er kjente tverrsnitt fra litteraturen presentert i diagrammet, hvor IC er benyttet som en forkortelse for *Intercity-prosjektet*.

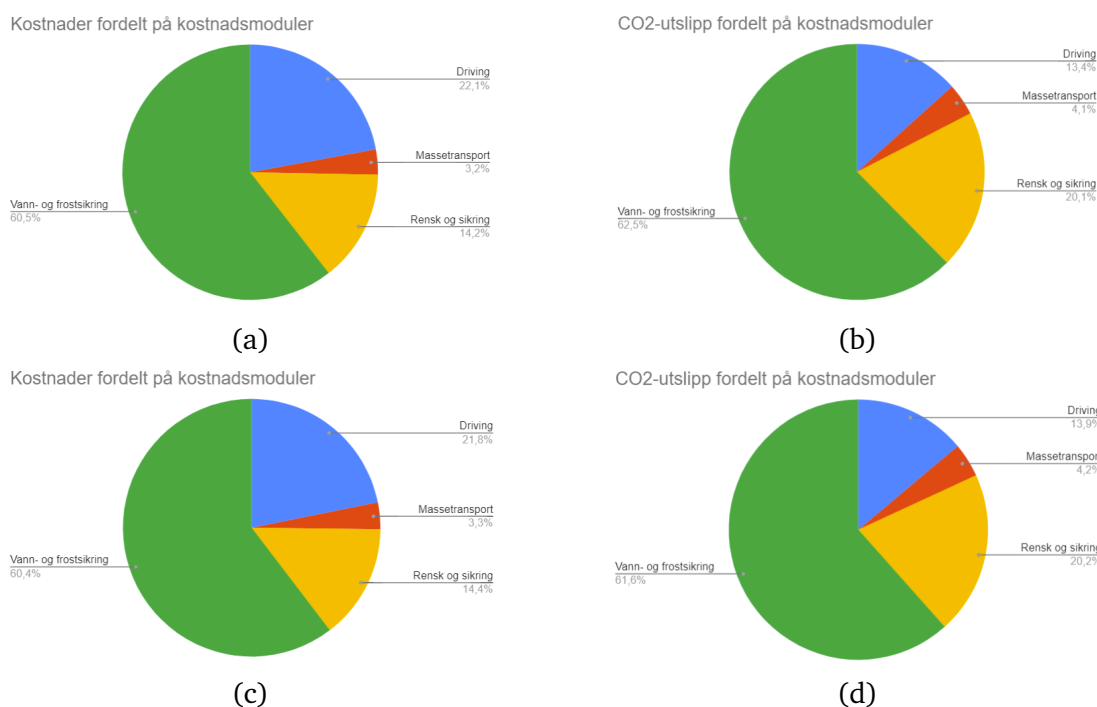
Fra figur 25 observeres det at det er en tydelig sammenheng mellom tverrsnittsstørrelse på tunnelen og drivekostnaden knyttet til den aktuelle tunnelen. Drivekostnaden står for den største delen av kostnadene, mens kostnader knyttet til CO^2 -



Figur 25: Kostnader og utslipp for ulike tunneltverrsnitt pr meter tunnel

utslipp bare representerer en brøkdel av drivekostnadene. Det observeres også at variasjonen i CO_2 -utslipp og kostnader forbundet med utslipp av CO_2 som funksjon av tunneltverrsnittsstørrelse ser ut til å være mindre, sammenlignet med drivekostnaden.

I henhold til teorien fra kapittel 2, er det ventet at drivekostnadene vil variere som funksjon av tunneltverrsnitt. Det påpekes at drivekostnadene sannsynligvis ville variert enda mer dersom det ble benyttet varierte betingelser knyttet til modellparameterne i beregningsmodellen, da spesielt med tanke på variasjon i geologi. Kandidaten mener derfor at resultatene presentert i oppgaven representerer svært forsiktige og konservative beregninger, og at potensialet for ytterligere størrelsesavvik på beregningene for de ulike tverrsnittene er stor, spesielt for søylene knyttet til drivekostnader. Det påpekes også at drivekostnadene er definert med enheten kroner/meter som følgelig betyr at desto lenger tunnel som skal drives, og desto større vil potensialet for besparelser være.



Figur 26: Kostnader og CO^2 utslipp fordelt på kostnadsmoduler, hvor (a) og (b) hører til tverrsnitt $53m^2$, mens (c) og (d) hører til tverrsnitt $59m^2$

Figur 26 presenterer hvordan kostnadene og CO^2 -utslippene er fordelt på de ulike kostnadsmodulene i beregningsmodellen for tverrsnittene Rashølet og IC-enkeltspor, som illustrasjon på modellen. Figur 26 er inkludert for å illustrere observasjoner gjort av kandidaten. Fra figur 26 observeres det at de ulike kostnadsmodulene eller prosesser under drivemetoden, som grovt sett genererer kostnad, er satt til driving, massetransport, rensk og sikring samt vann- og frostsikring. Det observeres at vann- og frostsikring er den største bidragsyteren til både kostnader og CO^2 -utslipp for begge tunneltverrsnittene presentert i figuren, og at de øvrige kostnadsbidragene er svært like for de ulike tunneltverrsnittene. Dette mener kandidaten skyldes at de samme modellparameterne i beregningsmodellen ble brukt for alle tverrsnittene, og at fordelingen av kostnader i så måte oppfattes som rimelig å være prosentvis fordelt rimelig likt, selv om tverrsnittsstørrelsene er forskjellige. Videre observeres det at CO^2 -utslipp fordelt på de ulike modulene har stor prosentvis brøk for vann- og frostsikring og rensk og sikring virker rimelig, da det i henhold til teori benyttes store mengder betong med høyt CO^2 -utslipp på disse punktene. Det observeres at CO^2 -utslippene knyttet til massetransport står for liten del av brøken. Dette sy-

nes kandidaten virket noe lavt, da litteraturen gjerne opererer med oppmot 10% (Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk 2014) av drivekostnadene til masse-transport. Men dette vil igjen være høyst prosjektspesifikt, -og et usikkert tall. I henhold til teori gitt i kapittel 2, kan det være utfordrende å kvalitetssikre fordelingen av kostnads- og CO_2 -utslipp knyttet til de ulike prosessene, grunnet ulike definisjoner knyttet til hva som inngår innenfor de ulike prosessene. Noen steder kan sikring også omhandle frostsikring blant annet.

Selv om deler av resultatene presentert i dette kapitlet må betraktes som noe usikre, støtter kandidaten seg på det faktum at størrelsesordenen til resultatene er riktige. Dette betyr at resultatene er egnet til å belyse størrelsesordenen på besparelsene knyttet til kostnad og CO_2 ved reduksjon av tverrsnittene for konvensjonelt drevne tunneler. I henhold til øvrige opplysninger i kapittel 4.5, vises det til at dersom man har en reduksjon av tunneltverrsnitt i størrelsesordenen $10 m^2$ gir dette en reduksjon av drivekostnader i størrelsesordenen $4000 kr/m$, som igjen kan være betydelig ved større lengder. Det vil for en tunnel på $1 km$, blant annet gi en drivekostnadsreduksjon på $4000 kr/m * 1000m/km = 4000000 kr$. For CO_2 -utslipp gir en tilsvarende reduksjon omtrent $500 kg CO_2$ og $900 kr$ i CO_2 -avgift pr meter tunnel som igjen kan gi en kostnadsbesparelse på $900000 kr$ for en tunnel på $1 km$.

4.6 Valg av tunnelkonsept

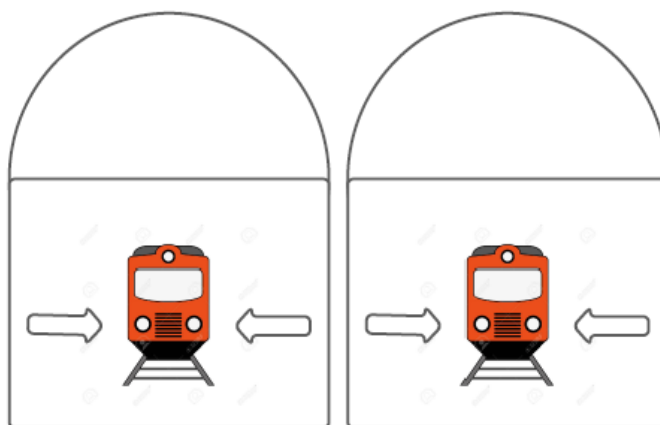
Fra litteraturen kommer det frem at valg av tunnelkonsept er komplisert, og har mange faktorer å hensynta. I tillegg vil tunnelkonseptet være svært styrende for videre utvikling av prosjektet, gjennom valg av drivemetode, sikringsmetode og installasjonsmetode for kledning og andre komponenter. Det ble også presentert i kapittel 2 fordeler og ulemper med de ulike konseptene hvor det kom frem at fordelene og ulempene var omvendt proporsjonale for enkelt- og dobbeltspor. Flere av fordelene/ulempene er direkte knyttet til tverrsnittsarealet gjennom mindre bergoverflateareal for sikring, mindre masser som må fjernes og kortere rømningsveier. Derfor ble det i masteroppgaven drøftet videre hvordan valg av tunnelkonsept påvirket arealet.

Når det kommer til areal kan man fra figur 25 lese tverrsnittsstørrelsene på tunnelene diskutert i masteroppgaven. Det observeres at de enkeltsporede tunnelene har et variasjonsområde fra $[53-59 m^2]$, de dobbeltsporede tunnelene varierer med $[114-93 m^2]$, mens de optimaliserte tverrsnittene varierer med $[100-83 m^2]$. Arealmessig, utelukkende basert på tunneltverrsnittet til hovedløpene, ser man at det er litt å spare på å velge dobbeltsporstunnel fremfor to enkeltsporstunneler for en strekning med dobbeltspor. Valget av tunnelkonsept er også svært avhen-

gig av mange andre faktorer, noe som peker i retning av at både dobbeltspor og enkeltspor er gode alternativer, avhengig av hvilke andre faktorer som spiller inn. Argumentasjonen knyttet til arealbesparelse er ikke nødvendigvis så tungtveiende.

De andre faktorene er som nevnt vanskelig å generalisere, og det er derfor umulig å drøfte hvilket konsept som er best, da de vil være gode på hver sin måte avhengig av prosjektets spesifikke faktorer. Likevel har kandidaten en viktig betraktning å komme med, som i liten grad belyses i litteraturen, knyttet til togets bevegelse i tunneler med dobbeltspor.

Fenomenet illustreres for et dobbeltspor, da de fleste jernbanestrekninger idag

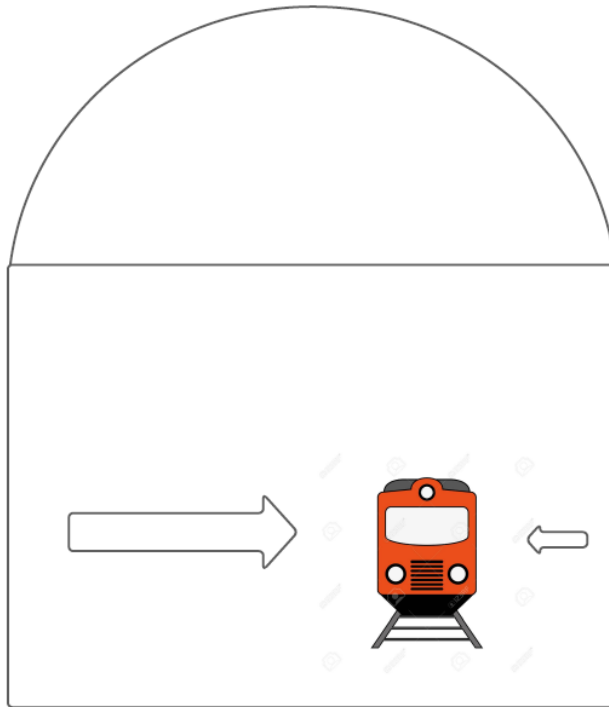


Figur 27: Illustrerer trykkrefter i enkeltsporstunneler

ønskes bygget som dobbeltspor, for økt kapasitet og fremkommelighet. Figur 27 illustrerer tverrsnittet av to enkeltsporstunneler ved to tog i portalåpningen til tunnelene. Fra litteraturen vet man at tog i høy fart opplever store aerodynamiske krefter i form av trykk- og sugkrefter. Dette kommer av den høye farten og utformingen til toget, som må bryte luften mens den kjører på linjene. Ved inngangen til en tunnel vil toget igjen bryte luften, men her vil tunnelveggene begrense hvor luften kan flytte seg, noe som fører til store trykkrefter sideveis mot toget, illustrert med piler i figur 27. For enkeltsporstunnel representerer disse trykkreftene store utfordringer, da sporet som regel er lokalisert omtrent midt i tunnelen og de laterale trykkreftene dermed vil utligne hverandre. Tunnelene blir som nevnt i litteraturen dimensjonert med tilstrekkelig fritt areal i tverrsnittet for å ta hensyn til aerodynamiske betingelser. I tillegg kommer togenes aerodynamiske utforming til

hjelp, for at disse trykkbidragene i liten grad skal påvirker togets fremføringsevne.

For en dobbeltsporstunnel vil fenomenet foregå noe ulikt. Figur 28 illustrerer åp-



Figur 28: Illustrerer trykkrefter i dobbeltsporstunnel

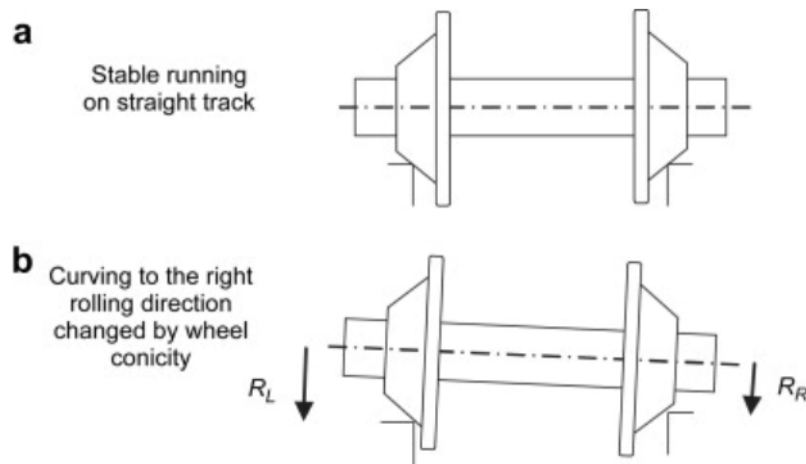
ningen av en dobbeltsporstunnel med tog bare på den ene av de to sporene som går gjennom tunnelen. Her ser man at fordi det ene sporet er åpent vil det være større rom på denne siden av toget til å fortrenge luft, som gir et større trykkbidrag enn for den andre siden av toget. Dette fører til at toget opplever ulikt trykk fra de to sidene i motsetning til hva man ser fra figur 27.

Disse laterale sidekreftene vil gi toget et sideveis dytt som gir togets hjulposisjon en lateral forskyvning. Det er utformingen av togets og sporets hjul-spor interaksjon som muliggjør en slik forskyvning.

Figur 29 illustrerer hvordan hjulakslingen ser ut når den kjører på en rett linje i (a), videre i (b) illustreres det hvordan hjulsettet ser ut når toget er i en høyresving.

Dette skjer som følge av at hjulenes konisitet (rulleradiusen til hjulene reduseres desto lengre ut på akselen man er som følge av hjulenes geometriske form). Siden hjulene er forbundet med akselen, og deres bevegelse er begrenset av skinnene, vil de ligge stabilt med lik rulleradius på en rett linje. I en kurve derimot vil man ha et tilfelle hvor det ene hjulet må bevege seg på den yttergående skinnen, og dermed bevege seg en lengre strekning enn det innerste hjulet. Dette fører til at rulleradiusen til det ytterste hjulet blir større mens det for det innerste hjulet blir mindre. Siden ytterhjulet er begrenset ved kontakt mellom skinne og hjulets flens, styrer ytterhjulet akselen gjennom kurven. Innerhjulet er ikke begrenset og kan bevege seg fritt langs hjulets likevektsposisjon på skinnene. Det motsatte vil skje i en motsatt rettet kurve, mellom disse to kurvene vil det være klotoider, som vil justere rulleradiusen til de to hjulene i henhold til linjegeometrien.

På en rett linje dersom toget opplever lateral forskyvning vil man på samme måte



Figur 29: Illustrerer hvordan styring av hjulakselen foregår som følge av hjulets konisitet. R_L og R_R er rulleradiusen til henholdsvis høyre og venstre hjul (Thompson 2009)

som i en kurve få en større rulleradius på ett av hjulene, som videre må bevege seg lengre. Dette fører til at det ene hjulet øker hastigheten, mens det andre hjulet reduserer farten, slik at hjulsettet som en helhet styres tilbake mot likevektsposisjon på skinnene. Når den treffer likevektsposisjonen, vil hjulene ha en vinkel i forhold til skinnene som gjør at de krysser likevektsposisjonen og fortsetter med avvik fra likevektsposisjonen på den motsatte siden. Dette gir en oscillerende bevegelse som er større ved større initiell forskyvning fra likevektsposisjonen. Ved høyere fart, vil

oscilleringen øke og skape vibrasjoner i toget. Dette vil bli verre og mer ukomfortabelt ved høyere frekvens av flens- og sporkollisjon fra side til side, og ved uhensiktsmessig dempningssystem i toget. Dette fenomenet kalles for sinusgang, hvor hjulene kommer i sinussvingninger mot skinnene.

Den geometriske linjeføringen til jernbanestrekninger lagt i tunnel, er som oftest rette strekker da dette reduserer kompleksiteten i prosjektene, men det kan også legges i kurver. Slik det kommer frem i delkapittelet vil en kurvet linjeføring i tunnel ikke være problematisk, verken for dobbelt eller enkeltspor som tunnelkonsept. Men ved valg av rett linjeføring i en dobbeltsporstunnel kan man slik det er presentert i figur 28 få stor sideveis trykkvariasjon. Dette kan gi en lateral forskyvning og kan trigge sinusgang på linjen, noe som vil føre til betydelige vibrasjoner i toget. Dette fenomenet har man sett i Holmestrandporten (Solberg 2017) og på tunneler i Sverige, hvor løsningen ble å slipe skinnene og hjulene for å redusere konsistiteten til hjulene og angrepvinkelen mellom dem. Man har også sett at det har ført til reduserte hastigheter, for å få bukt med problemet.

Dette fenomenet mener kandidaten i større grad bør vurderes i valg av tunnelkonsept, da det er vist i oppgaven at det er mindre arealmessige forskjeller mellom å velge to enkeltsporstunneler kontra en dobbeltsporstunnel på jernbanestrekninger med dobbeltspor, selv om det også er vist i oppgaven at mindre arealmessige forskjeller også kan ha innvirkning på kostnader og miljø knyttet til byggingen av tunnelen. Man har fra tidligere erfaring sett at det er svært tidkrevende og kostbart å fikse problemer knyttet til sinusgang i ettertid. Det må gjennomføres betydelige analyser på banen med målevogn, dempningssystemene til togene må konfigureres og kontrolleres på ny, samt at det må gjennomføres sliping av tog og skinner på nye baner, som i utgangspunktet ikke burde kreve den type vedlikehold rett etter åpning. I tillegg til at det vil være svært kostnadskrevende for samfunnet å kjøre med redusert kapasitet og hastighet frem til problemet er ordnet. Det kan derfor stilles spørsmålstegn knyttet til hvor mye man eventuelt klarer å spare på å bygge dobbeltspor kontra to enkeltspor. Den kjente problematikken knyttet til sinusgang kan føre til betydelige kostnader, som kandidaten tror i mange tilfeller kan overstige de initielle investeringskostnadene knyttet til prosjektene i det lange løp.

4.7 Dokumentasjon av prosjektering

Fra tidlig stadium av prosjektet var det tydelig for kandidaten at oppgavens tema favnet bredt, og omfattet veldig mange forskjellige fagfelt med høy kompleksitet. Det opplevdes som krevende å sette seg inn i mange fagfelt og spesielt i enkelte fagfelt hadde man lite forkunnskaper. Under prosjektering av jernbaneanlegg vil det

på samme måte være mange ulike fagkompetanser som møtes rundt bordet for å prosjektere anlegget. Kandidaten har under arbeid med oppgaven opplevd hvordan høy kompleksitet og tverrfaglighet kan ha bidratt til utfordringer knyttet til prosjektering av jernbane, og ser dette i sammenheng med hvordan prosjekteringen egner seg for optimalisering av tunneltverrsnitt. I den forbindelse ser kandidaten spesielt tre utfordringer:

- uorganisert regelverk og litteratur
- fagmiljøenes tunnelsyn
- dokumentasjon og begrunnelser av prosjekteringsvalg

Som beskrevet i litteraturen i kapittel 2, forholder jernbanen seg til Teknisk Regelverk med tilhørende regler og krav innenfor de ulike fagfeltene. Det finnes også mye støttelitteratur i veiledere, prosesskoder, europeiske standarder, samt en mengde dokumentasjon og utredninger knyttet til diverse prosjekterte og bygde jernbaneanlegg. I tillegg finnes det en digital lærebok knyttet til jernbaneteknikk, opprettet av Bane Nor i (Bane Nor 2020e) . Mengden informasjon på ulike plattformer fremstår som ustrukturert og lite brukervennlig for kandidaten. Med en så stor mengde informasjon å forholde seg til, hvor en del av opplysningene i materialet ikke var samsvarende, var det utfordrende for en uerfaren student å jobbe med prosjektet. Kandidaten tenker at regelverket, med tilhørende støttelitteratur og dokumenter, med fordel kan gjøres mer entydig. I samtaler med fagmiljøet kom det fram at regelverket kan være utfordrende å manøvrere i selv for de mest erfarne. Det kom frem at fagmiljøene har ulik struktur på materialet sitt avhengig av fagmiljøets fleksibilitet knyttet til prosjekteringen, dette skaper også utfordringer for utenforstående. I tillegg har kandidaten i gjennom prosjektet sett at de faktisk bygde konstruksjonene avviker fra kravene og anbefalingen gitt i regelverket, i mange tilfeller. Kandidaten applauderer at regelverket er romslig med både krav og anbefalinger som i stor grad tilrettelegger for optimalisering av en rekke konstruksjonselementer. Eksempler på dette er presentert i litteraturen. Kandidaten påpeker at man ved å ha et mindre rigid regelverk også i noe grad åpner for at regelverket fremstår som uryddig ved at regelverket i stor grad er åpen for tolkning og kan føre til at ulik informasjon distribueres ulike steder. Videre er regelverk i nåtid også en problemstilling, da det for mange tunnelprosjekt ikke vil være de samme reglene og forutsetningene som var gjeldende ved bygging som er gjeldene for tunnelen i dag.

Videre i samtaler med fagmiljøene fremstod det som at fagmiljøene var mest opp-tatt av sine egne fagfelt og i mindre grad hadde kunnskap om andre aspekter ved anleggene. Med dette mener jeg at begrepet tunnelsyn er relevant. Da det i flere samtaler fremstod som at enkelte fagfelt manglet synet av det store bildet, og dermed lukket øynene for det som foregår på sidelinjen. I tillegg kom det frem i

samtaler med fagpersonene at fagmiljøene er veldig glad i plass til sine egne konstruksjoner, spesielt for å tilgjengeliggjøre og gjøre vedlikehold lettere. På denne måten mener kandidaten at optimalisering av tunneltverrsnittene vanskeliggjøres. Da det i samtaler var en tydelig skepsis mot å redusere plassområdene tiltenkt de enkelte fagmiljøene, da dette vanskeliggjør vedlikehold og installasjon. Dette betyr at fagmiljøene i stor grad er pådrivere mot å gi sine installasjoner mer plass, og at det i mindre grad er interesse for å redusere områdene. Det er med andre ord mange pådrivere mot å ha stor plass i tunneltverrsnittene, mens det er få som ønsker å redusere plassen. Dette tror kandidaten kommer av at kostnadene knyttet til den totale tverrsnittsstørrelsen i liten grad er synliggjort, og at fagmiljøene ikke er bevisst på dette aspektet av prosjekteringen. På denne måten håper kandidaten at beregninger gjort i denne oppgaven kan bidra til å synliggjøre fordelene ved å optimalisere plassbehovet, for å spare kostnader.

Det har gjennom arbeidet med oppgaven blitt tydelig for kandidaten at det har vært utfordrende å finne dokumentasjon knyttet til valg foretatt i forbindelse med prosjektering av jernbanetunneler, i tillegg til dokumentasjon knyttet til krav gitt i Teknisk Regelverk. Dette finnes det flere eksempler på gjennom masteroppgaven. I samtaler med fagmiljøet kommer det frem at mye av dokumentasjonen er utilgjengelig for kandidaten og fagmiljøet (dokumentasjonen er arkivert internt), i tillegg til at det ved spørsmål knyttet til det matematiske dimensjoneringsgrunnlaget henvises til *faglige vurderinger* som ikke er tilgjengelig. Kandidaten erfarer at dokumentasjon knyttet til prosjekteringen av jernbanetunneler er lite tilgjengelig og lite dokumentert. Dette mener kandidaten bidrar til at det er vanskelig å hente erfaringer fra tidligere arbeid, som igjen i liten grad tilrettelegger for optimalisering av tunneltverrsnittene. I samtaler med fagmiljøene knyttet til tunnel hos Bane Nor bekreftes det også at det i mange tilfeller ikke er lagt inn noe arbeid knyttet til optimalisering av tunneltverrsnittene, da det brukes eksisterende tunneltverrsnitt fra tidligere prosjekterte tunneler som man vet er store nok. Dermed vil det være konservative tverrsnitt for nye tunneler som ikke legger til rette for optimalisering av fremtidige tunneler. Kandidaten ønsker å understreke utfordringen knyttet til dette, da tunnelprosjekt i aller høyeste grad er unike, og at det ved dårlig dokumentasjon knyttet til prosjektering kan oppstå utfordringer ved gjenbruk av tverrsnitt.

5 Konklusjoner og videre arbeid

5.1 Konklusjoner

- I hvilken grad er dagens prosjekteringsmetode egnet for optimalisering av tunneltverrsnitt?

Dagens prosjekteringsmetode ble funnet i liten grad å være egnet for optimalisering av tunneltverrsnitt. Dette på grunn av jernbanetunneler sin generelle kompleksitet knyttet til at det er mange forskjellige fagdisipliner som skal bidra i prosjekteringen. Det er følgelig utfordringer knyttet til kommunikasjon, samarbeid, et komplisert og omfattende regelverk, og generell skepsis knyttet til optimalisering av komponenter i tunneltverrsnittet. Fagdisiplinenes ønske om størst mulig tverrsnitt knyttet til sine komponenter har bakgrunn i ønkse om lettere installasjon og vedlikehold. Videre er det funnet at belysning av gevinsten av optimalisering av tunneltverrsnitt når det kommer til kostnads- og miljøaspekter er svært viktig å få frem tydelig til alle fagfelt.

- Hvilke tiltak kan potensielt gjøres i utformingen av tunneltverrsnittet for å redusere tunneltverrsnittstørrelsen?

Det ble funnet flere aspekter ved tunneltverrsnitt som kan optimaliseres og følgelig gi reduksjon av tverrsnittet. I tråd med foregående forskningsspørsmål er det her viktig at fagfeltene møtes for å finne gode løsninger, da en størrelsesreduksjon av en komponent får ringvirkninger for det totale tverrsnittet og deres komponenter. Det ble funnet at rømningsvei var komponenten som hadde størst reduksjonspotensiale, i tillegg til at valg av ballastfritt spor som sporkonstruksjon ble funnet å gi et slankere tverrsnitt. Reduksjonspotensialet til rømningsveien hang sammen med optimalisering av tverrsnittsområdene for faste installasjoner- og evakuering, da det ble funnet at disse med fordel bør kombineres for å gi et slankere tverrsnitt.

- Hvordan vil en reduksjon av tverrsnittstørrelsen til jernbanetunneler påvirke drivekostnadene til tunnelprosjekter, samt kostnader og miljøavtrykk til tunnelene knyttet til utslippene av CO_2 ?

Det ble funnet at en tverrsnittsreduksjon i størrelsesorden $10m^2$ gir en reduksjon av drivekostnader i størrelsesorden 4000 kr/m tunnel, mens kostnadene knyttet til CO_2 tilsvarer en reduksjon på omtrent 500 kg CO_2 /enhetslengde (m). Avgiftene knyttet til CO_2 -utslippet for samme reduksjon ble funnet til å være 900 kr /enhets-

lengde (m). Det ble også funnet at disse summene utgjør betydelige kostnader og mengder ved å se på tunnellengder fra noen hundre meter til flere km.

5.2 Videre arbeid

Prosjektet hadde et begrenset datagrunnlag med empiriske data fra to tunneler, og relativt få dokumenter til dokumentanalysen. Med lite empiriske data er det stor usikkerhet knyttet til resultatene av de modellerte tunneltverrsnittene. Dette er også blitt påpekt i kapittel 4, hvor det ble avdekket unøyaktigheter i målingene som ble foretatt. Av tverrsnittsmålinger ble det bare foretatt horisontale målinger av tunneltverrsnittet og videre antatt geometrisk form på tunneltverrsnittet. For videre arbeid bør det bli gjort lasermålinger av hele tunneltverrsnittet for å få en mer korrekt modell.

Videre bør beregningsmodellen benyttet i prosjektet forbedres og videreutvikles. Modellen har flere forenklinger og antagelser og det bør gjøres et arbeid for å kvalitetssikre forutsetningene rundt modellen. Det gjelder, spesielt med tanke på inputdataene i kostnadsmodulene som består av empiriske gjennomsnittstall og allerede anerkjente modeller for kostnadsestimering. Videre bør modellen videreutvikles til å inkludere flere drivemetoder, tunnelkonsept og vann- og frostsikringsmetoder. Til sist bør det gjøres et arbeid knyttet til å validere resultatene i modellen opp mot tall fra virkelige prosjekter.

Det ble funnet i prosjektet at det tverrfaglige arbeidet i jernbanesektoren kan være en stor barriere for arbeid med optimalisering av tunneltverrsnitt. Det bør derfor gjennomføres studier knyttet til prosjektorganisering, med fokus på ledelse og styring i gjennomføringsfasen for å undersøke om det finnes tiltak for å fjerne utfordringer knyttet til tverrfaglige arbeidsområder.

Det er vist fra prosjektet at dimensjoneringsmetoden ikke er optimal, og at dette kan være noe av årsaken til hvorfor tverrsnittsoptimalisering og reduksjon har vist seg å være vanskelig. Det bør gjøres en utvidet kvalitativ analyse for å undersøke flere årsaker og årsakssammenhenger knyttet til disse utfordringene på en systematisk måte, med standardiserte spørsmål og omfattende mengde kvalitative data. Dette er ikke blitt gjort i dette masterprosjektet.

I prosjektet ble områdene for evakuering og faste installasjoner foreslått kombinert til en felles sone for å redusere plassbehovet. Det bør gjøres analyser av evakuering scenarier for å verifisere at den foreslåtte plassreduksjonen for evakuering er mulig og forsvarlig i praksis.

Fenomenet knyttet til sinusgang i tunneler som følge av valg av dobbeltspor som tunnelkonsept ble diskutert i kapittel 4. Det bør gjøres omfattende aerodynamiske analyser for å kartlegge aerodynamikkens kraftbidrag for de utvalgte tunnelkonseptene og undersøke hvilke tiltak i dimensjoneringsveilederen som bør følge av dette.

Bibliografi

- Abdi, A. & Ghanbarpour, A. (2014), 'Is there an optimum internal diameter for subway tunnels in terms of economic and technical viewpoint?', *Journal of Rail and Rapid Transit* **230**(1), 56–63. DOI: 10.1177/0954409714526172.
- Anderson, E., Berg, M. & Stichel, S. (2014), 'Rail Vehicle Dynamics'. Kompendium. KTH. Stockholm: Avd. för Spårfordon.
- Baklien, M. & Moi, V. (2018), 'Fordeler og begrensninger for TBM kontra konvensjonell driving av E39-tunnel under Romsdalsfjorden', Masteroppgave. NTNU i Trondheim. Tilgjengelig fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2563263?locale-attribute=en>. Hentet: 2020-12-11.
- Bane Nor (2015a), 'Prosesskoder', Tilgjengelig fra: https://www.banenor.no/contentassets/cae963d827a041b3a8f6d1cc94bf4fe9/prosesskoder_beskrivelse_012017.pdf. Hentet: 2020-12-03.
- Bane Nor (2015b), 'Ved et tidsskille', Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/Nyheter/Nyhetsarkiv/2015/ved-et-tidsskille/>. Hentet: 2020-12-11.
- Bane Nor (2018), 'Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 (FRE16) - Sandvika - Sundvollen - Detaljplan/teknisk plan - Strekning 1'. FRE-10-A-25300. Bane Nor: Oslo.
- Bane Nor (2020a), '5 Krav til samtrafikkevne (interoperabilitet)', Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Felles_bestemmelser/Generelle_bestemmelser. Hentet: 2020-03-01.
- Bane Nor (2020b), 'Bane Nors prosjekteringsveileder', Tilgjengelig fra: <https://proing.opm.jbv.no/wiki/start>. Hentet: 2020-03-01.
- Bane Nor (2020c), 'Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 (FRE16) - TK-00 Generell, Vurdering av redusert tverrsnitt - Aerodynamisk analyse, Jong -Sunnvollen'. FRE-00-A-30118. Bane Nor: Oslo.
- Bane Nor (2020d), 'Jernbanekompetanse - Sporets trasé/Minste tverrsnitt og profiler', Tilgjengelig fra: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Tunnel/Utforming_av_tunnelprofiler. Hentet: 2020-09-15.

- Bane Nor (2020e), 'Jernbanekompetanse - Tunneler/Utforming av tunnelprofiler', Tilgjengelig fra: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Tunnel/Utforming_av_tunnelprofiler. Hentet: 2020-09-15.
- Bane Nor (2020f), 'Kriterier for valg av tunnelkonsept', Tilgjengelig fra: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Kriterier_for_valg_av_tunnelkonsept. Hentet: 2020-12-03.
- Bane Nor (2020g), 'Network Statement - Infrastruktur', Tilgjengelig fra: <http://networkstatement.jbv.no/doku.php?id=ns2021no:infrastruktur>. Hentet: 2021-04-19.
- Bane Nor (2020h), 'Teknisk designbasis for Intercity', Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/contentassets/54b785617e5f40cd83c885f66434f677/teknisk-designbasis.pdf>. Hentet: 2020-10-31.
- Bane Nor (2020i), 'Teknisk Regelverk - Arbeider foran stuff og stabilitetssikring', Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Tunneler/Prosjektering_og_bygging/Arbeider_foran_stuff_og_stabilitetssikring#Betongsegmenter. Hentet: 2020-10-15.
- Bane Nor (2020j), 'Teknisk Regelverk - Overbygning/Prosjektering/Ballast', Tilgjengelig fra: <https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Ballast>. Hentet: 2021-04-19.
- Bane Nor (2020k), 'Teknisk Regelverk - Portaler og vannsikring', Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Tunneler/Prosjektering_og_bygging/Portaler_og_vannsikring. Hentet: 2020-10-15.
- Bane Nor (2020l), 'Teknisk Regelverk - Profiler og minste tverrsnitt', Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Profiler_og_minste_tverrsnitt. Hentet: 2020-10-15.
- Bane Nor (2020m), 'Underbygning - Regler for prosjektering og bygging', Tilgjengelig fra: <https://trv.banenor.no/PDF/Underbygning/520/t20-0511.pdf>. Hentet: 2020-09-15.
- Bane Nor (2020n), 'Veileder for valg av tunnelkonsept', Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Veileder_for_valg_av_tunnelkonsept. Hentet: 2020-12-03.

- Bane Nor (2021a), 'Jernbanekompetanse - Tunneler/Driving og stabilitets-sikring', Tilgjengelig fra: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Tunnel/Driving_og_stabilitetssikring#Konvensjonell_driving. Hentet: 2021-04-19.
- Bane Nor (2021b), 'KS2 av Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16', Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/4bb41e99882b4ef7b1ec5aca720ad222/ks2-fre16-delrapport-referansesjekk.pdf>. Hentet: 2021-04-19.
- Bane Nor (2021c), 'Teknisk Regelverk - Felles elektro/Prosjektering og bygging/Kabellegging og kabelkanaler', Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Felles_elektro/Prosjektering_og_bygging/Kabellegging_og_kabelkanaler. Hentet: 2021-04-19.
- Bane Nor (2021d), 'Teknisk Regelverk -Forside', Tilgjengelig fra: <https://trv.banenor.no/wiki/Forside>. Hentet: 2021-02-26.
- Bane Nor (2021e), 'Teknisk Regelverk - Overbygning/Prosjektering/Sporkonstruksjoner', Tilgjengelig fra: <https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Sporkonstruksjoner>. Hentet: 2021-03-05.
- Bane Nor (2021f), 'Teknisk Regelverk -Tunneler', Tilgjengelig fra: <https://trv.banenor.no/wiki/Tunneler>. Hentet: 2021-02-26.
- Bane Nor (2021g), 'Teknisk Regelverk - Underbygning/Prosjektering og bygging/Drenering', Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Drenering. Hentet: 2021-04-19.
- Bane Nor (2021h), 'Teknisk Regelverk -Underbygning/Prosjektering og bygging/Profiler og minste tverrsnitt/Vedlegg/Profiler', Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Profiler_og_minste_tverrsnitt/Vedlegg/Profiler. Hentet: 2021-04-19.
- Chandra, S. & Agarway, M. (2007), *Railway Engineering*, India: Oxford University Press.
- Christopher Schive (2021), 'Ingeniør Bane Nor'. Teams-møte. 2021-05-19.
- Esveld, C. (2001), *Modern Railwat Track*, The Netherlands: MRT-Productions.

- Høifors, C. O. (2012), 'Effektivisering av BIM-basert jernbaneprosjektering, med utgangspunkt i Ski stasjon', Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet. Tilgjengelig fra: https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/232035/565907_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Hentet: 2020-03-01.
- Iwniki, S. (2006), *Handbook of Rail Vehicle Dynamics*, New York: CRC Press - Taylor Francis Group.
- Jakobsen, P. D. (2015), 'An introduction to tunnel boring machines (tbms) for various ground conditions - *Trial lecture NTNU*', Utskrift. Hentet: 2020-12-06.
- Jernbanedirektoratet (2019), 'Strategi for forskning og utvikling', Tilgjengelig fra: https://www.jernbanedirektoratet.no/contentassets/0aebfffa9e29492d89c4fc0cbed4d359/fou-strategi_2020-2022.pdf. Hentet: 2021-02-26.
- Jernbaneverket (2016), 'Risikovurderingsrapport - Endring NO1 Profil - Endring av det dynamiske referanseprofilen for rullende materiell på JBV's sporanlegg'. RA-2016-2173. Jernbaneverket: Oslo.
- Jing, G., Aela, P., Fu, H. & Esmaili, M. (2020), 'Numerical and experimental analysis of lateral resistance of block sleepers on ballasted tracks', *International Journal of Geomechanics* **20**(6), 1–9. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001689.
- Johnson, D. M. (2007), 'Gauging the capability of the british railway network'. London: Future Rail Research Centre, Imperial Collage. DOI: 10.1243/09544097JRRT142.
- Løhren, A. H. (2019), 'Structure gauge/loading gauge', *TBA4225 Jernbaneteknikk grunnkurs*, Tilgjengelig fra: https://ntnu.blackboard.com/ultra/courses/_17404_1/cl/outline. Hentet: 2020-10-16.
- Meld St. 33 (2016-2017) (2017), 'Nasjonal transportplan 2018-2029', Oslo: Samferdselsdepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/7c52fd2938ca42209e4286fe86bb28bd/no/pdfs/stm201620170033000dddpdfs.pdf>. Hentet: 2021-02-26.
- Miguel Arestegui (2021), 'Prosjektsjef - Tunnelinnredning, Skanska'. E-post korrespondanse. 2020-05-21.
- Nemanja Kocic (2020), 'Senioringeniør, Fagspesialist rullende materiell Bane Nor'. E-post korrespondanse. 2020-12-03.

- Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (2012), 'Konturkvalitet i sprengte tunneler. (teknisk rapport 12).', Tilgjengelig fra: <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Teknisk-rapport-nr-12.pdf>. Hentet: 2020-12-03.
- Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (2014), 'Anbefalte retningslinjer for utarbeidelse av miljøbudsjett og miljøregnskap for tunneler', Tilgjengelig fra: <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Teknisk-rapport-nr-16.pdf>. Hentet: 2020-03-01.
- Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (2015), 'Kort innføring i bruk av tbm. (teknisk rapport 17)', Tilgjengelig fra: <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Teknisk-rapport-nr-17.pdf>. Hentet: 2020-12-06.
- Nowiki (2021), 'Jernbanetunneler i Norge', Tilgjengelig fra: https://www.nowiki.org/wiki/Jernbanetunneler_i_Norge. Hentet: 2021-04-19.
- NSB (1998), 'Byggeplan - typisk tunneltverrsnitt i spuntgrop'. G520-K50. NSB: Oslo.
- NTNU (2013), 'Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjekt- og masteroppgaver', Tilgjengelig fra: https://www.ntnu.no/documents/1272524419/1273312006/R%C3%A5d_Og_Retningslinjer_For_Rapportskrivning_BAT.pdf/760496d8-2d08-4b99-9c33-8ff1e6ef7b9c. Hentet: 2020-12-03.
- Odd-Andre Rustad (2021), 'Ingeniør Bane Nor'. Teams-møte. 2021-05-19.
- Pen, L. & Powrie, W. (2016), 'Contribution of base, crib, and shoulder ballast to the lateral sliding resistance of railway track: a geotechnical perspective', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transits* **225**(2), 113–128. DOI: 10.1177/0954409710397094.
- Profillidis, W. (2014), *Railway Management and Engineering*, Surry: Ashgate Publishing Limited.
- Pål Drevland Jakobsen (2020), 'Seksjonsleder Bergteknikk, Multiconsult'. Teams-møte. 2020-11-17.
- Samtrafikkforskriften (2010), 'Forskrift om samtrafikkevnen i jernbanesystemet', Tilgjengelig fra: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-06-16-820#KAPITTEL_5. Hentet: 2020-03-01.
- SINTEF (2016), 'Kortreist Stein', Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/projectweb/kortreist-stein/>. Hentet: 2020-03-01.

- SINTEF (2018), 'Sprøytebetong skal bli mer miljøvennlig', Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2018/sproytebetong-skal-bli-mer-miljovennlig/>. Hentet: 2020-03-01.
- Solberg, M. G. (2016), 'Dette er fordelene ved å bruke tunnelboremaskin *Teknisk Ukeblad*', Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/samferdsel-dette-er-fordelene-ved-a-bruke-tunnelboremaskin/276439>. Hentet: 2020-12-03.
- Solberg, M. G. (2017), 'Vet fremdeles ikke hvorfor toget rister - men håper sliping av skinner og hjul kan være løsningen *Teknisk Ukeblad*', Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/vet-fremdeles-ikke-hvorfor-toget-rister-men-haper-sliping-av-skinner-og-hjul-kan-vaere-losningen/378666>. Hentet: 2021-02-26.
- Statens vegvesen (2015), 'Prosesskode 1- standard beskrivelse for vegkontakter', Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/61418/binary/1077236. Hentet: 2020-12-03.
- Stormoen, M. A. (2016), 'Notat: oppsummering etter befaring av ballastrenseverk', Rapport: Jernbaneverket. Hentet: 2020-12-06.
- Thompson, D. (2009), 'Curving behaviour', Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/curving-behaviour>. Hentet: 2020-12-11.
- Tjora, A. (2017), *Kvalitative forskningsmetoder i praksis*, Oslo: Gyldendal akademisk.
- Trine Bye Sagen (2021), 'Ingeniør Bane Nor'. Teams-møte. 2021-05-19.
- Tuchschild, M., Knörr, W., Schacht, A., Mottschall, M. & Schmied, M. (2011), 'Carbon Footprint and environmental impact of Railway Infrastructure', Rapport. Tilgjengelig fra: https://uic.org/IMG/pdf/uic_rail_infrastructure_111104.pdf. Hentet: 2021-02-12.
- Tunheim, V., Suvalija, I., Bævre, J. T., Leinan, M. G., Bakka, & Bekkevold, N. (2021), 'Økonomisk og miljømessig modell for tverrsnittsreduksjon av jernbanetunneler', Rapport. NTNU TBA4853 EiT - Punktlig og Effektiv Jernbane.
- Vassenden, S. (2019), 'Rock Breaking Under rolling TBM Disc Cutter in Hard Rock Conditions', Doktorgradsavhandling. NTNU i Trondheim. Tilgjengelig fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2618989>. Hentet: 2020-12-06.

Appendiks 1: Scientific Article

The scientific article is submitted to *BCRRA 2022 - 11th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railway and Airfield* and are under review.

A feasibility study of reduction of cross-section size of railway tunnels in relation to construction costs and environment emissions

B. K. Moe & A. Lau

Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

ABSTRACT

In this study, the required cross-section size of railway tunnels from the technical viewpoint of civil- and railway engineering was investigated and compared to the cross-section sizes of the Norwegian technical regulations on railway tunnels. The reduction potential of the cross-sections was investigated with regards to its effect on the CO²-emissions and cost in the construction phase of railway tunnel projects. Cross-section measurements of two tunnels on Gardermoen-line was obtained and further demonstrated and analyzed to investigate the reduction potential in relation to today's technical standards and newer tunnel projects in development. A simplified computational model for cost and CO²-emission from the building phase was established to investigate the effect of cross-section reduction on the cost and CO²-emissions, where the analyzed data from Gardermoen-tunnels were used as input parameters. It was found that the areas for evacuation, fixed installations and the track construction was the parts within the cross sections with the highest reduction potential, because of the possibility of combining the evacuation- and installation area and using ballast-less track. The reduction potential was found to be in the magnitude of 10m². Giving a reduction in construction cost of about 4000 kr/m, a reduction of CO²-emissions of about 500 kg CO² pr unit length and a reduction in the cost related to the CO²-emissions of 900 kr pr unit length. Through the study it was found that today's design method is in small degree suitable for optimization of tunnel cross section size. Because of the great reduction potential found in the project, in addition to several factors related to the complexity of railway tunnels which makes the design process challenging.

KEY WORDS: Railway tunnels, Cross-section size, Reduction potential, Cost and environment, CO²-emission.

INTRODUCTION

The design of railway tunnels in Norway is done according to the technical regulations (Bane Nor, 2021a) and are highly interdisciplinary. Where the designers' task is to provide sufficient space and favorable placement of the different components in the railway cross-section to ensure safe and efficient operations and maintenance on the line. The knowledge and calculations related to which component that occupy which part of the tunnel cross-section to stop potential collisions of objects is presented with the use of contours within the cross-section that are related to different components and their placement and space requirements. Examples of these contours are structure gauges, loading gauges, construction gauges (Løhren, 2019) (Bane Nor, 2020a). In addition to different contours for the cross-section related to the construction (Bane Nor, 2020a). The contours geometrical shape and size and the contours placement within the cross-section are based on empirical studies, experienced knowledge, geometrical calculations, and safety margins. In addition, the accuracy in which the contours envelopes an objects related to a given contour varies according to the accuracy of the

geometrical calculations and the safety margins (Anderson, 2014) (Iwniki, 2006). There are several fixed components with space requirements related to safety, maintenance, and operation in the cross-section. These components have contours on both sides of the track against the lining and a contour for the catenary system in the tunnel roof.

The construction, design and dimensions of the track construction presented in (Bane Nor, 2021b). (Profillidis, 2014), (Chandra & Agarway, 2007) and (Esveld, 2001) discusses the design and dimensions of the track construction. It has been made obvious that a ballast-less track will be favourable for maintenance, operations and most importantly requires smaller tunnel cross-section, even though the initial investment- and construction costs often are higher. (Pen & Powrie, 2016) and (Esveld, 2001) discuss the engineering design of ballasted tracks and has shown that the ballast shoulder, ballast slope and ballast foundation under track superstructure normally have bigger dimensions than what is required from a technical viewpoint. This is also the case for (Bane Nor, 2021b), in which the technical regulation gives a minimum requirement for shoulder width of 400 mm, when 400 mm is shown to be more than sufficient from a technical viewpoint.

In building railway tunnels the designer's choice of tunnel concept in the design phase is a decisive factor for further choices related to the technical and practical solutions of the tunnels and ultimately the choice of construction method for the building phase (Bane Nor, 2020b). The choice of tunnel concept is based on several criteriums, such as: geology condition, geotechnical condition, safety, operation, and maintenance. After that or in parallel, the design of the tunnel will be evaluated with different variables such as: tunnel length, traffic volume, speed, construction cost, lifespan, and various technical solutions. The great number of variables in addition to the fact that the advantages and disadvantages of the different tunnel concepts in many cases are inversely proportional resulting in challenging situation in which there are no obvious choice as there will be advantages and disadvantages with all the different tunnel concepts (Bane Nor, 2020c).

In Norway there are two main construction methods used for construction of railway tunnels, drill and blast, and tunnel boring machine (TBM). According to (Baklien & Moi, 2018) there are advantages and disadvantages with both methods and the choice of construction method is therefore made carefully based on many of the same parameters as for the tunnel concept. Generally, the cost and construction time is considered the main factors to evaluate in addition to environment, maintenance, and the lifespan of the project. TBM is connected to high investments-costs but have an even and high-quality production and cause little degree of disturbances to the nearby environment. It is considered cost-efficient for longer tunnels. Drill and blast requires lower investment-costs but and is a cost-efficient solution for short tunnels. However, the downside is the technique produces high amount of disturbance during construction to the nearby environment and there are more uncertainties connected to the quality and evenness of the production. A lot of development has been achieved in the past years in improving both the construction methods, for example by improving material quality, producing lower CO²- emissions, and developing machines with higher efficiency. These are mainly achieved by creating higher degree of digitalization and atomization of the working environment.

The aim of this study is to study is to investigate the possibility of cross-section reduction of railway tunnels within the limitations of the technical regulations, and further to study effect of tunnel cross-section reduction on the costs and emissions connected to construction and CO²-emissions in the building phase of railway tunnels.

METHOD

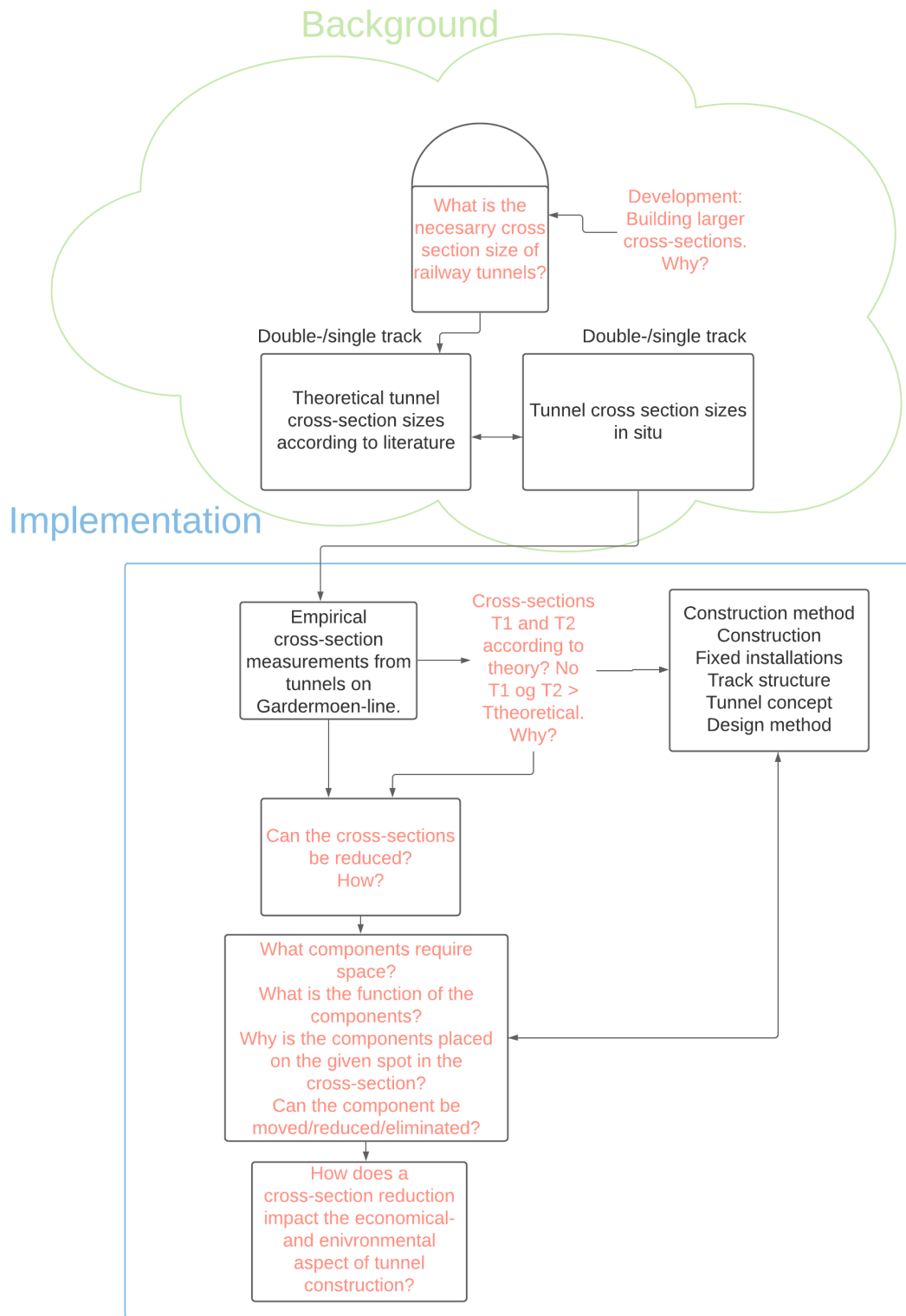


Figure 1 Illustration of the systematic approach of this study

To achieve the aim of the study, a systematic approach is adopted, see figure 1. First, field work on the Gardermoen-line was conducted on the Rashølet single-track tunnel and Bekkedalshøgda double-track tunnel. Observations and then followed by a distance- and geometrical measurements was done using a laser meter, scale and a camera. The observations and measurements were connected to the components in the tunnel cross-sections and their fixed positions in the cross-sections related to other tunnel components and the tunnel lining. Distance- and geometrical measurements were conducted of the components, their space requirements in relation to the lining. The lining was used as a reference line in the x-plane and the formation layer by the lining was used as a reference line in the z-plane. The quality of the measurements could not be assessed properly, but it is assumed that the data quality was sufficient for the nature of the study conducted.

After that, the measurements were imported into Autocad to construct models of the tunnel cross-sections based on the field-measurements. As a precondition for the models the centreline of the track construction coincided with the centreline of the tunnels. The track construction was further modelled using geometrical calculations of the track geometry using the design rules of (Bane Nor, 2021b). In addition to the tunnel cross-section from the field-measurements, simplified models of cross-sections presented in (Bane Nor, 2020d) was constructed as a basis for comparison.

Then, the modelled cross-sections from the Gardermoen-line were compressed in the same way as the optimal cross section from (Bane Nor, 2020e). The cross-sections were analysed with respect to finding the critical components for the cross-section size. While working on this part, the components functions, space requirements and placement in the cross-sections were thoroughly investigated in respect to the railway-, civil- and electrical engineering technical requirements, in addition to taking other design criteria, such as: safety, maintenance and operation into account, to optimize the cross-sections by changing the placements of-, changing the geometry of- or eliminating the critical components.

After that, the cross-sections were compared according to table 1 with the explanations for why the given comparisons are appropriate, to investigate the similarities/differences and consequently the potential for cross-section reduction of future projects. The comparisons were made in Autocad by using overlapping layers and functions.

Table 1 Overview of the tunnel cross-sections for comparison with a given explanation.

Tunnel1	Tunnel2	Tunnel3	Explanation
Rashølet	Rashølet (reduced)	IC- single track	Compare tunnel with reduced version and a new project to investigate the cross section of single tunnels over time
Bekkedalshøgda	Bekkedalshøgda (reduced)	IC- double track	Compare tunnel with reduced version and a new project to investigate the cross section of double tunnels over time
IC-double track	IC- double track optimal (Bane Nor 2020i)		Investigate original and optimal cross section size

IC- single track	IC- double track		Discuss choice of tunnel concept
------------------	------------------	--	----------------------------------

From this work the size of the cross-section reduction potential was collected for further analysis in a simplified model for construction cost and environmental impact. The model can be reviewed from the following [link](#). The model used the geometrical formulas (1) and (2) for the cross-section size (T), based on the radius (r) of the cross-section. Further model documentation is presented in (Tunheim et. Al, 2021)

$$T(r) = \frac{1}{2}r^2(4 + \pi) \quad (1)$$

$$T^{-1}(r) = \sqrt{\frac{2T}{4 + \pi}} \quad (2)$$

The model was used to calculate the construction costs and CO²-emissions for reduced cross-sections compared to the original cross-sections used as reference cross-sections. The model was used with the standard conservative parameters for the different variables in the model to give a sufficient basis for comparison.

RESULTS AND DISCUSSION

In the attempt to compress the cross-section size of the tunnels on the Gardermoen-line the fixed installations one the tunnels were investigated. It was found that critical components in the Bekkedalshøgda double track tunnel was the cables casing connected to the switch in the tunnel, shown in figure 2, the track structure were some of the components had bigger dimensions than what was recommended from the technical regulations, in addition to what has been shown from the literature is necessary dimensions of the track structure. The installation- and evacuation zone had otherwise when not taking the cabal basin into account, smaller dimensions than what is designed for newer tunnels due to the zones functioning as one zone with both installation and evacuation and the evacuation-way being the required 800 mm instead of the nowadays recommended 1200 mm. From the Rashølet single track tunnel the



Figure 2 Cables casing (left) connected to the switch (right)

evacuation zone was the critical component and otherwise the track structure was constructed according to regulations.

It was found that the reduction potential of the Rashølet single track tunnel was insignificant, and that the reduction potential was high for the Bekkedalshøgda double track tunnel. The reduction potential of Bekkedalshøgda double track tunnel was further investigated by investigating the critical components in respect to the technical regulations. Figure 3 and 4 shows different attempts to optimize the cross-section of the installation zone of Bekkedalshøgda double tracked tunnel by changing the placement-, geometry and eliminating the critical component (cables casing) within the limits of the technical requirements also showing the potential for horizontal length reduction of the tunnel which was further computed into potential tunnel cross-section reduction shown in figure 7.

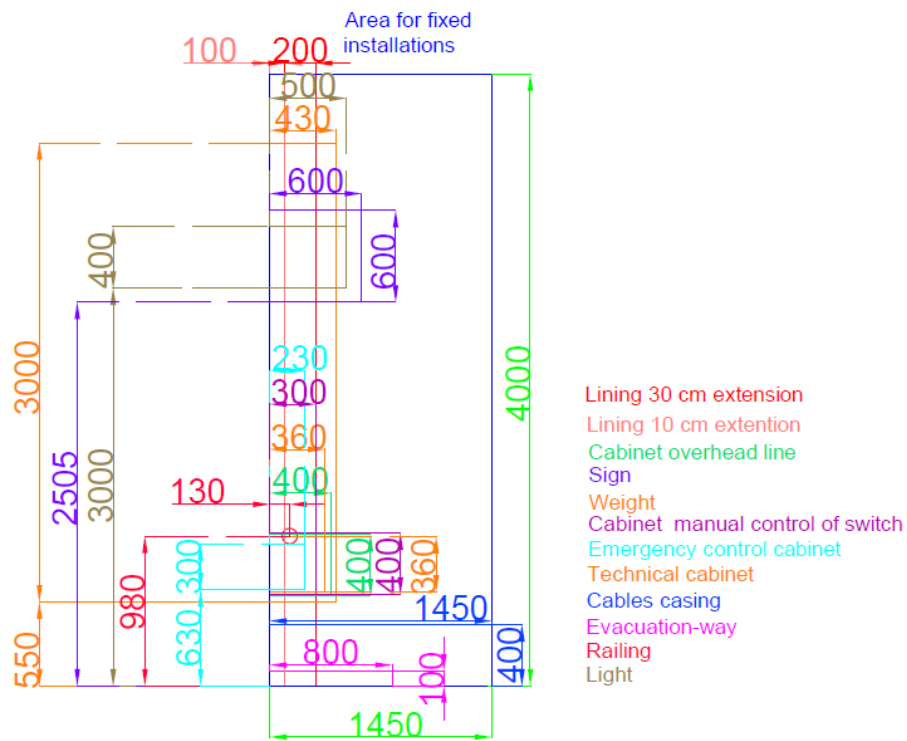


Figure 3 Installation zone of Bekkedalshøgda tunnel

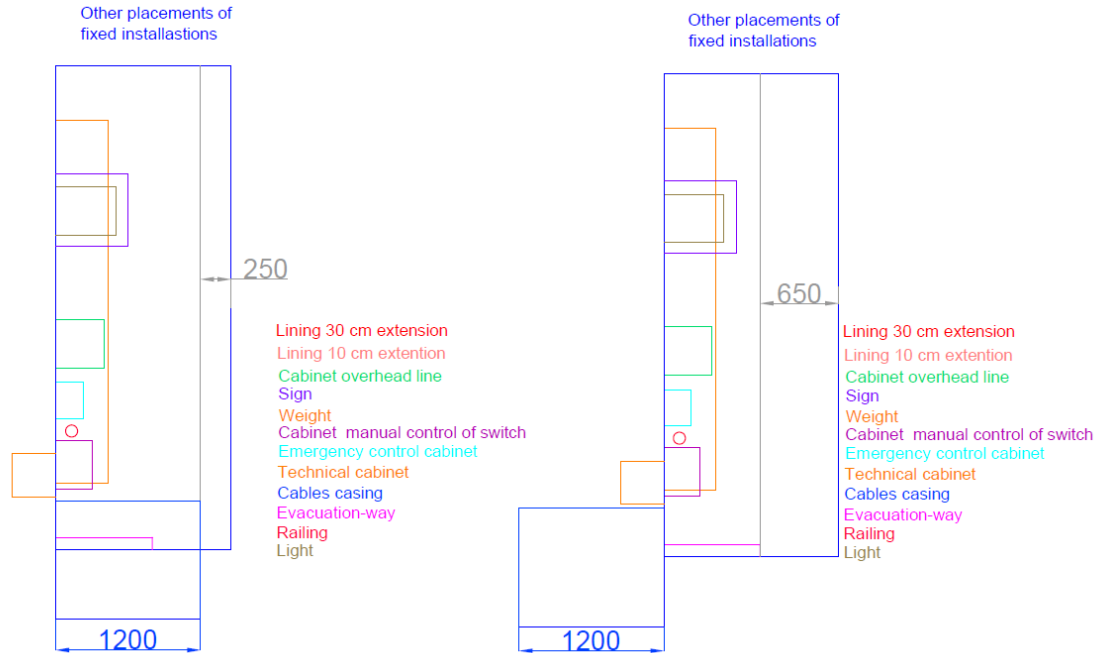


Figure 4 Different attempts to optimize the cross-section of the installation zone by changing the placement-, geometry and eliminating the critical component

During the comparison of the tunnel cross-section presented in this study it was found that the newer projects were designed using ballast-less track, a design measure suitable for reducing the cross-section size according to the literature. The newer tunnels were designed using bigger and separate evacuation- and installation contours beyond what is necessary size according to the regulations, here the newer projects should look towards the older tunnels that utilizes the evacuation zone for installation as well compressing the cross-section size. It was found that some of the reason increased installation- and evacuation contours was due to the increased focus on safety and maintenance the last years to reduce downtime of the line. It should be discussed further if it the extra costs related to an increased cross-section is justifiable by the arguments of maintenance, safety, and operation stability.

Further the tunnels in this study were both double-track and single-track tunnels. The literature presents the choice of tunnel concept as a function of several parameters to be a challenging process. The single tracked tunnels in this study had an area range of [53-59 m²], while the double tracked tunnels had an area range of [114-83 m²]. Area-wise by exclusively looking at the cross-sections of the main tunnels this study shows that there is little potential savings by choosing a double track tunnel rather than choosing two single tracked tunnels. This study can not say anything conclusive about the choice of tunnel concept but there is another phenomenon related to the tunnel concept that has been found in little degree discussed in the literature and regulations related to the train's movements in the tunnels.

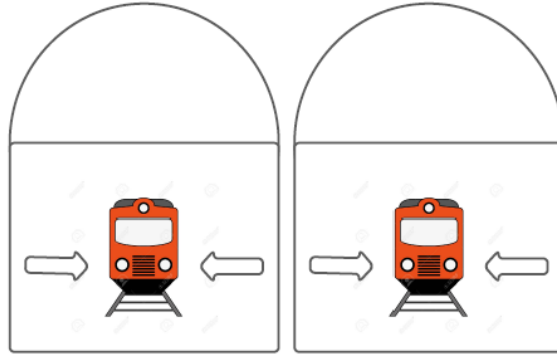


Figure 5 Illustrates forces related to the pressure in two single tracked tunnels.

Figure 5 illustrates two single tracked tunnels where a train is entering the tunnel portal. Trains at high-speed experiences aerodynamic forces in terms of pressure- and suction forces as the train is breaking through the air. At the tunnel entrance the breaking of the air is limited by the tunnel walls creating high pressure forces lateral to the train, illustrated by the arrows in the figure. For a single tracked tunnel, these forces do not represent a challenge for the train-movement as the forces are equalizing each other, as illustrated. For a double tracked tunnel the same phenomenon is experienced as illustrated in figure 6, with a much higher pressure force coming from the open area in the tunnel. The lateral pressure forces are not equal for a double track tunnel and leads to a lateral displacement of the wheelsets of the train altering the train-movements on the track from a stable train-movement to a sinusoidal motion on the track and further create severe vibrations in the train. The instability of the train-movement due to lateral displacements of the wheelset is caused by the nature of the wheel-rail interaction with the wheelset having a conicity creating a steering motion on the track. The steering motion enables the wheelset to steer with a deviation from the equilibrium position towards both sides of the track starting an oscillating motion with the geometry of a sinusoidal curve initiated by the initial lateral displacement that on a straight track with high speed will increase and cause vibrations in the train.

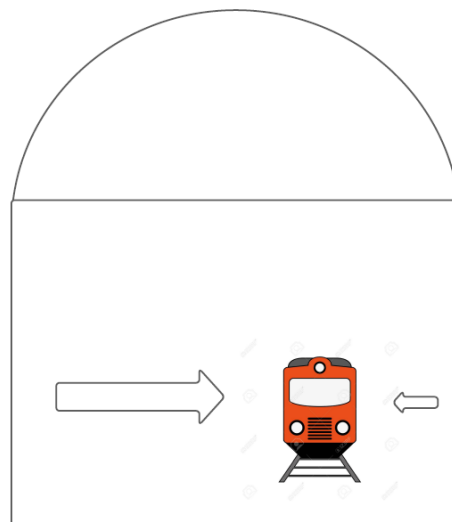


Figure 6 Illustrates the pressure forces in a double tracked tunnel.

This oscillating movement have been observed in newer double tracked tunnels causing severe vibrations on the trains. The problem has led to the need of reducing the speed on the lines and conducting early maintenance and countermeasures. By evaluating this phenomenon with the following challenges as a parameter in the choice of tunnel concept one could potentially save a lot of troubles and costs connected to maintenance and operational difficulties. As shown in this study the area-wise potential cost-savings during construction is little directly related to the tunnel concept, and it should be evaluated whether these potential construction-cost savings are sufficiently higher than the potential maintenance- and operational costs that could be triggered by the tunnel concept choice of double tracked tunnels.

Results from the model calculation of the cross-sections presented in table 1 are presented in figure 7, where the blue column present CO²-emissions, the orange show CO² costs, and the gray show construction costs. Note that Rashølet single-track tunnel is not presented in the diagram as it was found that the reduction potential was too small to be significant. The model used for the calculations represent several simplifications and consequently there are uncertainty connected to the results, but the results are believed to be of the correct magnitude and are therefore suitable to illustrate the magnitude of the savings related to costs and CO² for a given cross-section size reduction for a drill and blast tunnel. From figure 7 it is observed a reduction in cross-section size in a magnitude of 10 m² giving a reduction of construction costs in the magnitude of 4000 kr/m. For the CO²- emissions a cross-section size reduction of 10 m² correspond to a reduction in the magnitude of 500 kg CO² pr unit length and the cost connected to these emissions are in the magnitude of 900 kr per unit length.

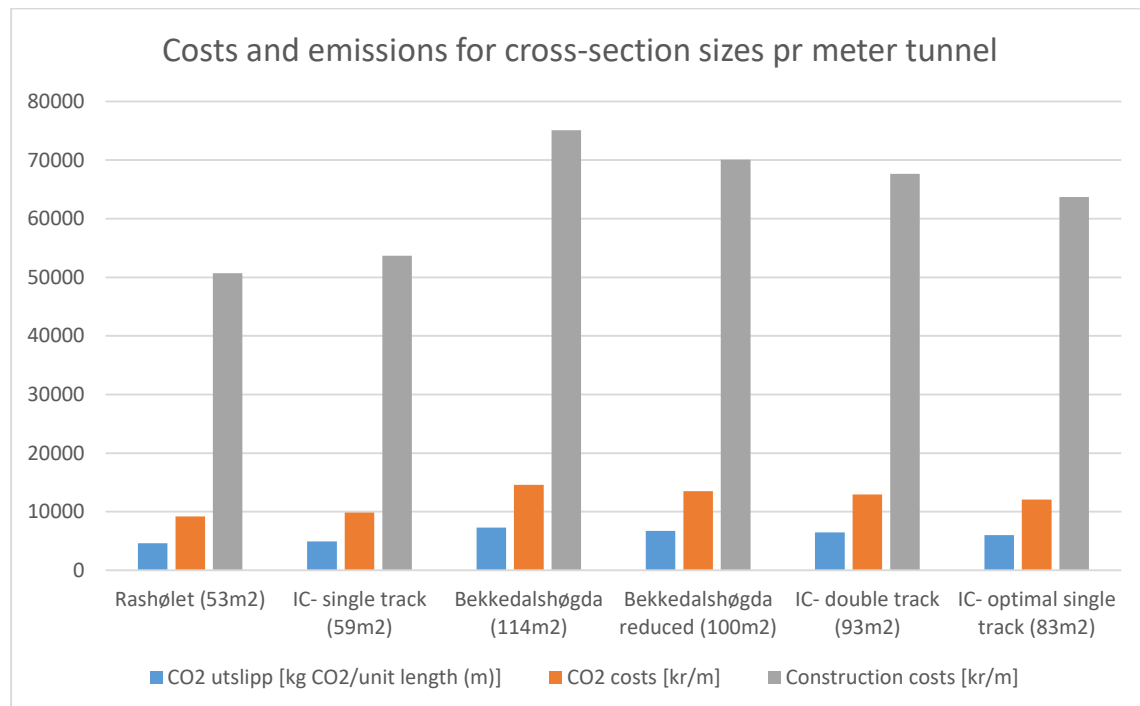


Figure 7 Costs and emissions for different cross-section sizes.

The results presented in figure 7 is dependent on the length of the tunnel. Consequently, the longer a given tunnel is, the higher will the potential savings be. In figure 8 this is illustrated by using the cross-section size reduction in the magnitude of 10 m² with the corresponding results from figure 7. One can observe that a tunnel length of 100 meter has significantly

lower costs and CO² emissions than a tunnel with the length of 1 km. At 1 km the construction costs will be in the magnitude of 4000000 kr, the cost related to CO² emissions will be in the magnitude of 900000 kr and the CO²-emissions in itself will be in the magnitude of 50000 kg CO², which represent significant potential savings. It should also be noted that as the simplified computational model was used using conservative parameters, it is not unreasonable to assume that a further development of the model in addition to using more realistic parameters would give even higher potential savings.

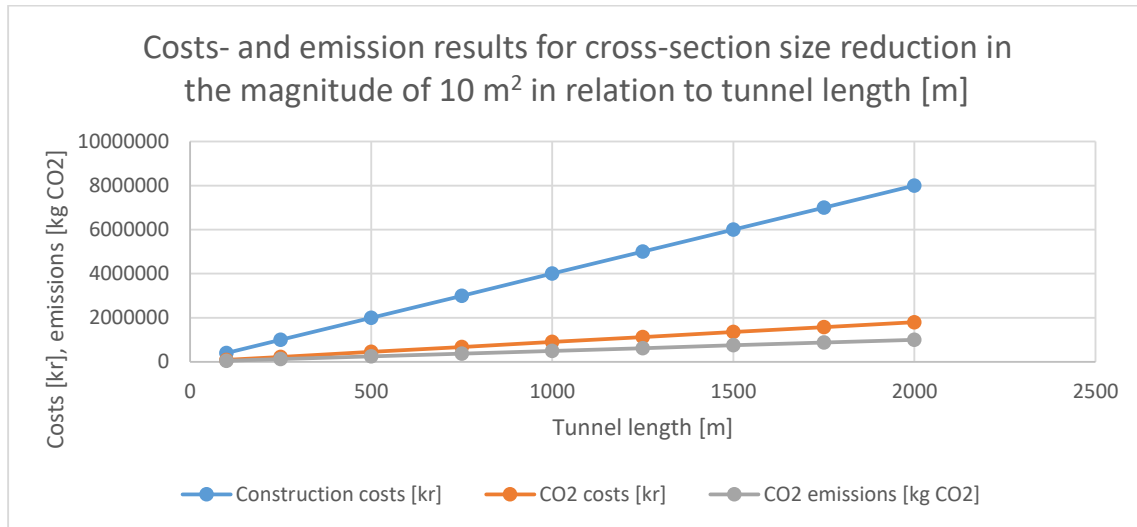


Figure 8 Costs- and emissions results for cross-section size reduction in the magnitude of 10 m² in relation to tunnel length

From this study it was found that documentation of the designing process for the different tunnels have been lacking in relation to designing choices, calculations, and parameters from the requirements. A lot of the design choices was found to be based on empirical data and experience disguised in the documentation as “professional assessment”. It was also found that the regulations and requirements where very comprehensive and could in many ways counteract the measures done in attempting to optimize tunnel cross-sections. Design of railway tunnels are highly interdisciplinary, and this was found to be one of the challenges in the optimization work as the engineers from the different technical subjects regards the components in the tunnel cross-sections related to their subjects as the most important and thus the components deserving most space for easy installation, operation, and maintenance. Leading to the different technical subjects contributing to counteract the optimization processes. Awareness of the total reduction potential of the tunnel cross-sections, could be an important measure for the different technical disciplines within railway engineering to motivate for optimization-thinking within all the technical fields.

CONCLUSION

Today's design method for railway tunnels was found to in little degree contribute to optimization of tunnel cross-sections due to the complexity and the interdisciplinary nature of the design field. The different technical disciplines were found to in many ways counteract the optimization work by demanding bigger space for their components. It was further found that awareness of the total reduction potential of the tunnel cross-sections in relation to the construction costs and CO²-emissions, could be an important motivational tool for optimization-thinking.

It was found that the evacuation- and installation zone were the spaces in the tunnel cross-sections with highest reduction potential, in addition it was found that choosing ballast less tracks as the track structure gives a smaller cross-section. The reduction potential of the evacuation- and installation zone was connected to the combining of the zones giving a smaller cross-section.

The study found that the cross-section reduction in the magnitude of 10 m² was possible for the different tunnel configurations. Giving a reduction of construction costs in the magnitude of 4000 kr/m, while the costs connected to the CO²- emissions corresponded to a magnitude of 500 kg CO² / unit length (m). The costs connected to the CO²- emissions for the same cross-section reduction was in the magnitude of 900 kr / unit length (m). It was further found that these numbers would be substantial by taking the tunnel length into account.

REFERENCES

- Anderson, E., Berg, M. & Stichel, S., 2014. *Rail Vehicle Dynamics*. Kompendium. KTH. Stockholm: Avd. för Spårfordon.
- Baklien, M. & Moi, V., 2018. 'Fordeler og begrensninger for TBM kontra konvensjonell driving av E39-tunnel under Romsdalsfjorden', Masteroppgave. NTNU i Trondheim. Available from: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2563263> Viewed: 2020-12-11.
- Bane Nor, 2021a. *Teknisk Regelverk*. Available from: <https://trv.banenor.no/wiki/Forside>. Viewed: 2021-02-26.
- Bane Nor, 2021b. *Teknisk Regelverk – Overbygning*. Available from: <https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning>. Viewed: 2021-06-13
- Bane Nor, 2020a. *Teknisk Regelverk – Profiler og minste tverrsnitt*. Available from: https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Profiler_og_minste_tverrsnitt. Viewed: 2021-02-28.
- Bane Nor, 2020b. *Kriterier for valg av tunnelkonsept*. Available from: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Kriterier_for_valg_av_tunnelkonsept. Viewed: 2020-12-03.
- Bane Nor, 2020c. *Veileder for valg av tunnelkonsept*. Available from: https://trv.banenor.no/wiki/Veileder_for_valg_av_tunnelkonsept Viewed: 2020-12-03.
- Bane Nor, 2020d. *Teknisk Designbasis for Intercity*. Available from: <https://www.banenor.no/contentassets/54b785617e5f40cd83c885f66434f677/teknisk-designbasis.pdf>. Viewed: 2020-10-31.
- Bane Nor, 2020e. 'Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 (FRE16) - TK-00 Generell, Vurdering av redusert tverrsnitt - Aerodynamisk analyse, Jong -Sunnvollen'. FRE-00-A-30118. Bane Nor: Oslo.
- Chandra, S. & Agarway, M., 2007. *Railway Engineering*, India: Oxford University Press.
- Esveld, C., 2001. *Modern Railway Track*, The Netherlands: MRT-Productions.
- Iwniki, S., 2006. *Handbook of Rail Vehicle Dynamics*, New York: CRC Press - Taylor Francis Group.
- Løhren, A. H., 2019. «Structure gauge/loading gauge», *TBA4225 Jernbaneteknikk grunnkurs*, Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com/ultra/courses/>
- Pen, L. & Powrie, W., (2016). 'Contribution of base, crib, and shoulder ballast to the lateral sliding resistance of railway track: a geotechnical perspective', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transits*

- 225**(2), 113–128. DOI: 10.1177/0954409710397094.
- Profillidis, W., 2014. *Railway Management and Engineering*, Surry: Ashgate Publishing Limited.
- Tunheim, V., Suvalija, I., Bævre, J. T., Leinan, M.-G., Bakka, & Bekkevold, N., 2021. 'Økonomisk og miljømessig modell for tverrsnittsreduksjon av jernbanetunneler', Rapport. NTNU *TBA4853 EiT - Punktlig og Effektiv Jernbane*.

