

Paweł Kupiec

Plassering av kabelkanaler langs jernbanespor

Masteroppgave i jernbane

Veileder: assoc.prof. Albert Lau

Medveileder: dr. Alf Helge Løhren

Mars 2023

Paweł Kupiec

Plassering av kabelkanaler langs jernbanespor

Masteroppgave i jernbane
Veileder: assoc.prof. Albert Lau
Medveileder: dr. Alf Helge Løhren
Mars 2023

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



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Det har i flere jernbaneprosjekter vært utfordrende for prosjekterende å tolke krav Bane NORs tekniske regelverk (TRV) stiller til legging av kabelkanaler. Plassering av kabelkanaler langs jernbanespor på linjen og innenfor stasjonsområder har påvirkning på utforming av over- og underbygning og dermed også kostnader. Det er forskjellige prinsipper for legging av kabelkanaler som har vært brukt i ulike prosjekter. For å kunne bedre ta gode og økonomisk lønnsomme beslutninger, var det ønskelig å komme med en vurdering av fordeler og ulemper ved ulike plasseringer av kabelkanaler langs spor, inkludert metoder brukt i andre land. Plassering av kabelkanaler langs spor ble vurdert med tanke på prosjektering, bygging, vedlikehold og kostnad.

Det er i denne oppgaven sett kun på plassering av kabelkanaler av betong langs ballastspor i dagen. Bruk av andre typer føringsveier er beskrevet med sine fordeler og ulemper i mindre grad.

Opgaven er skrevet med fokus i å belyse utfordringer en har ved legging av kabelkanaler langs spor og konsekvenser av deres plassering for over- og underbygning. Dette krever stor grad av tverrfaglighet og involvering av ulike fagområder og forskningsmetoder. En litteraturstudie ble benyttet for å belyse grensesnittet mellom elektrofagene, over- og underbygningen, samt vedlikeholdet av ballasten. En serie av intervjuer ble gjennomført for å kartlegge hvilke utfordringer og behov har de ulike fagene med legging av kabelkanaler. Den mest brukte metoden for legging av kabelkanaler på et fundament av pukk, med oppfyllinger rundt har vært studert. Ulik geoteknisk tilnærming ble brukt for å fastsette dimensjoner av fundamentet under kanaler, samt dimensjoner av oppfyllingen på utsiden av kanaler. Til slutt ble det gjennomført en litteraturstudie av krav til legging av kanaler i utlandet.

Resultatene har vist at plassering av kabelkanaler 2,5 meter fra senterspor, med denne metoden, kan ha negative konsekvenser for ballastens kvalitet, samt for bygging og vedlikehold av overbygningen. Resultatene har vist at for kanaler liggende med lik referanse høyde på begge sider av spor, er plassering av kanaler i høyde med SOK det mest lønnsomme og fordelaktige alternativet. Resultatene har også vist at dersom kanaler plasseres med ulik referanse høyde på begge sider av spor, vil plasseringen av kanaler i høyde med topp av nærmeste sville være mest hensiktsmessig i innerkurver. For kanaler liggende i yttersving vil plassering av kanaler i høyde med SOK være det foretrukne alternativet. De samme resultatene vil være gjeldende for kanaler plassert kun på én side av spor. Resultatene har i tillegg vist at oppfyllingen på utsiden av betongkanaler ikke er nødvendig, basert på en simulering av en ballastrensingsprosess.

Basert på funn i denne oppgaven er det anbefalt å innføre nye krav til referanse høyde for plassering av kabelkanaler langs spor i dagen. Det er også anbefalt å innføre krav til ikke bruk av materialer andre enn ballastpukk med nominell fraksjon i oppfyllingen mellom ballastlaget og kabelkanaler. Det er rådet ytterligere simuleringer for bestemmelse av påkjenning fra andre maskinelle arbeider i sporet. Dette er anbefalt for å kunne utelukke bruk av oppfyllinger på utsiden av kanaler og for å fastsette endelig dimensjon for masser rundt kanaler. Til slutt er det anbefalt en vurdering av konsekvenser ved å flytte kabelkanaler lenger bort fra spormidten, basert på eksempler fra utlandet.

Abstract

In several railway projects, it has been challenging for track planners to interpret the design requirements set by Bane NOR's technical regulations (TRV) for mounting of cable troughs. Placement of cable troughs alongside the railway track, outside and within station areas, has an impact on the design of the superstructure and substructure and thus also costs. There are different principles for mounting of cable troughs that have been used in various projects. To improve economically profitable decisions, it was desirable to come up with an assessment of the advantages and disadvantages of different placements of cable troughs alongside the railway track, including the methodology used abroad. The placement of cable troughs alongside the railway track was evaluated regarding design, building, maintenance, and costs.

In this thesis, only the placement of concrete cable troughs alongside the ballast railway track, outside the tunnels and other constructions, was considered. Different cable routes are described with their advantages and disadvantages to a lesser extent.

This paper has been written with a focus on highlighting the challenges with mounting of cable troughs alongside the railway track and the consequences of their placement for the superstructure and substructure. This requires a significant degree of interdisciplinarity and an involvement of various disciplines and research methods. A literature review was used to shed light on the interface between the electro field, the superstructure and the substructure, as well as the maintenance of the ballast. A series of interviews was conducted to map out the challenges and needs of the various professions with mounting of cable troughs. The most used method for mounting of cable troughs on a foundation of crushed stone, with crush stone reinforcements around it, has been studied. Different geotechnical approach was used to determine dimensions of the foundation, as well as dimensions of the reinforcement on the outside of the troughs. Finally, a literature review of requirements for mounting of troughs abroad was carried out.

The results have shown that mounting of troughs 2,5 meter from the track center, with this method, can have negative consequences for the quality of the ballast, as well as for the building and maintenance of the superstructure. The results have shown that for troughs mounted at the same reference height on both sides of the track, placing of troughs at the height of the top of the lowest rail, is the most profitable and advantageous alternative. The results have additionally shown that if the channels are placed at different reference heights on both sides of the track, the placement of the channels at the height of the top of the nearest sleeper will be most appropriate in inner curves. For troughs mounted on the outer side of the track, placing the troughs at the height of top of the lowest rail, will be the preferred option. The same results will apply to the troughs placed on only one side of the track. The results have in addition shown that the crush stone reinforcement on the outside of the concrete troughs is not necessary, based on a simulation of a ballast cleaning process.

Based on the results of this study, it is recommended to introduce new requirements for reference heights for the placement of cable troughs alongside the railway track. It is also recommended to introduce requirements which forbidden use of the other fractions than ballast nominal fraction in the infill between the ballast layer and cable troughs. Further simulations are advised to determine stress from the other maintenance activities in the track. This is recommended to confirm that the reinforcement on the outside of the troughs is not required, and to determine the final dimensions for masses around the troughs. Finally, an assessment of the consequences of moving of the cable troughs further away from the center of the track is recommended, based on examples from abroad.

Forord

Denne masteroppgaven er et avsluttende arbeid med det erfaringsbaserte studieprogrammet i jernbane ved NTNU. Oppgaven er skrevet i perioden høst 2022 – vår 2023.

Plassering av kabelkanaler langs jernbanespor er et spennende og utfordrende tema som jeg har kommet på i løpet av min kort karriere i rådgiverbransjen. Temaet ble valgt delvis med bakgrunn i å forenkle våre daglige arbeidsrutiner med prosjektering av over- og underbygning, og delvis av et ønske om å utfordre og konkretisere tekniske krav for legging av kabelkanaler langs jernbanespor. Forhåpentligvis har oppgaven også gitt et innblikk i kostnadsbilde, samt fordeler og ulemper ved ulike plasseringer av kabelkanaler.

Arbeidet med oppgaven har vært utfordrende, spesielt med tanke på min begrensede erfaring innenfor alt foruten sporprosjektering. Graden av tverrfaglighet har vist seg å være krevende fra første stund. Jeg vil derfor takke alle som har bistått med sin kunnskap og erfaring i de forskjellige fagfeltene.

Jeg vil gi en takk til min veileder, Albert Lau ved NTNU og min medveileder, Alf Helge Løhren i Bane NOR. Takk til mine kollegaer i Rambøll Norge, Danmark, Sverige, Finland, Tyskland og Storbritannia for deling av teknisk litteratur. En stor takk til Plasser & Theurer for bistand med kritiske simuleringer. Takk til min kjære Magdalena for tålmodighet og konstant støtte. Til slutt en stor takk til alle respondenter som har bistått i intervjuer.

Sylling, mars 2023

Pawel Kupiec

Innhold

Sammenheng	v
Figurer	x
Tabeller	xi
Forkortelser	xii
Symboler	xiii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 TRVs krav for plassering av kabelkanaler	2
1.3 Mål og problemstilling	3
1.4 Oppgavens struktur	4
1.5 Avgrensning	5
2 Faglig grunnlag	6
2.1 Metode	6
2.2 Felles elektro	7
2.2.1 Elkraft	7
2.2.2 Signal- og sikringsanlegg	10
2.2.3 Telekomunikasjonsanlegg	11
2.3 Føringsveier	12
2.3.1 Dimensjonering og tillatte kabelkonfigurasjoner	12
2.3.2 Kabelkanaler	14
2.3.3 Valg av kabelkanalkonfigurasjoner	15
2.4 Over- og underbygning	16
2.4.1 Ballastspor	16
2.4.2 Ballastens funksjon	17
2.4.3 Ballastens viktigste egenskaper	17
2.4.4 Ballastforurensning og -separering	18
2.5 Vedlikehold av ballasten	20
2.5.1 Ballastrensing	20
2.6 Plassering av kabelkanaler	22
3 Metode	25
3.1 Intervju	25
3.1.1 Utvelgelse av respondenter	25
3.1.2 Intervjuprosess	26
3.1.3 Transkribering	26
3.1.4 Dataprosessering	26

3.1.5	Etikk.....	26
3.2	Dimensjonering og modellering.....	26
3.2.1	Geoteknisk tilnærming.....	27
3.2.2	Simulering hos Plasser & Theurer.....	34
3.2.3	Optimal plassering av kanaler i høyde.....	37
3.3	Studie av utenlandsk litteratur.....	37
4	Resultat.....	39
4.1	Intervju.....	39
4.1.1	Plassering av kabelkanaler i høyde og plan.....	39
4.1.2	Utforming av fundamentet under kabelkanaler.....	42
4.1.3	Uforming av oppfyllingen rundt kabelkanaler.....	43
4.1.4	Prosjektering, bygging og kostnader.....	44
4.1.5	Vedlikehold av overbygningen og kabelkanaler.....	45
4.1.6	Alternative løsninger.....	46
4.1.7	Hovedutfordringer og -behov.....	47
4.2	Dimensjonering av fundamentet under kabelkanaler.....	48
4.2.1	Laster og materialer.....	48
4.2.2	Pukkens egenstabilitet.....	51
4.2.3	Sikkerhet mot flateutglidning.....	53
4.3	Dimensjonering av oppfyllingen på utsiden av kabelkanaler.....	55
4.3.1	Jordtrykk mot kanalens sidevegg.....	55
4.3.2	Ruhetsforhold i glidesiktet.....	57
4.4	Sluttdesign av masser rundt kabelkanaler.....	58
4.5	Bestemmelse av optimal referansehøyde.....	59
4.6	Plassering av kabelkanaler i utlandet.....	65
4.6.1	Sverige.....	65
4.6.2	Danmark.....	66
4.6.3	Tyskland.....	67
4.6.4	Polen.....	68
5	Diskusjon.....	69
6	Konklusjon, anbefaling og videre arbeid.....	72
	Referanser.....	73
	Vedlegg 1 – Planeringsbredder.....	
	Vedlegg 2 – Standardtegning for plassering av kabelkanaler i Sverige.....	
	Vedlegg 3 – Intervjuguide.....	

Figurer

Figur 1-1: Arbeidsprosess i denne masteroppgaven.	5
Figur 2-1: Strømmens veg fra kraftvert til tog.....	8
Figur 2-2: Plassering av føringsveier for en stasjon på enkeltsporet strekning med ERTMS.	10
Figur 2-3: Plassering av føringsveier for en stasjon på dobbeltsporet strekning med ERTMS.	10
Figur 2-4: Plassering av kabler i 3+1 løps, 3-løps og 2-løps kanal.....	13
Figur 2-5: Standard design for kabelkanaler av betong.....	14
Figur 2-6: Kabelkanalkonfigurasjoner for videreanalyse i oppgaven.	15
Figur 2-7: Prinsippskisse for oppbygging av ballastspor.....	16
Figur 2-8: Skjematisk overføring av spenninger i godt pakket ballastpukk	17
Figur 2-9: Tillatt siktekurve for ballast i Bane NOR.....	18
Figur 2-10: Vaskesviller på befarings. Narvik stasjon, 2022.....	19
Figur 2-11: Standard og utvidet graveenhet i et moderne ballastrenseverk fra Plasser & Theurer.	21
Figur 2-12: Forurensete ballastskuldre ved standard utgravingsbredde.	22
Figur 2-13: Eksempel på normalprofil daglinje, dobbeltspor.	23
Figur 2-14: Kabelfritt profil basert på krav i TRV.....	23
Figur 2-15: Masser rundt kabelkanaler. 1 - oppfylling mot ballast, 2 – fundament under kanaler, 3 - oppfylling på utsiden av kanaler.....	24
Figur 3-1: Ukjente størrelser for fyllinger rundt kanaler. 1 - oppfylling mot ballast, 2 – fundament under kanaler, 3 - oppfylling på utsiden av kanaler.....	27
Figur 3-2: Stabilitet av fyllinger på faste masser. Krittisk glidesikt. β - skråningshelning.	28
Figur 3-3: Lineær belastning av en fylling.....	29
Figur 3-4: Effektiv sålebredde for sentrisk og eksentrisk belastet fundament.....	30
Figur 3-5: Sammenheng mellom jordtrykk og horisontal veggforskyvning.	33
Figur 3-6: Hviletrykk mot kabelkanal.	33
Figur 3-7: Valgt oppsett for simulering av horisontale krefter mot en 1-løps kanal ved ballastrensing.	34
Figur 3-8: Simuleringsprosess for ballastrensing og påkjenning mot 1-løps kanal.	36
Figur 3-9: Horisontalkraft mot 1-løps kanal ved ballastrensing.	37
Figur 4-1: Maksimal skråningshelning til fundandamtet for ulike materialkoeffisienter. ...	52
Figur 4-2: Fundamentets halvbredde, x , for ulike materialkoeffisienter, γm . $\phi = 42^\circ$	54
Figur 4-3: Fundamentets halvbredde, x , ved ulike friksjonsvinkler, ϕ . $\gamma m = 1,25$	54
Figur 4-4: Maksimal terrenghelning bak kanalen.....	56
Figur 4-5: Sluttdesign av masser rundt kabelkanaler. Eksempel med 2+1-løps kanaler.	58

Figur 4-6: Volum av overbygningsmasser avhengig av kanalens referansehøyde og sporets overhøyde. Kanaler med lik referansehøyde på begge sider av spor.....	61
Figur 4-7: Kostnadsbesparelse avhengig av kanalens referansehøyde og sporets overhøyde. Kanaler med lik referansehøyde på begge sider av spor.....	62
Figur 4-8: Kostnadsbesparelse avhengig av kanalens referansehøyde og sporets overhøyde. Kanaler med ulik referansehøyde på begge sider av spor.	64
Figur 4-9: Normalprofil for et dobbeltspor i Danmark.	67
Figur 4-10: Standard plassering av kabelkanaler basert på krav i Tyskland.....	67
Figur 4-11: Standard normalprofil for et dobbeltspor i Polen.	68

Tabeller

Tabell 1-1: Kravangivelse i TRV.....	2
Tabell 2-1: Oversikt over høyspenningskabler langs jernbanespor.	8
Tabell 2-2: Oversikt over lavspenningskabler langs jernbanespor.	9
Tabell 2-3: Oversikt over telekabler langs jernbanespor	12
Tabell 2-4: Konfigurasjon av tillatt forlegning av kabler i felles rom i kanal eller felles rør.	13
Tabell 4-1: Intervjurespondenter.....	39
Tabell 4-2: Oppsummering av hovedutfordringer og -behov fra ulike faggrupper.	47
Tabell 4-3: Materialfaktor ved stabilitets- og bæreevneanalyse.....	49
Tabell 4-4: Last- og materialegenskaper.....	50
Tabell 4-5: Kabelkanalenes egenlast.	50
Tabell 4-6: Maksimal tillatt skråningshelning, β . Materialkoeffisient, $\gamma_m = 1,25$	51
Tabell 4-7: Fundamentets dimensjonerende skulderbredde på utsiden av kabelkanaler.	53
Tabell 4-8: Bestemte skulderbredder og skråningshelninger for ulike kanalkonfigurasjoner.....	55
Tabell 4-9: Beregning av hviletrykksresultant mot kanalens vegg.	56
Tabell 4-10: Beregning av ruhetsforhold for en 1-løps kanal.	58
Tabell 4-11: Dimensjoneringskriterier for bestemmelse av kanalenes optimale referansehøyde.	59
Tabell 4-12: Prosentvis reduksjon i kostnadsbesparelsen for kortere sviller ift. svillelengde 2600mm. Kanaler på begge sider av spor med lik referansehøyde - topp av kanalen i høyde med underkant SOK.	63

Forkortelser

CTC	Centralized Traffic Control
DB	Deutsche Bahn
EMC	Elektromagnetisk sameksistens
ERRI	European Rail Research Institute
ERTMS	European Rail Traffic Management System
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway
KL	Kontaktledningsanlegg
MIT	Mobil og Internett i Tog
NSD	Norsk senter for forskningsdata
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NTP	Nasjonal transportplan
PIA	Publikuminformasjonsanlegg
PKP	De polske statsbaner
SOK	Laveste skinnens overkant
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TRV	Bane NORs tekniske regelverk
TSI	Teknisk spesifisering for samtrafikkevne
UIC	Den internasjonale jernbaneunionen
UPS	Avbruddsfri strømforsyning

Symboler

Symbol	Forklaring
A	Skulderbredde på utsiden av kanaler, tverrsnitt
A_0	Fundamentets areal
a	Attraksjon
b_i	Avstand fra senterspor til ballastskulderkant i innersving
b_y	Avstand fra senterspor til ballastskulderkant i yttersving
B	Bredde
B_i	Avstand fra senterspor til formasjonsplankant i innersving
B_y	Avstand fra senterspor til formasjonsplankant i yttersving
B_0	Effektivbredde
β	Skråningshelning
C	Avstand fra oppfyllingen på utsiden til formasjonsplankant
$D:D$	Skråningshelning til fundamentet
ΔB	Eksentrisitet
δ_A	Aktivt jordtrykk
δ_A	Passivt jordtrykk
δ_0	Hviletrykk
$E:E$	Skråningshelning til oppfyllingen
F_d	Dimensjonerende last
F_h	Horisontallast
F_{rep}	Karakteristisk last
F_v	Vertikallast
F_0	Hviletrykkets resultantkraft
Φ, φ	Friksjonsvinkel
g	Gravitasjonskomponent
γ	Tyngdetetthet
γ_F	Lastfaktor

γ_f	Lastfaktor for variabelast
γ_G	Egenlastfaktor
γ_m	Materialkoeffisient
h	Overhøyde
H	Høyde
K	Kabelkanalbredde
K_0	Effektiv hviletrykkskoeffisient
$K_{0,\beta}$	Effektiv hviletrykkskoeffisient med terrenghelning
L	Fundamentlengde
Q_{maks}	Maksimal tillat linjelast
q_{maks}	Maksimal tillat belastning
$Q_{opptrende}$	Opptrenede linjelast fra kabelkanaler
q_h	Horisontalpåkjenning i glidesiktet
q_v	Opptrenede fundamenttrykk, vertikalpåkjenning
r	Ruhet
ρ	Mobilisert friksjonsvinkel, densitet
σ_x	Horisontalspenning
σ_y	Vertikalspenning
σ_0	Hviletrykksspenning
τ_d	Utnyttbar skjærkraft til materialet
τ_h	Skjærpåkjenning fra fundamentet
x	Avstand til fyllingskant, fundamentets halvbredde
z_h	Avstand fra såleunderkant til horisontalkraftens angrepspunkt

1 Innledning

Kapittelet gir en innføring til oppgavens tema. Det belyses bakgrunnen for dette arbeidet, hvilke spørsmål oppgaven prøver å svare på, samt hvordan selve rapporten bygges opp. Til slutt nevnes det hvilke avgrensninger som legges til grunn for denne oppgaven.

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Jernbanen i Norge er under stadig vekst. Jernbanens infrastruktur består av mer enn 4200 km (Bane NOR, 2019a) og det legges til rette for ytterligere prosjektering og utbygging av jernbanenettet. I den nye Nasjonale transportplanen 2022-2033 (NTP) (Det Kongelige Samferdselsdepartement, 2021, s. 17) settes det hele 393 milliarder kroner ut til jernbaneformål, med høyhastighetsbaner i spissen. Foruten de store InterCity prosjektene nevnes fornyelse og vedlikehold av eksisterende spor som hovedsatsingsområder i årene som kommer. Det innføres såkalte effektpakker ulike steder i landet. Formålet med disse er å øke togtilbudet for passasjerer. Økt satsing på gods på bane har skapt mye utfordringer med kapasitet, spesielt på enkeltsporete strekninger, og dagens jernbanenett består primært av disse (ca. 7% i 2021) (Jernbane.net, u.å.). Dette resulterer i at eksisterende kryssingsspor må forlenges eller det må bygges nye kryssingsspor andre steder. Innføring av nytt digitalt signalsystem (ERTMS) har påvirket sikkerhetsavstander og dermed også sporarrangement flere steder. Dette fører til at det må bygges mer jernbane og at flere nye og gamle brikker i det komplekse jernbanesystemet må passe sammen, hvor blant annet føringsveier, over- og underbygning står sentralt.

Jernbanen er et sammensatt system bestående av flere grupper av komponenter som skal samarbeide godt sammen for at et tog skal kunne kjøre. En av disse komponentene er føringsveier som har hatt som hovedoppgave å sikre fremføring av kabler til diverse elektrotekniske anlegg langs spor. Føringsveiene består igjen av kabelkanaler, rørgater og trekkekummer. Plassering av kabelkanaler langs jernbanespor på linjen, og innenfor stasjonsområder, har påvirkning på utforming av over- og underbygning og dermed også kostnader. Det er forskjellige prinsipper for legging av kabelkanaler som har vært brukt ulike steder. For å kunne bedre ta gode og økonomisk lønnsomme beslutninger i prosjekter er det ønskelig å komme med en vurdering av fordeler og ulemper ved ulike plasseringer av kabelkanaler langs jernbanespor, inkludert metoder brukt i andre land.

Det har i flere jernbaneprosjekter vært utfordrende for prosjekterende å tolke krav Bane NORs tekniske regelverk (TRV) stiller til legging av kabelkanaler. Noen av kravene viser seg enten å ikke være entydige nok, og derfor å ha rom for ulik tolkning, eller å være i strid med andre normaler. Dette har noen ganger ført til en ekstra kostnad i forbindelse med omprosjektering av både føringsveier og over-/underbygningen. Det er derfor et ønske om å vurdere om kravene kan tydeliggjøres, detaljeres ytterligere og standardiseres.

Det ønskes til slutt å se på om det finnes noen optimaliseringsmuligheter ved legging av kabelkanaler langs spor.

1.2 TRVs krav for plassering av kabelkanaler

Bane NORs tekniske regelverk legges til grunn for dimensjonering og plassering av kabelkanaler langs spor. Avsnitt 520.5.3.5 «Plassering og legging av kabelkanal», krav TRV:00771a), datert 10.02.2022, gir følgende føringer for plassering av kabelkanaler (Bane NOR, 2022a):

«

Kabelkanalen skal plasseres iht. krav gitt i Felles_elektro/Prosjektering_og_bygging/Kabellegging_og_kabelkanaler#Kabelfritt_profil.

1. Utførelse: Kabelkanalen skal normalt monteres på formasjonsplanet.
2. Utførelse: Når kabelkanalen legges på formasjonsplanet skal den legges oppå formasjonsplanet på et fundament av pukkk innenfor fraksjonen 8-20 mm.
3. Utførelse: Fundamentet for kabelkanalen kan legges oppå formasjonsplanet
4. Utførelse: Kabelkanalen bør plasseres innenfor mastefundamenter. Dette medfører at mastefundamenter bør plasseres i tilstrekkelig avstand fra spormidt, slik at framtidige plassbehov for kabelkanal ivaretas.
5. Utførelse: Kabelkanalen skal ha tilstrekkelig støtte på begge sider slik at den ikke forskyver seg ved f.eks. arbeider i ballastlaget. Oppfylling av pukkk skal ikke fylles høyere opp enn 50 mm under lokk kabelkanal.
6. Utførelse: Kabelkanalen skal legges slik at setninger i underlaget ikke medfører vertikale forskyvninger mellom elementer.

»

For å kunne tolke ovenstående krav riktig, er det viktig å understreke at Bane NOR bruker ulike modale hjelpeverb for å angi kravets viktighet og hvem som har myndighet til å gi dispensasjon fra kravet. Tabell 1-1 under viser oversikt over krav, verb og myndighet til dispensasjon basert på TRV:00186 (Bane NOR, 2022b).

Tabell 1-1: Kravangivelse i TRV

<i>Regel</i>	<i>Verb</i>	<i>Myndighet til å gi dispensasjon</i>
Myndighetskrav	<i>skal</i> (i kursiv)	Krav som Bane NOR selv ikke har myndighet til å gi dispensasjon fra
Krav	skal	Redaktør av Teknisk regelverk
Anbefaling	bør	Infrastruktureier
Mulighet/alternative løsninger	kan	Den som prosjekterer, bygger eller vedlikeholder

1.3 Mål og problemstilling

Formålet med denne masteroppgaven er å studere hvilke krav Bane NORs tekniske regelverk stiller til legging av kabelkanaler langs jernbanespor og hvorfor. Videre skal disse kravene settes mot ulike prinsipielle løsninger for legging av kabelkanaler langs spor, som har vært benyttet i diverse jernbaneprosjekter. Det er ønskelig å se på hvilke utfordringer og behov ulike fag har med diverse plasseringer av kabelkanaler, inkludert prosjekterende, entreprenører, samt drifts- og vedlikeholdspersonell.

Det er ønskelig å finne fordeler og ulemper med legging av kabelkanaler på et pukkfundament, direkte på formasjonsplanet og ved andre forlegningsmetoder. Oppgaven skal besvare relevante spørsmål om konsekvenser ved bruk av de ulike metodene. Det er derfor formulert følgende forskningsspørsmål:

- 1. Hvilke konsekvenser for over- og underbygning med tanke på prosjektering, bygging, vedlikehold og kostnad har ulike måter å legge kabelkanaler på?*
- 2. Hvilke andre fordeler og ulemper finnes det ved alternative plasseringer av kabelkanaler, og alternative materialer kabelkanaler er laget av?*

For å kunne svare på de primære forskningsspørsmålene er det nødvendig å utvide forskningsområde med disse delspørsmålene:

- Hvilke kabelkanalkonfigurasjoner er vanlige langs jernbanespor basert på ulike fagets behov?
- Hva er en optimal dimensjon av et pukkfundament og oppfylling rundt kabelkanalen av betong?
- Hva er en optimal plassering av kabelkanaler i høyde og plan?
- Hvilke alternative løsninger praktiseres i Norge og i utlandet?

1.4 Oppgavens struktur

Rapporten består av en rekke kapitler. Strukturen til disse beskrives nedenfor.

Kapittel 1:

Innledningsavsnittet gir en innføring til oppgaven. Leseren får et innblikk i problemstillingen om legging av kabelkanaler langs spor og blir kjent med forskningsspørsmålene. Oppgavens struktur og avgrensninger beskrives i dette kapitlet. Gjeldende krav i TRV presenteres.

Kapittel 2:

Kapitlet inneholder relevant teori og litteraturstudie fra fagområder elektro, over- og underbygning, samt ballastvedlikehold. Grensesnitt mellom områdene beskrives. Det gis innføring i ulike måter å legge kabelkanaler på.

Kapittel 3:

Metodeavsnittet presenterer i detalj hvilke metoder som er brukt for å besvare forskningsspørsmålene. Dette inkluderer intervjuer, geotekniske metoder, modellering og dimensjonering, samt studie av utenlandsk litteratur.

Kapittel 4:

I resultatkapitlet beskrives funn fra gjennomførte intervjuer, dimensjoneringer og modelleringer, samt resultater fra studie av utenlandsk litteratur. Ulike fagets behov og utfordringer ved legging av kabelkanaler beskrives i detalj. Kapitlet viser forenklet dimensjonering av fundamentet under kabelkanaler og oppfyllingen rundt disse for ulike kabelkanalkonfigurasjoner. Bestemmelse av optimal referanse høyde til kabelkanaler presenteres.

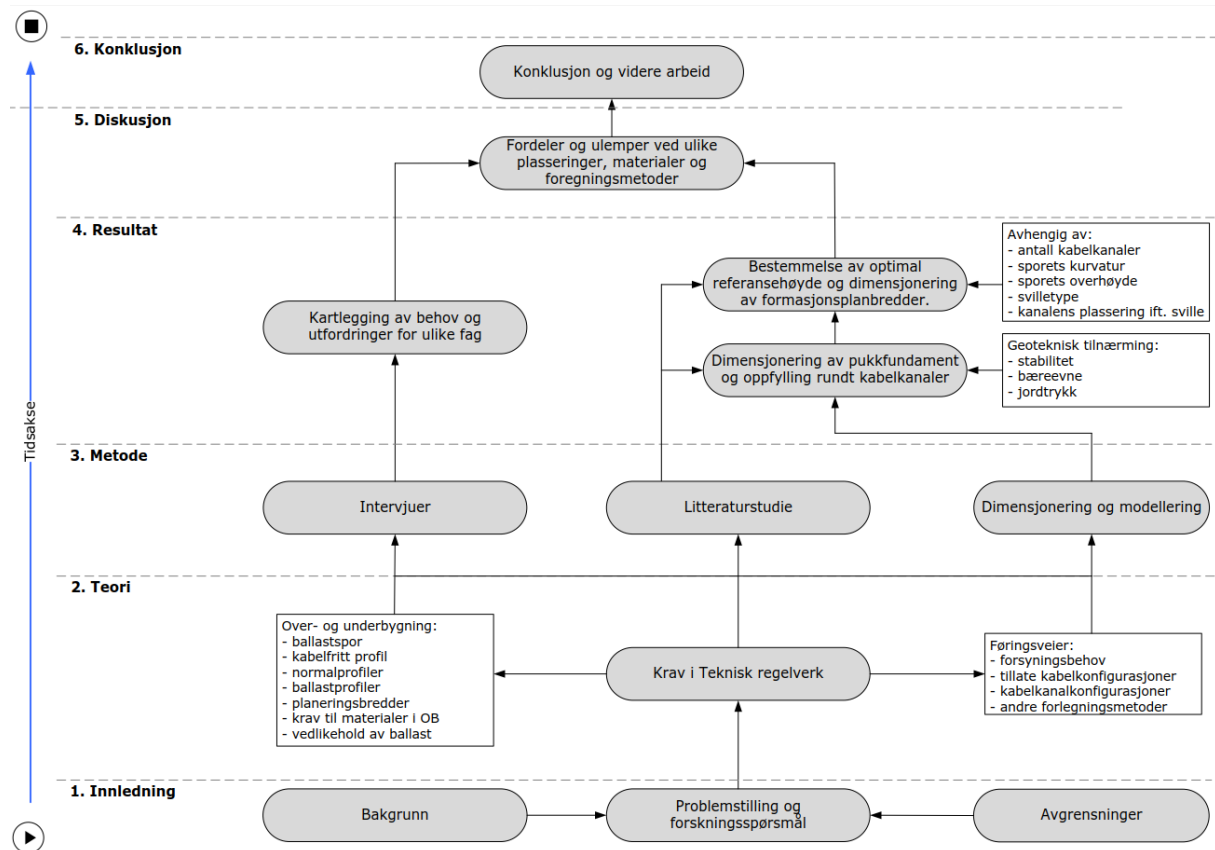
Kapittel 5:

Diskusjonsavsnittet oppsummerer resultater. Legging av kabelkanaler langs spor drøftes med tanke på prosjektering, bygging, vedlikehold og kostnad. Det diskuteres andre fordeler og ulemper ved ulike løsninger for kabelkanaler. Kapitlet inneholder en kritisk vurdering av funn og usikkerheter i analysen.

Kapittel 6:

Konklusjonsavsnittet gir svar på forskningsspørsmålene til oppgaven. Forslag til videre arbeid og anbefalinger presenteres.

Arbeidsflyten i denne oppgaven er presentert i Figur 1-1 nedenfor.



Figur 1-1: Arbeidsprosess i denne masteroppgaven.

1.5 Avgrensning

Oppgaven er skrevet med fokus i å belyse utfordringer en har ved legging av kabelkanaler langs spor og konsekvenser av deres plassering for over- og underbygning. Dette krever stor grad av tverrfaglighet og involvering av ulike fagområder. Det er derfor gjort noen avgrensninger innen ulike fag.

I denne oppgaven er det primært sett på kabelkanaler av betong, da denne typen føringsveier brukes mest i Norge i dag. Bruk av andre typer føringsveier beskrives med sine fordeler og ulemper i mindre grad. Hovedfokuset er rettet mot kabelkanaler liggende langs jernbanespor. Kabelføringer på tvers av jernbane og i tekniske hus er ikke beskrevet.

Det er kun sett på legging av kabelkanaler langs spor i dagen, mest for å avgrense oppgavens omfang i forhold til tilgjengelig tid. For legging av kabelkanaler i tunneler, på bruer og kulverter, gjelder det andre regler, og disse må eventuelt utredes separat.

Det er kun beskrevet fordeler og ulemper for legging av kabelkanaler langs ballastspor. For ballastfritt spor gjelder det andre regler som ikke er beskrevet i denne oppgaven.

2 Faglig grunnlag

Dette kapittelet presenterer teori som er nødvendig for å kunne tolke funn og resultater i kommende avsnitt. I noen kapitler er det lagt vekt på å presentere hvilke krav TRV stiller til de ulike delsystemene. Ikke fullstendige krav eller krav som kan mistolke tydeliggjøres, for å kunne gi et grunnlag til videre diskusjon i oppgaven.

2.1 Metode

I dette avsnittet er det redegjort for relevant teori og faglig grunnlag knyttet til føringsveier, samt over- og underbygning. Teksten er bygget opp på en slik måte at leseren får en gradvis innføring til alle komponenter og systemer som inngår i bane, og som er viktig i lys av forskningsspørsmålet. Det er lagt vekt på presentasjon av grensesnitt mellom ulike deler av banesystemet.

Elektrosystemene beskrives først for å belyse hvilket kabelbehov som eksisterer langs spor i dag, og hvilke potensielle endringer en ser i fremtid. Deretter beskrives kabelkanaler. Det legges særlig vekt på tillatte kabelkonfigurasjoner som til slutt leder til valg av et sett av alternative konfigurasjoner av kabelkanaler langs spor. Disse konfigurasjonene danner grunnlag for dimensjonering av pukkfundamentet under og oppfyllingen rundt kanaler.

Over- og underbygning beskrives deretter, med plassering av kabelkanaler i grensesnittet mellom de to delene av banelegemet, nemlig på formasjonsplanet. Det vises hvordan TRV og andre relevante veiledere for jernbane plasserer kabelkanaler i forhold til sporets senterlinje og sville. Det vises til oppbyggingseksempler av pukkfundamentet og oppfyllingen rundt kanaler fra konsultentselskaper. Opphavet til kabelfritt profil forklares. Ballastens viktigste egenskaper beskrives i detalj med hensyn til lastfordelingsevne, kornfordeling og finstoffinnhold. Plassering av kabelkanaler i forhold til ballastrensing studeres. Alt dette, sammen med intervjuer, dimensjoneringer og modellering beskrevet i etterfølgende avsnitt, danner grunnlag for diskusjon om optimal plassering av kabelkanaler.

Denne delen av rapporten er bygget til dels på litteraturstudie av tekniske krav i Bane NORs tekniske regelverk, og til dels basert på annen litteratur. Ved søk av annen litteratur ble det benyttet ulike søkemotorer tilgjengelige på NTNU sine nettsider. Det ble blant annet brukt Google Scholar, Oria og nettbibliotek for Nasjonalbiblioteket. I tillegg har standard Google søkemotor vist seg å være et godt hjelpemiddel. «NTNU Open» ble benyttet aktivt for å studere jernbanerelaterte masteroppgaver fra tidligere år. Det ble også benyttet kompendier og teknisk litteratur fra studietiden.

Ikke all nødvendig informasjon kunne finnes ved nettsøking. Det har derfor vært nødvendig å innhente tilleggsinformasjon om kabelkanaler fra kabelkanalprodusenter ved å ta direkte kontakt. Det samme gjelder for spesifikasjon av ballastrenseverk som er innhentet hos Plasser & Theurer med hovedkontor i Østerrike. Noen utenlandske bøker i papirutgave har blitt kjøpt som tilleggs litteratur.

2.2 Felles elektro

Tre av fem hovedelementer i et banesystem, ved siden av over- og underbygning, er elektroanlegg. Disse er elkraft, signal og tele. Alle områder som er felles for disse elektroanleggene, og som har påvirkning for elektromagnetisk sameksistens (EMC)¹, kalles i jernbanesammenheng for felles elektro. Denne kategorien består av kabler, kabelkanaler, jordingsutstyr, isolasjons- og overspenningsbeskyttelse, elektrotekniske bygninger og rom, samt driftskontrollsystemer for elektrisk forsyningsanlegg.

2.2.1 Elkraft

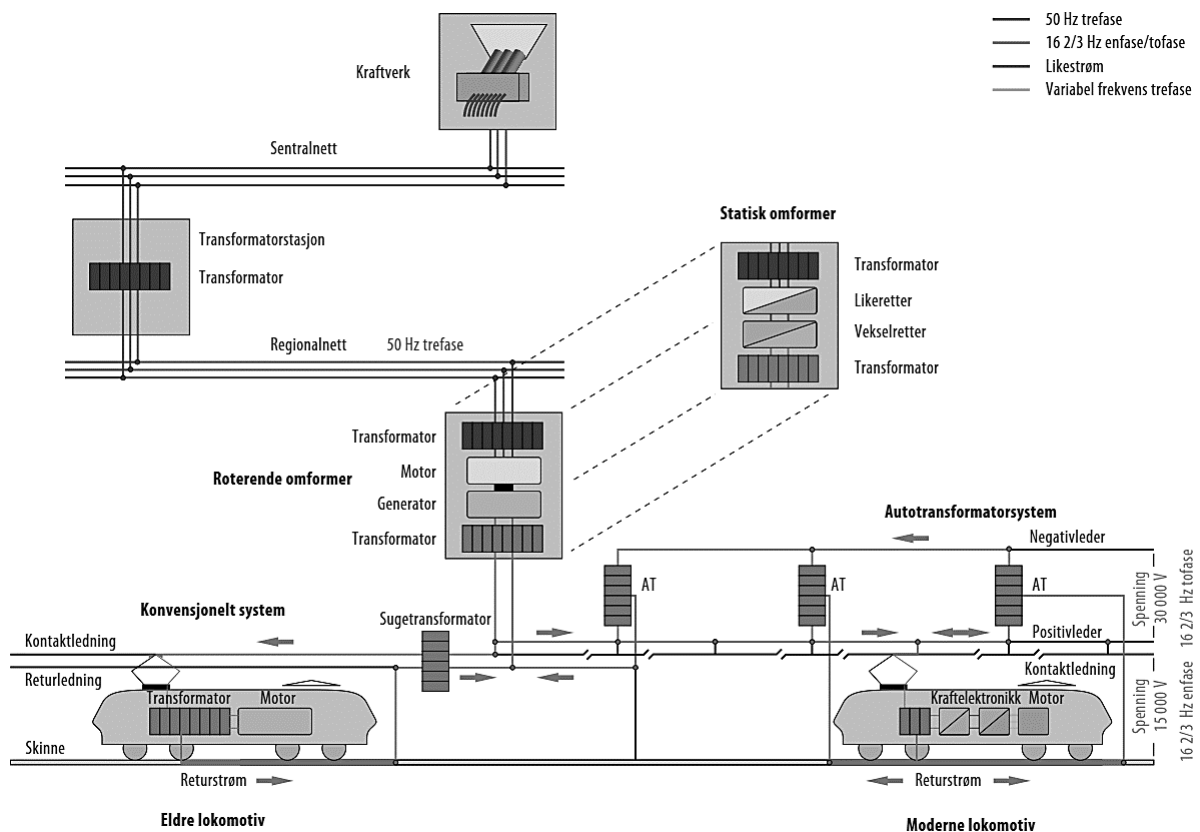
Anleggene for strømforsyning omfatter høyspennings- og lavspenningsanlegg.

Høyspenningsanlegg

Elektrisk banestrømforsyningsanlegg skal sikre nok strøm for fremføring av togmateriell på elektrifiserte strekninger. Anlegget består av matestasjoner, kontaktledningsanlegg (KL-anlegg) og elkraftsentraler. Strømmen produsert på et kraftverk sendes til transformator- og omformerestasjoner som 3-fase, 50Hz strøm via sentralnett. Ved hjelp av omformerestasjoner endres strømmen til 1-fase og frekvensen blir 16 2/3Hz. Nominellspenning er 15kV effektivverdi. Matestasjoner leverer strøm med 16,5kV ut til kontaktledningsanlegget. Spenningen levert til KL-anlegget er litt høyere enn nominellspenning for å kompensere for eventuelle spenningstap som kan oppstå på veg fra matestasjoner. Både kontaktledningsanlegg og matestasjoner kontrolleres og overvåkes fjernstyrt fra elkraftsentraler. Forsyningssystemets oppbygging og strømmens veg fra kraftverk til tog er vist i Figur 2-1 på neste side.

Kontaktledningsanlegget består av fundamenter, master, utliggere, isolatorer, brytere, kontakttråd og hengetråd, samt bæreline og et anlegg for returstrøm. Kontaktledningsanlegget mates med strøm ved hjelp av matekabler. Disse kan enten legges i kabelkanal eller henges på toppen av KL-mast. Det andre alternativet er ansett som lite aktuelt de siste årene på grunn av mer restriktive regler for legging av høyspentledninger i Plan- og bygningsloven. Videre overføres elektrisk energi til tog ved hjelp av kontakttrådet. Strømmen som ikke ble omformet til trekkraft i lokomotiv/trekraftenhet sendes tilbake til matestasjoner og kalles derfor for returstrøm. Returstrømmen ledes gjennom togets hjul enten via skinnene eller/og egne ledninger (returledere). Returledningene, ofte kalt for langsgående jordledere, kan enten festes til kontaktledningsmastene eller legges langs spor, under eller i kabelkanal.

¹ EMC – er utstyrs evne til å fungere tilfredsstillende i sin sone, uten å forårsake utålelig elektromagnetisk forstyrrelse på annet utstyr innenfor samme miljø (sone) (Bane NOR, 2016).



Figur 2-1: Strømmens veg fra kraftvert til tog (Jernbaneverket, 2012, s. 24)

Plasseringen av både matekabler og returledere påvirker utforming av føringsveier. Valg av løsning for disse vil ha innvirkning på både antall kanaler og deres tverrsnitt. Dette er nærmere omtalt i kommende avsnitt. Oppsummert vil disse kablene ha påvirkning på utforming og plassering av kabelkanaler langs jernbanespor i et høyspenningsanlegg:

Tabell 2-1: Oversikt over høyspenningskabler langs jernbanespor.

Kabeltype	Funksjon	Forleggingsmetode
Matekabler	Strømforsyning til KL-anlegget.	I separate kabelkanaler, men kun til første mast.
Høyspenningskabler	Strømforsyning mellom tekniske bygg (BN egen strømforsyning).	Vanlig på nye strekninger, egen kabelkanal eller 160mm trekkerør, gjerne innstøpte rør (OPI-kanaler).
Langsgående returledere (jordledere)	Returstrøm til matestasjoner.	I separate kabelkanaler, eventuelt under i pukkfundamentet.

Lavspenningsanlegg

I jernbanesammenheng defineres lavspenningsstrøm som 0-1kV for vekselstrøm eller 0-1,5kV for likestrøm. All strøm over disse verdiene defineres som høyspenningsstrøm. Jernbanenes lavspenningsanlegg kan deles inn i følgende kategorier (Wikander, 2000-2010, s. 10-11):

- lys og varme til bygninger
- sporvekselvarme
- rådegravsvarme

- togvarme
- tomtelysanlegg
- alminnelig strømtilførsel

Mens de fleste kategoriene er mer eller mindre selvforklarende, krever alminnelig strømtilførsel mer utdypende forklaring. Her menes det en rekke anlegg som er vesentlig for jernbaneinfrastruktur, blant annet sikringsanlegg, trafikkstyringssentraler, anlegg for telekommunikasjoner, basestasjoner for radioanlegg, varmeanlegg i tunneler, fjernkontrollerte kontaktledningsbryter og ulike detektorer.

Sporveksel- og rådegravsvarme er vesentlige for sikkerhet om vinteren og omstilling av disse elementene må fungere etter hensikten. Snø og is skal ikke hindre omlegging av sporvekselsposisjon av sikkerhetsårsaker. Det er over 2100 sporveksler med varmelementer registrert i BaneData² (Back, 2021, s. 11), med et effektbehov per veksler tilsvarende effektbehovet til en middels stor enebolig (Jernbaneverket, 2012, s. 29). Antall sporveksler definerer antall kabler og hvor disse skal legges langs spor. Avstand fra teknisk hus vil påvirke kabellengder og derfor også lengder av føringsveier. Plassering av sporveksler på stasjoner, hensettingsområder og driftsbanegårder vil derfor ha stor betydning for utstrekning av føringsveier og kabelkanaler.

Togvarme er aktuell i områder hvor togene er hensatt eller/og det gjennomføres vedlikeholdsoppgaver. Disse operasjonene foregår enten i dedikerte spor på stasjoner eller på hensettingsområder og driftsbanegårder. Spenningen på 1000V mates fra stasjonære togvarmeposter. Eventuelt kan togvarme sikres via strømvaktaker under spenningsatt KL-anlegg. Standard industrikontakt mates med 400V anlegg (Bane NOR, 2020a, s. 19). Det er normalt stort behov for legging av kabelkanaler på slike steder med tanke på strømtilførsel fra tekniske hus. Tekniske hus tilstrebes ofte å være plassert midt på anlegget, mellom ankomstspor og sporviften, for å korte ned lengden av føringsveier.

Strømmen i lavspenningsinstallasjoner forsynes enten direkte fra lokalt E-verk (50Hz) eller fra eget høyspenningsforsyningsanlegg. Løsningen krever i så fall legging av matekabler i separate kanaler langs jernbanetraséen. Eventuelle lavspenningsinstallasjoner med veldig lavt effektbehov, kan strømforsynes direkte fra KL-anlegget. Løsningen er likevel lite praktisert og anordnes i spesielle tilfeller hvor det enten er mangel av alternative strømforsyningskilder eller der det er veldig kostbart å bygge slike (Jernbaneverket, 2018).

Lavspenningsanlegg omfatter i tillegg reservestrømforsyning som skal sikre reservestrøm ved kortvarige avbrudd eller spenningsfeil (batterianlegg, UPS, strømaggregater). Tilkobling av disse skal i utgangspunktet kreve sin plass i føringsveier. Eventuelt kan reservestrømmen mates direkte fra kontaktledningsanlegget.

Oppsummert vil disse kablene ha påvirkning på utforming og plassering av kabelkanaler langs spor i et lavspenningsanlegg:

Tabell 2-2: Oversikt over lavspenningskabler langs jernbanespor.

<i>Kabeltype</i>	<i>Funksjon</i>	<i>Forleggingsmetode</i>
Matekabler	Strømforsyning til sporveksler, sikringsanlegg, rasvarslingsgjerdar, bomanlegg, KL-brytere, anlegg for telekommunikasjon, basestasjoner for radioanlegg, forskjellige detektorer, togvarmeposter, tomtelysanlegg, reservestrømanlegg.	I separat kabelkanal eller i eget løp i kanalen.

² BaneData er Bane NOR sitt vedlikeholds- og infrastrukturdatabase.

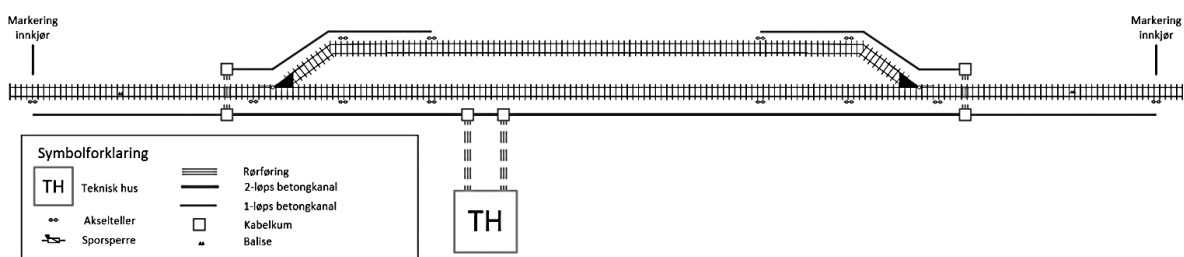
2.2.2 Signal- og sikringsanlegg

Signalanlegg har som formål å sikre en trygg togfremføring. I tillegg skal signalanleggene sikre optimal utnyttelse av jernbanenes kapasitet. Med ordet kapasitet menes i dette tilfellet antall tog per time, per spor og retning.

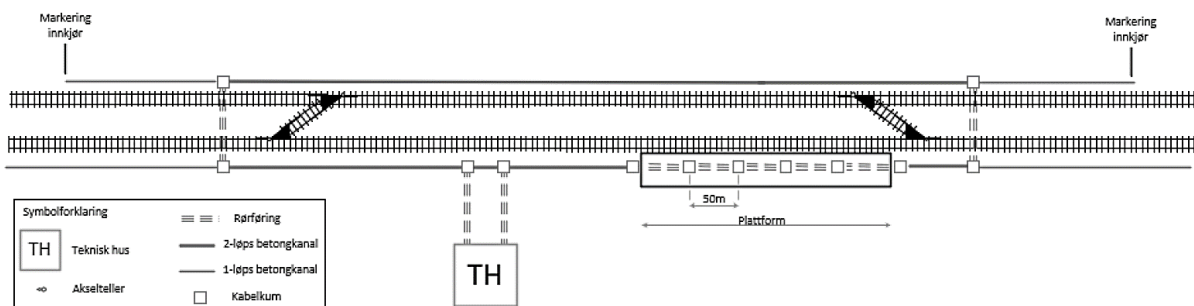
Det har pågått flere endringer i signalfaget de siste årene takket innføring av ny felleseuropeisk standard for kommunikasjon mellom tog og signalanlegg (ERTMS). Nasjonal signalplan (Bane NOR, 2020b, s. 5) angir, med en viss usikkerhet, at utrulling av ERTMS systemet vil pågå frem til slutten av 2034, avhengig av statlige investeringsbeslutninger.

Der ERTMS ikke er driftsatt i dag, leveres informasjon og kjøretillatelse til lokomotivfører ved hjelp av ulike lyssignaler stående langs spor. Disse signalene er naturligvis strømforsynte. Med ERTMS (Level 2) erstattes mesteparten av signalene med såkalte «marker boards» og all nødvendig trafikkinformasjon vil være tilgjengelig for lokomotivføreren om bord. Behovet for strømforsyning av signalmast vil reduseres. Den klassiske og kontinuerlige togdeteksjonen med sporfelt, erstattes med punktvis deteksjon ved hjelp av telepunkter. Isolerte skjøter erstattes med magnetiske akseltellere, men begge deler vil fortsatt kreve strømforsyning.

Figur 2-2 og Figur 2-3 nedenfor viser ERTMS sitt konsept for plassering av føringsveier for henholdsvis en stasjon på enkeltsporet strekning og en stasjon på dobbeltsporet linje.



Figur 2-2: Plassering av føringsveier for en stasjon på enkeltsporet strekning med ERTMS. Kilde: (Bane NOR, 2019b, s. 3)



Figur 2-3: Plassering av føringsveier for en stasjon på dobbeltsporet strekning med ERTMS. Kilde: (Bane NOR, 2019b, s. 3)

Figurene vist ovenfor representerer behovet for føringsveier knyttet til ERTMS signalsystemet alene. Forsyning av øvrige elektroanlegg kommer i tillegg, og skal enten plasseres i samme kabelløp eller i separate kanaler. Ulike konfigurasjoner er nærmere beskrevet i etterfølgende avsnitt.

Figurene viser også at selv om det blir færre signalobjekter langs spor med ERTMS, vil behovet for strømforsyning, og derfor føringsveier, fortsatt være til stede. Dette gjelder spesielt på stasjoner og i områder med flere sporveksler. Foruten kabler for strømforsyning vil det være plassbehov for fiber-, radiolinjekabler og diverse andre kommunikasjonskabler, siden GSM-R nettet er en naturlig kommunikasjonskanal for ERTMS.

Foreløpig har det i flere pågående jernbaneprosjekter vært vanlig å prosjektere ny jernbaneinfrastruktur tilpasset både konvensjonelt sikringsanlegg og ERTMS i en migrasjonsfase. Dette har vært tilfelle for eksempel ved forlengelse av eksisterende kryssingsspor. Begrunnelsen for dette ligger i forsinkelser ved utrulling av ERTMS i forhold til oppgradering av eksisterende infrastruktur med kapasitetsøkende tiltak. I disse tilfellene har det vært naturlig å gjøre nødvendige tilpasninger slik at etterkommende innføring av ERTMS skal kunne foregå mest mulig smertefritt. Et eksempel på dette kan være utrusting av eksisterende sporveksler med drivmaskiner tilpasset det nye sikringsanlegget eller oppgradering av eksisterende bomanlegg med Siemens sine styreenheter. Dimensjonering av føringsveier og deres plassering må også være tilpasset begge signalsystemene.

En liste over signalrelaterte kabler langs spor inngår i oppsummeringen for lavspennings- og telekommunikasjonsanleggskabler i neste avsnitt.

2.2.3 Telekommunikasjonsanlegg

Dagens moderne jernbane er utstyrt med nytt, digitalt telenett. Gamle analoge systemer erstattes med nye og digitale i henhold til internasjonale standarder. Et godt eksempel på dette er nytt teleanlegg i Follotunnelen som skal levere verdens beste mobilkapasitet og netthastighet i en tog tunnel (Bygg.no, 2019). På radio sin side har Jernbaneunionen (UIC) varslet innføring av nytt 5G basert radiosystem som erstatning for de grunnleggende funksjonene GSM-R har i dag. Systemet har som formål å fase ut aldrende 2G teknologi og migrasjonen fra GSM-R til FRMCS er planlagt i perioden 2025-2035 (Bane NOR, 2022c).

Et teleanlegg består av kabler, transmisjonsanlegg, radioanlegg, CTC-fjernstyring og publikumsinformasjonsanlegg. Transmisjonsnettet er ryggen for teleinfrastrukturen og består av elektronisk transmisjonsutstyr og transmisjonsmedier, det vil si fiberoptiske kabler, kobberkabler og radiolinje. Radioanlegg består av Bane NORs eget mobilnett for togfremføring (GSM-R), nødnett i tunneler (TETRA), samt mobildekning 2G, 4G og 5G (MIT). GSM-R nettet dekker hele jernbanenettet og er hovedkommunikasjonsmiddelet for ERTMS. Publikumsinformasjonsanlegg (PIA) består av høyttalere, anvisere og monitører, uranlegg og produksjonsenhet for trafikkdata. CTC systemet gir mulighet til å styre togtrafikken fra en togdriftssentral.

Teleanlegget er koblet sammen ved hjelp av kabler og radiolinje. Dette er primært kobberkabler, fiberkabler, RF-kabler, koaksialkabler og strålekabler. Bane NOR har planlagt å legge fiberkabel langs hele jernbanenettet, over 4 000 km. Ved siden av fiberkabelen legges det ofte parkabler på flere strekninger (Jernbaneverket, 2012, s. 38). Disse kablene utgjør størst andel av plassen i kabelkanaler, spesielt langs spor mellom stasjoner.

Oppsummert vil disse kablene ha påvirkning på utforming og plassering av kabelkanaler langs spor i et teleanlegg:

Tabell 2-3: Oversikt over telekabler langs jernbanespor

<i>Kabeltype</i>	<i>Funksjon</i>	<i>Forleggingsmetode</i>
Fiberoptiske kabler	Overføring av data i transmisjonsnett.	Plasseres i fiberrør i eller under kabelkanal.
Kobberkabler	Overføring av data i transmisjonsnett. Som parkabler i transmisjonsnett.	I kabelkanal.
RF-kabler	Overføring av data i transmisjonsnett.	I luft.
Koaksialkabler	Overføring av data i transmisjonsnett.	I kabelkanal.
Strålekabler	Overføring av data i transmisjonsnett, stort sett i tunneler som langstrakt antenne.	Henges på vegg i tunneler.
Radiolinje	Overføring av data i transmisjonsnett.	I kabelkanaler, men på sikt skal fases ut.

2.3 Føringsveier

Oversikten over elektroanleggene gitt i forrige avsnitt viser kompleksitet, omfang og avhengigheter mellom de ulike systemene. Formålet med føringsveier er å sikre en stabil og sikker leie for kabler langs jernbanespor. Nedenfor gis en kort oversikt over regler som gjelder for legging av kabler, samt en oversikt over ulike kabelkanalkonfigurasjoner som er i bruk i Norge i dag.

2.3.1 Dimensjonering og tillatte kabelkonfigurasjoner

Kabler skal ikke legges tilfeldig ved spor. TRV stiller krav til både plassering og beskyttelse av kabler. Disse reglene er vesentlige for valg av forlegningsmetoden. Skader på kabler kan føre til store konsekvenser for togfremføringen og samfunnet ellers. For å redusere sårbarheten innføres det tiltak i form av atskillelse av kabler, redundant føring og ekstra beskyttelse. Tiltakene gjelder for selve kabler, føringsveier og utemiljø.

Komponenter som normalt danner føringsveier er kabelkanaler langs spor, trekkerør – enten langs eller på tvers av sporet, og kabelkummer. Alle kabelanlegg skal bygges slik at en reservekapasitet på ca. 30% opprettholdes for senere bruk. Som hovedregel skal ingen kabler plasseres innenfor et såkalt kabelfritt profil. Kabelfritt profil er nærmere beskrevet i avsnitt 2.6. Det er vanligvis ikke ønskelig å legge kabler løst på bakken, men heller legge de inn beskyttet i en eller annen form av føringsvei. Dette gjelder normalt både utenfor og på stasjonsområder. Forlegning av kabler i grøfter er heller ikke foretrukket metode med tanke på begrenset tilgang ved eventuelle feil, og dette praktiseres i mindre og mindre grad.

Høyspenningskabler, det vil si mate- og returkabler bør alltid legges tett sammen. Disse kablene bør legges på motsatt side av sporet enn andre kabler, spesielt atskilt fra kabelføringer som kan bli påvirket av magnetfeltet rundt strømkretsen. Ved å plassere høyspenningsføringer på denne måten, reduseres magnetfeltet mot utsatte kabler. Ytterlige reduksjon kan oppnås ved å flytte returledningen opp i KL-mastene. Tabell 2-4 nedenfor viser Bane NORs anbefalte og tillatte konfigurasjoner for legging av kabler i felles rør eller felles rom i kanal. Input til tabellen er hentet fra Bane NORs tekniske regelverk for felles elektro (Bane NOR, 2022d).

Tabell 2-4: Konfigurasjon av tillatt forlegning av kabler i felles rom i kanal eller felles rør.

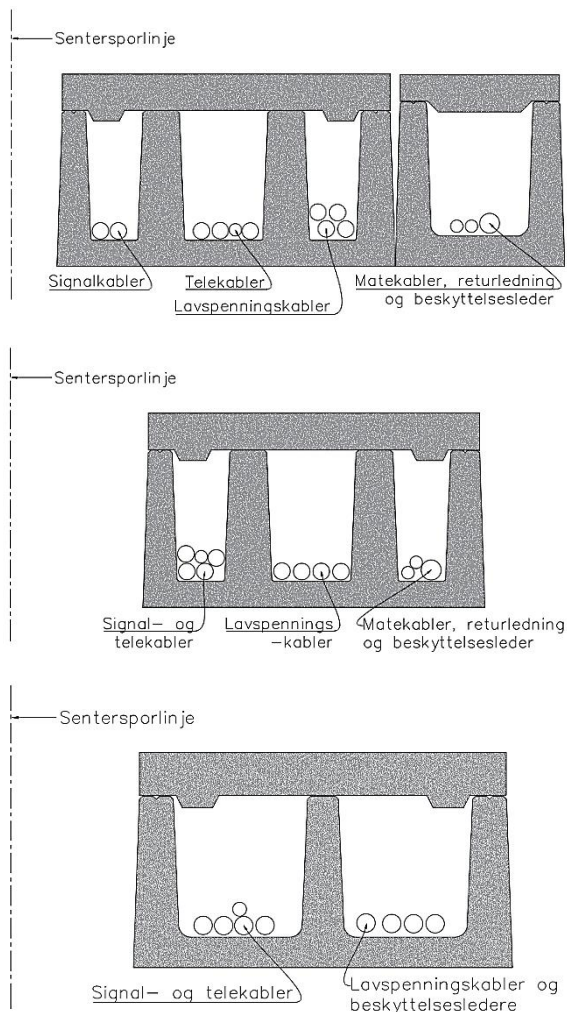
Kabeltype	Fiberoptisk kabel	Parkabel Signalkabel	Energiforsyning Lavspenning	Returledninger Utjevningssledere	Høyspenningskabler
Fiberoptisk kabel	Anbefalt	Alternativ forlegning	Alternativ forlegning	Mulig, anbefales ikke	Mulig, anbefales ikke
Parkabel Signalkabel	Alternativ forlegning	Anbefalt	Alternativ forlegning	Mulig, anbefales ikke	Skal ikke legges sammen
Energiforsyning Lavspenning	Alternativ forlegning	Alternativ forlegning	Anbefalt	Mulig, anbefales ikke	Skal ikke legges sammen
Returledninger Utjevningssledere	Mulig, anbefales ikke	Mulig, anbefales ikke	Mulig, anbefales ikke	Anbefalt	Alternativ forlegning
Høyspenningskabler	Mulig, anbefales ikke	Skal ikke legges sammen	Skal ikke legges sammen	Alternativ forlegning	Anbefalt

Slik det kommer frem av tabellen ovenfor, er ikke alle kabelkonfigurasjoner tillatt. Høyspenningskabler og annen type kabel skal ikke legges i samme rom eller i samme rør. Det skal skilles mellom tele- /signalkabler og høyspenningskabler med et fast mekanisk skille. Dette skyldes til dels et ønske om å forbedre EMC-forholdene, og til dels et ønske om reduksjon av elding av optiske fibrer ved eventuelle kortslutninger og store temperaturstigninger.

Figur 2-4 viser kombinasjoner av kabelkanaler med tillatte plasseringer av kabler i ulike rom, iht. Tabell 2-4. Øvre figur viser 3-løps kabelkanal med separat løp for signal-, tele- og lavspenningskabler. Ulike høyspenningskabler plasseres ved siden av i en egen kanal. Disse kablene plasseres lengst unna sporet med tanke på EMC-forhold.

Alternativt kan signal- og telekabler legges sammen i et felles rom. På denne måten kan antall rom reduseres fra fire til tre. Høyspenningskabler plasseres i eget rom med mekanisk skille til andre kabler.

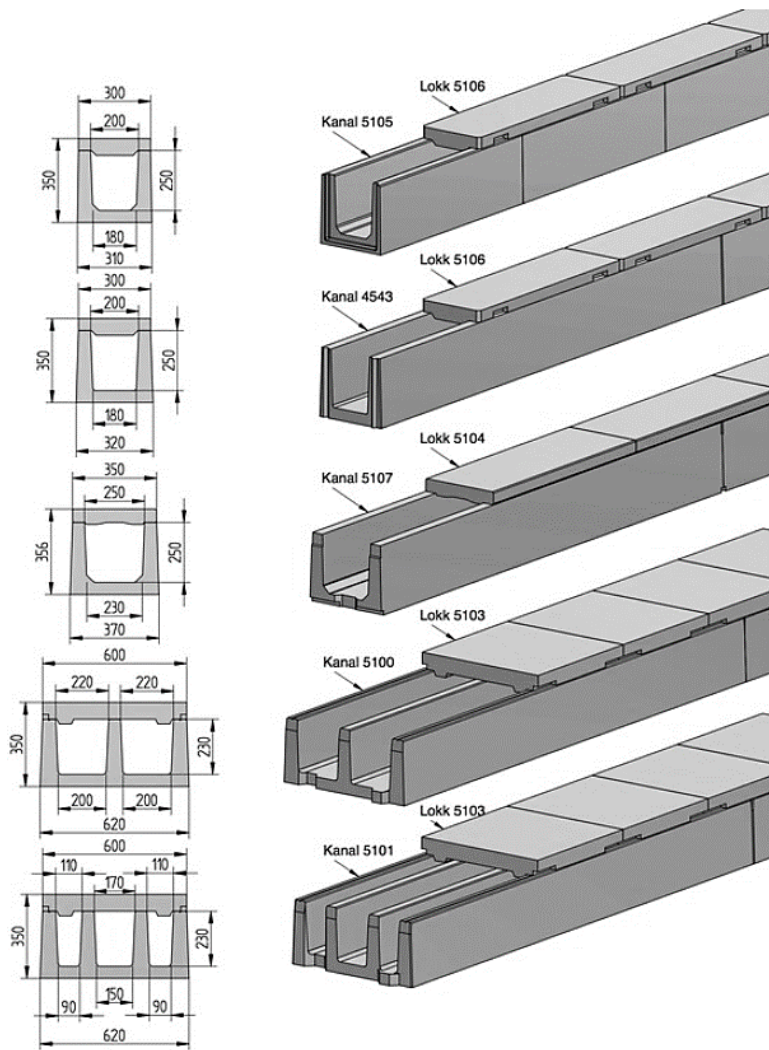
Om det er mangel på plass for legging av flere kabelkanaler parallelt, eller det er behov for supplerende kabler i eksisterende kanal, kan konfigurasjon vist nederst benyttes.



Figur 2-4: Plassering av kabler i 3+1 løps, 3-løps og 2-løps kanal.

2.3.2 Kabelkanaler

Det stilles flere krav til utforming av kabelkanaler. Kanalene skal lages slik at de beskytter kablene mot inntrengning av fremmede objekter og masser i kanalen, inkludert støv, løv, vegetasjon og pukkstein fra ballasten. Det er ønskelig at kanalene har en tung lokk som er vanskelig å forskyve. Dette begrenser tilgang til kabler for uvedkommende og reduserer sjansen for tyveri. Kanalene skal sikre tilstrekkelig vannavrenning slik at kablene ikke står i vann ved større nedbørsmengder. Kanalens innvendige kanter skal være avrundet for å ikke skade kabler. I tillegg stilles det krav til kanalens brannegenskaper, slik at kablene ikke skades ved eventuell brann. Kanalens styrke skal være tilstrekkelig for å kunne tåle påkjønning fra brøyteutstyr eller lignende maskiner i sporet. Til syvende og sist skal det være enkelt å bytte ut kabler, eller supplere med nye kabler, så tilgangen til kanalene må være enkel.



Figur 2-5: Standard design for kabelkanaler av betong. Kilde: (Skjæveland, u.å.)

Slik det er vist i Figur 2-5 finnes det flere varianter av betongkanaler. I jernbanebransjen er det utarbeidet standard design på kabelkanalene med enten ett, to eller tre løp. Parallelt med sporet er det vanlig å legge flere kanaler sammen i en kombinasjon, for eksempel to pluss ett løp eller tre pluss ett løp, alt avhengig av behovet.

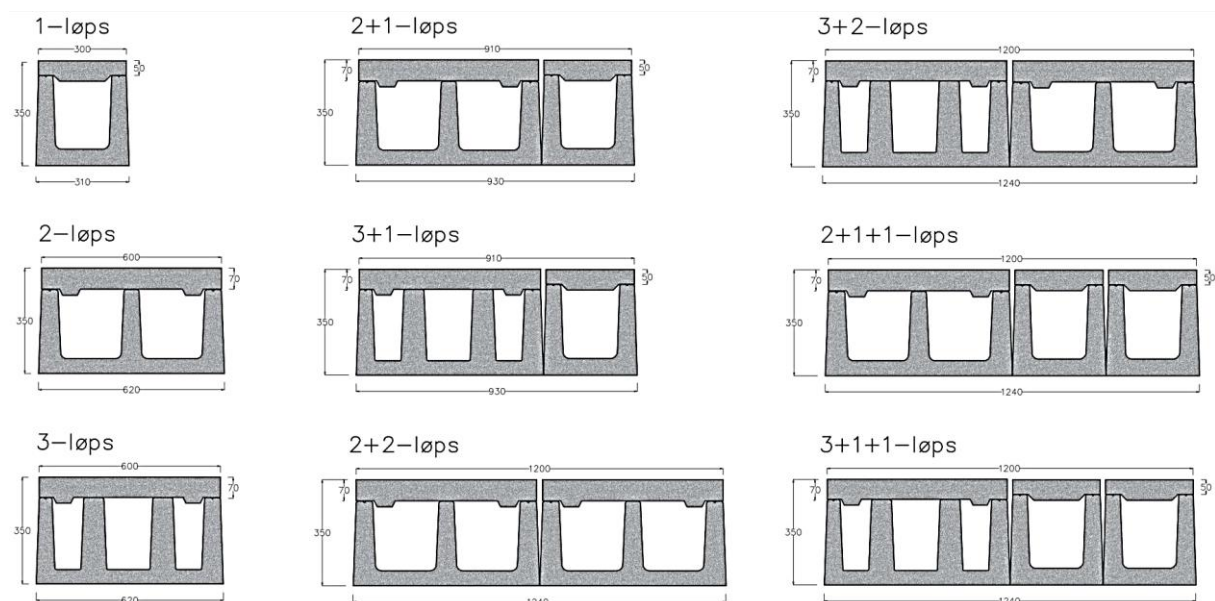
2.3.3 Valg av kabelkanalkonfigurasjoner

Valg av kabelkanalkonfigurasjoner til videreanalyse er strengt avhengig av tillatte kabelplasseringer i kanalene, samt det totale behovet av kabelføringene til ulike objekter. I denne oppgaven er det ikke skilt mellom legging av kanaler langs spor på stasjoner og langs spor på linjen. Det skiller heller ikke mellom plassering av kabelkanaler på nye og eksisterende baner. Behovet for antall kanaler og deres konfigurasjon vil i tillegg variere mye fra prosjekt til prosjekt.

For enkeltsporete strekninger, eksempelvis eksisterende baner, vil det ofte være behov for én 1- eller 2-løps kanal langs spor mellom stasjoner. Denne vil tjene for føring av signal- og telekommunikasjonskabler. Én 1-løps kanal vil ofte være tilstrekkelig for føring av signalkabler til akseltellere ved sporveksler i et ERTMS signalsystem.

På stasjoner er det ofte behov for strømforsyning til sporveksler og diverse elektrotekniske anlegg i tillegg. Det vil derfor være gunstig å se på enten 2+1-løps, eventuelt 3+1-løps konfigurasjon. For nye strekninger, for eksempel InterCity strekningene, kan antall kabelkanaler være så stort som 2+2-løps til hvert spor, dersom OPI kanaler eller andre alternative føringsmetoder ikke kan eller vil benyttes.

Basert på tillatte kabelkonfigurasjoner og erfaring fra ulike prosjekter er følgende kabelkanalkonfigurasjoner foreslått til videre analyse i oppgaven. Konfigurasjoner dekker det meste av behov for kabelføring langs jernbanespor i Norge.



Figur 2-6: Kabelkanalkonfigurasjoner for videreanalyse i oppgaven.

2.4 Over- og underbygning

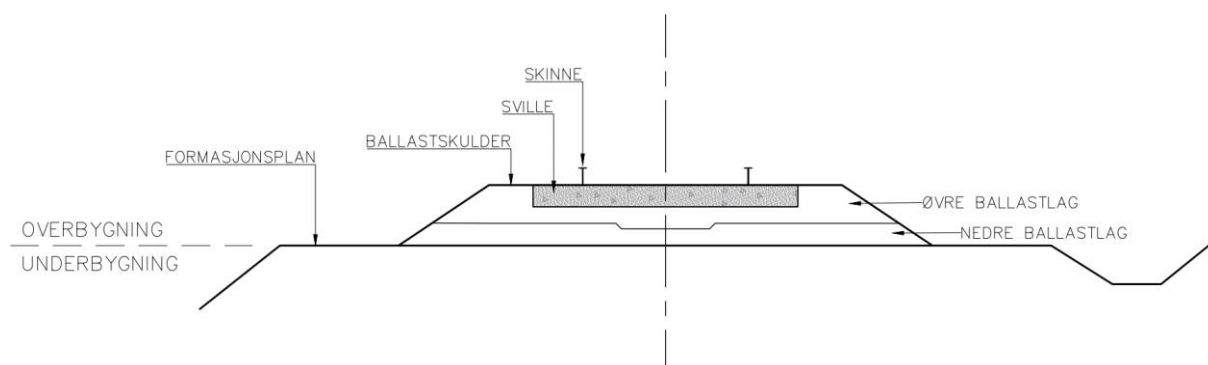
Det er i forrige avsnitt redegjort for hvilket kabelbehov eksisterer langs jernbanespor. Noen form av føringsveier vil ha stor påvirkning på utforming av over- og underbygning. Dette gjelder spesielt kabelkanaler av betong som krever sin plass og veier relativt mye. Utforming av over- og underbygningen og plassering av kabelkanaler bør derfor koordineres godt. Under gis det en liten innføring i oppbygging av banelegemet med vekt på konvensjonelt ballastspor og dets viktigste egenskaper.

2.4.1 Ballastspor

Banelegemet består av over- og underbygning, hvor formasjonsplanet danner en grense mellom disse elementene. Overbygningen i et ballastspor består av skinner, sviller, befestigelse og ballast, samt en del andre komponenter, blant annet sporveksler. Ballasten deles inn i to sikt; øvre og nedre ballastlag. Underbygningen består av masser liggende under formasjonsplanet; forsterknings- og frostsikringslaget, samt alle drenerings-systemer. Tunneler, bruer og andre konstruksjoner langs spor regnes også med som en del av underbygningen. Ballastsporets oppbygging er vist i Figur 2-7 nedenfor.

Over- og underbygningskonstruksjonen er utsatt for store krefter og tunge laster. Forenklet kan det sies at laster fra et tog overføres via skinner og sviller nedover i ballasten, og videre mot underliggende lag i underbygningen. Hovedfunksjonen til overbygningen er å sikre en stabil og komfortabel kjørevei for tog, mens underbygningen sikrer stabil leie for overbygningen og andre installasjoner langs sporet.

Konvensjonelt spor med ballast og sviller har vært den mest benyttede sporkonstruksjonen i Norge og verden for øvrig i mange år. Alternative løsninger til ballastspor har vært lite praktisert i Norge. Foreløpig er det kun den nye tunnelen i Ulriken mellom Bergen og Arna på Vestfoldbanen, samt Follobanetunnelen, hvor det bygges alternative overbygningskonstruksjoner av seriøs art i form av ballastfritt spor. Det er flere fordeler og ulemper med konvensjonelt spor. Ballastspor er først og fremst langt mer elastisk enn fast spor, noe som gjør at overbygningen er mindre følsom for eventuelle setninger i undergrunnen, samt mindre støygivende. Den største ulempen med ballastspor er et kontinuerlig vedlikeholdsbehov (Løhren, 2011b, s. 2).



Figur 2-7: Prinsippskisse for oppbygging av ballastspor.

2.4.2 Ballastens funksjon

Den primære oppgaven til ballasten er å overføre vertikale krefter som kommer fra et tog gjennom skinner og sviller videre ned i underbygning. Ballastens andre, men ikke mindre viktige funksjoner, er: (Li *et al.*, 2016, s. 72; Jernbaneverket, 2014, s. 5)

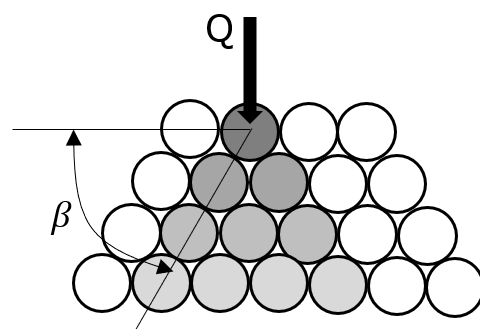
- danne et jevnt fundament for sporstigen (skinner og sviller)
- overføre spenninger fra underkant sville og fordele spenninger jevnt til undergrunn
- sikre tilstrekkelig elastisitet av sporet for å unngå lokale deformasjoner
- sikre tilstrekkelig stabilitet for skinnegangen på tvers og langs av sporet
- sikre tilstrekkelig drenering og avrenning fra overbygningen
- absorbere vibrasjoner og dempe støy fra togtrafikken
- bistå i frostsikring av banelegemet
- gi mulighet for sporgeometrijustering og retting av sporfeil

For å kunne oppfylle disse funksjonene stilles det en rekke krav til ballastens form og egenskaper. I Norge er ballastpukk med fraksjon 31,5-63,0mm det mest benyttede friksjonsmaterialet i overbygningen. Dette skyldes flere årsaker og er et kompromiss av mange faktorer.

2.4.3 Ballastens viktigste egenskaper

Lastfordelingsevnen er en av de viktigste egenskapene til ballasten. Fordeling av laster og spenninger fra svilleunderkant bør være mest mulig jevnt for å unngå lokale og varige deformasjoner i underliggende jordart. Beregninger viser at et fundament av friksjonsmasser med fraksjon 0-300mm eller 20-200mm og totaltykkelsen 70cm under sville, er tilstrekkelig for å oppnå sikkerhet mot brudd i undergrunnen (Nåslund, 2021, s. 6). Dette inkluderer ballast- og forsterkningslag for hovedspor. Av praktiske årsaker til utlegging av sviller og ballastrensing, er bruk av grove masser lite anvendelig i ballastlaget. Det benyttes derfor et lag av ballastpukk (31,5-63mm) på toppen av forsterkningslaget. Andre resultater viser at for å oppnå jevn stivhet og redusere påkjenning mot underliggende grunn, er det nødvendig med 100-105cm friksjonsmasser under svillen (Li *et al.*, 2016, s. 207-210). Totaltykkelsen av ballastlaget vil også variere med type sporkonstruksjon og undergrunn. Flerårige undersøkelser viser at et 25-35cm ballastlag under sville, på toppen av et forsterkningslag, er tilstrekkelig for lastfordelingsformålet (Jernbaneverket, 2014, s. 3).

Ballastens gode bæreevne skyldes høy indre friksjon til kubiske og skarpe steiner. Takket høy indre friksjon kan lastene overføres over et større areal uten at underliggende og svakere jordarter deformeres. Dette skyldes igjen at friksjonsmaterialet har en evne til å overføre laster fra en stein til en annen stein under med en viss vinkel, slik at lastoverføringen til underliggende lag blir jevnt fordelt over hele ballastens bredde (Grulkowski *et al.*, 2013, s. 68). Dette er illustrert i Figur 2-8, der Q viser påført last og β er indre friksjonsvinkel til pukkstein.

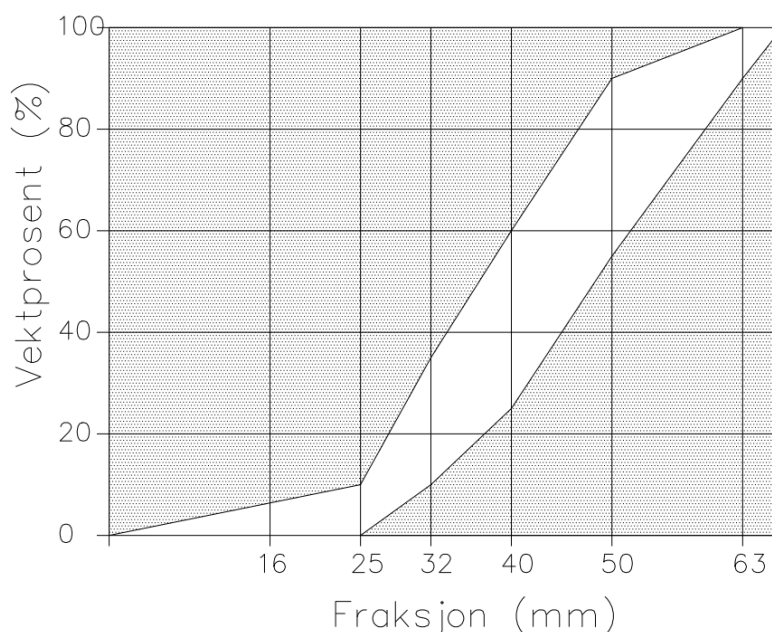


Figur 2-8: Skjematisk overføring av spenninger i godt pakket ballastpukk, basert på (Grulkowski *et al.*, 2013, s. 68)

For lav ballasthøyde kan resultere i for høye spenninger mellom svillunderkant og ballaststein, samt deformasjoner i undergrunn. Dette vil igjen resultere i nedknulling av

ballaststein under svillen og forurensning av ballasten med finstoff. Tilsvarende vil for høye spenninger mot undergrunnen føre til forurensning av ballasten med finstoff migrerende oppover fra dette laget.

Foruten kornform stilles det krav til korfordeling. Slik det er nevnt tidligere, er standard fraksjon for norsk jernbaneballast 31,5-63,0mm. Innenfor denne fraksjonen stilles det krav til vektfordeling for ulike steinstørrelser gitt i prosent. Dette er illustrert i Figur 2-9 nedenfor. Kornfordelingen er et kompromiss mellom god bæreevne og god vannavrenning. For å sikre best mulig bæreevne er det ønskelig en velgradert steinmasse, det vil si små og store stein blandet sammen. Små stein fyller ut hulrom mellom store stein og sporet kan pakkes godt. Dette gjør at kontaktflaten mellom steinene blir større, noe som gjør at friksjonen mellom steinen øker, og derfor øker også ballastens bæreevne.



Figur 2-9: Tillatt siktekurve for ballast i Bane NOR. Kilde: (Jernbaneverket, 2014, s. 10)

Samtidig er det nødvendig å sikre god drenering av ballasten. Siktekurven er tilpasset slik at det er nok hulrom mellom steinene for at vannet skal kunne renne fritt fra ballasten. Det betyr at andel av små stein i ballastmassen må være begrenset. Med andre ord er det en avveining mellom bæreevnen og drenerende egenskaper til ballasten. Det er viktig at pukken ikke dekkes med tette masser slik av vannavrenningen forhindres. Overbygningen skal stå fritt av vann og tørt.

I tillegg til at vannet skal dreneres bort, har hulrommet mellom steinene en annen funksjon. Det skal sikre nok plass til fremtidig finstoffmaterial som kommer i ballasten av ulike årsaker. Jo høyre hullromprosent, desto lengre levetid til ballasten, og desto lengre vedlikeholdsintervallet.

Det stilles en rekke andre krav til ballastmaterialet som er mindre viktige for denne oppgavens formål. Det kan nevnes blant annet krav til slitestyrke, bergart og ballastens renhet.

2.4.4 Ballastforurensning og -separering

Finstoffet er definitivt den største fienden til ballasten. Norsk Standard, NS-EN 13450 (2009, s. 7) definerer finstoffet som kornmaterialet med diameter mindre enn 0,063mm.

Finstoffinnholdet i ballasten kan ha ulike kilder, men kommer primært enten fra nedknusing av ballastpukken under gjentatte laster fra togtrafikken, eller fra undergrunn dersom ballasttykkelsen er underdimensjonert. Ifølge Li (2016, s. 83) ca. 76% av studerte steder med forurenset ballast i USA hadde som årsak nedknusing av pukken. Kun 13% av tilfeller hadde migrering av finstoff fra undergrunn som forureningsårsak. Gjenstående 11% dekkes av andre årsaker, for eksempel materialer transportert med vind, rester etter sporets vedlikehold eller forurenninger fra passerende tog.

Ballastpukk i spor med betongsviller er spesielt utsatt for nedknusing på grunn av svillens lave elastisitet. Nedknusingseffekten kan øke dersom sporet etableres med for lav ballasthøyde på et hardt underlag (fjell, bru). Det dannes finstoff som begynner å være skadelig først etter å ha kommet i kontakt med vann, noe som er uunngåelig på et jernbanespor. Det danner seg en elastisk masse som reduserer skjærkrefter mellom pukkesteinene og sporets stabilitet over tid reduseres drastisk. Figur 2-10 viser en mulig effekt av ballastforurensningen i form av såkalte vaskesviller. På grunn av høyt finstoffinnhold vil ikke vannet kunne ledes bort fra sporet. Det danner seg en masse som presses opp ved togpassering. Sporets bæreevne og sidestabilitet svekkes. Fare for slosslyng og avsporing øker.



Figur 2-10: Vaskesviller på befaring. Narvik stasjon, 2022. Kilde: Rambøll Norge

Ifølge Li (2016, s. 85) og tidligere gjennomførte studier, har ballastforurensning vært hovedårsaken til degradering av sporgeometri. Konsekvensen av dette er økende behov for vedlikehold av sporet og dermed større kostnader.

Nåslund (u.å., s. 1) påpeker at problemet med finstoffet kunne vært redusert dersom det hadde ligget mer jevnt fordelt langs sporet. Finstoffet fordeles dessverre ujevnt på grunn av separering. Separeringen starter allerede på et transportbånd i et pukkeverk hvor fallende ballaststein danner en steinkjegle med en siktekurve avvikende fra kravet. Store stein havner ofte i bunn av kjeglen med små stein liggende på toppen. Fallende stein treffer andre stein på toppen av kjeglen og det foregår knusing. På denne måten produseres det mer finstoff som senere tas med på anlegget med lastebiler. Fordi finstoffet er ikke lett å oppdage legges det ut i sporet utilsiktet. Konsekvensen av dette er varierende finstoffmengde i ballastlaget som gjør at ved togtrafikkbelastning av sporet oppstår det ujevne setninger, såkalte vindskjevheter. Vindskjevheter øker igjen behovet for sporvedlikehold, forårsaker saktekjøringer, dårlig kjørekraft og i ytterste konsekvens kan føre til avsporinger.

Ifølge Nåslund (u.å., s. 1) kan vindskjevheter ha en annen årsak. Parallelt med separeringen av selve finstoffet, foregår separering av større korn på en lignende måte. Dette fører til at prosentfordelingen i ballastens siktekurve havner utenfor tillatte grenser. Dersom kornstørrelser ikke er jevnt fordelt i ballasten, vil dette også kunne føre til lokale setninger som resulterer i vindskjevheter.

2.5 Vedlikehold av ballasten

Tradisjonelt ballastert spor har vært den mest benyttede sporkonstruksjonen for over 150 år. Tester gjennomført i Tyskland allerede i 1960-tallet viste at ballasten er det mest følsomme elementet i banelegemet (Grulkowski *et al.*, 2013, s. 85). Rystelser ved gjentatte passeringer av tog gjør at ballastprofilen deformeres både i plan og høyde. Deformert ballastprofil over lang tid fører til reduksjon av sporets stabilitet. Dette til slutt fører til hastighetsnedsettelse og dårlig kjørekomfort (Grulkowski *et al.*, 2013, s. 85). Dagens jernbane er preget av et løp mot høye hastigheter og store laster. Høye hastigheter og økende aksellaster påvirker ballastens levetid negativt. Esveld (2015, s. 102) påstår at 10% større aksellast fører til 1,2 - 1,5 større degradering av sporgeometri og proporsjonelt større behov for sporvedlikehold. Grulkowski (2013, s. 85) poengterer at i Tyskland har en funnet ut, at en økning av hastigheter fra 160-200 km/t til 250-300 km/t, dobler vedlikeholdskostnader knyttet til den klassiske sporkonstruksjonen.

Ballasten skal være ren og tørr for å kunne opprettholde sine funksjoner. Gjentatte passeringer av tog fører til nedknusing av ballaststein under sviller og til forurensninger av ballasten med finstoff, med de konsekvensene som ble beskrevet tidligere. Ballastlaget er derfor svart utsatt og trenger kontinuerlig vedlikehold. Vedlikeholdet skal i utgangspunktet holdes på så lavt nivå og kostnad som mulig.

Ballastrensingen er den operasjonen som har størst inngrep i ballastlaget. Det er derfor i denne oppgaven, hvor det diskuteres plassering av kabelkanaler tett på ballastlaget, ansett som mest naturlig å se på nettopp denne operasjonen i detalj. Av andre vedlikeholdsaktiviteter i overbygningen kan det nevnes:

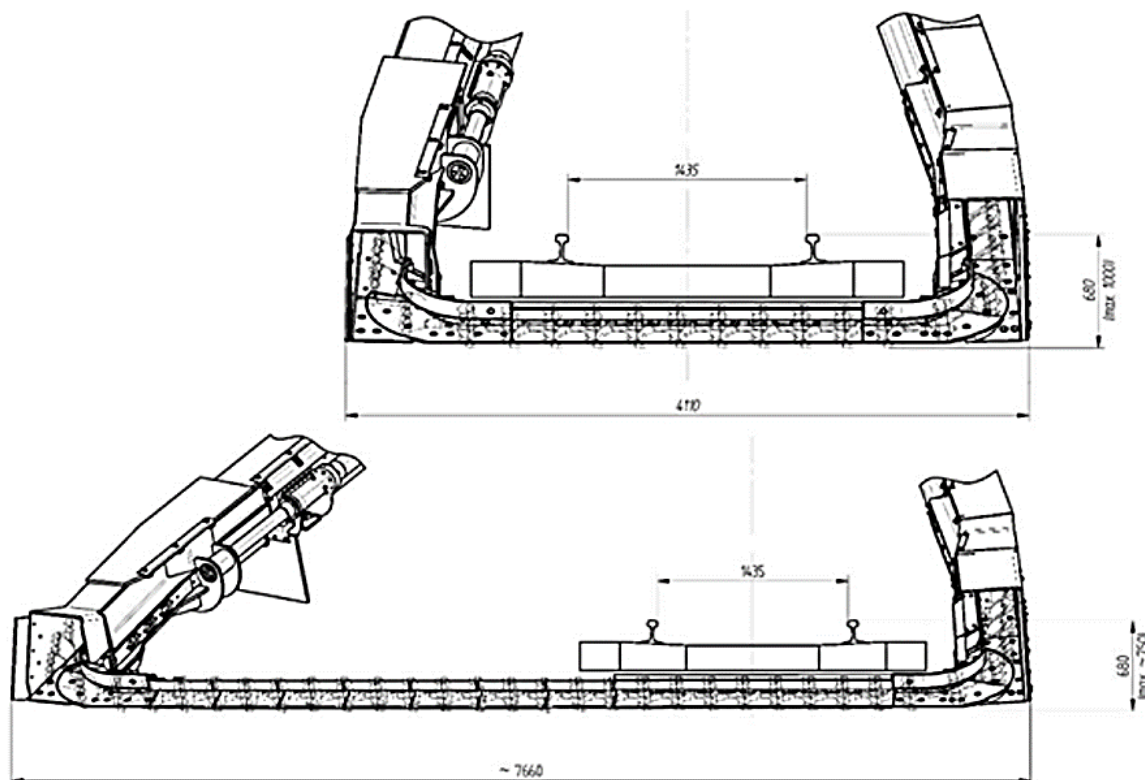
- sporpakking
- ballastprofilering
- sporstabilisering
- snøbrøyting

2.5.1 Ballastrensing

Ifølge ERRI sine krav vil ballastrensing være nødvendig dersom 30% av prøvemassen har passert et sikt med diameter 22,4mm (Esveld, 2015, s. 235). Dette indikerer at behovet for ballastrensingen ikke er strengt avhengig av finstoffinnholdet (partikler < 0,063mm), men heller av skjevheten i siktkurvens nedre grense! Bane NOR har ivarettar dette kravet i sitt tekniske regelverk for ikke så lenge siden. Nåslund (2021, s. 9) bekrefter at dersom mengde av nedknusningsprodukter (partikler finere enn 22,4mm) i ballasten overskrider 10%, vil massen begynne å oppføre seg plastisk, og permanente setninger i sporet vil forekomme ved belastninger. Dette understreker viktigheten av å unngå partikler mindre enn 22,4mm i ballastlaget, og gir en indikasjon på når ballastrensingen skal kunne først være aktuell.

Ballastrensingen kan utføres på ulike måter. Lokale og små områder kan renses enten ved å fjerne forurenset pukk med en gravemaskin eller ballastsuger. Over lengre strekninger brukes gjerne et ballastrenseverk. Det er spesielt den siste metoden som er interessant med tanke på plassering av kabelkanaler langs spor.

Det er flere produsenter og typer av ballastrenseverk i Europa. Av de mest kjente kan Plasser & Theurer og Matisa nevnes. I en samtale med Baneservice AS, som utfører vedlikeholdsaktiviteter for Bane NOR, er det opplyst at selskapet jobber på Plasser & Theurer RM-76 sitt renseverk.



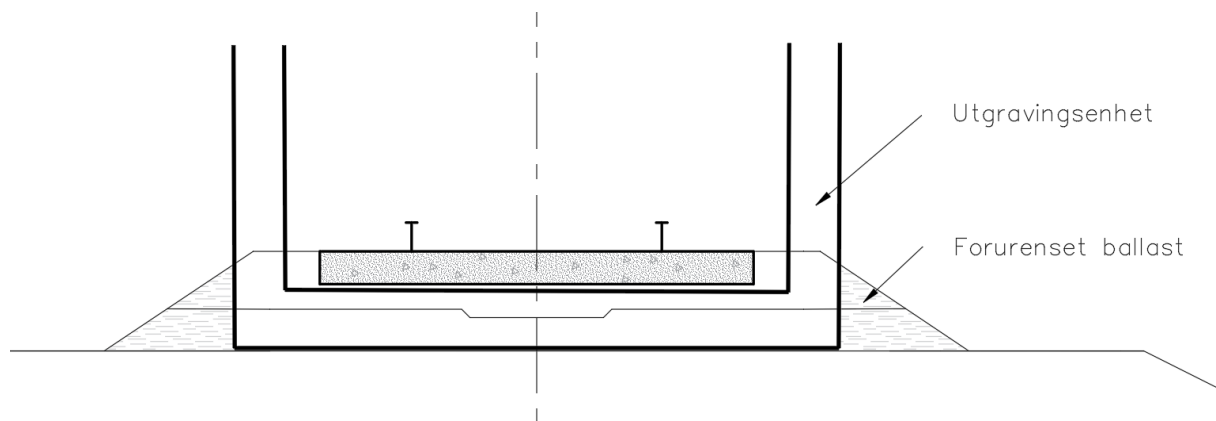
Figur 2-11: Standard og utvidet graveenhet i et moderne ballastreenseverk fra Plasser & Theurer. Kilde: (e-post fra Plasser & Theurer, 24.11.2022)

Renseverket fungerer på den måten at et kjede som graver ut ballasten monteres under sporstigen. Ballasten tas opp fra sporet i en viss dybde under svillene og i en viss bredde fra senterspor. Materialet transporteres videre opp til en sikteenhet hvor egnete stein til gjenbruk separeres fra finstoff og andre forurensninger. Materialet som kan gjenbrukes legges tilbake i sporet, mens uegnete masser transporteres på et bånd til separate vogner. Uegnete masser kan enten fraktes bort fra anlegget eller brukes til utvidelse av formasjonsplanet eller fyllinger (Løhren, 2011a, s. 21). Prosessen er fullstendig automatisert og kan foregå kontinuerlig.

Moderne renseverk skal oppfylle en rekke funksjonskrav som stilles til rensingen. Det er viktig at hele ballastprofilen renses, inkludert ballastskuldre. I tillegg ønsker en å rens ballasten under sporvekslene. Dette innebærer at renseverket må ha mulighet for skjøting og utvidelse av graveenheten. Renseverket skal kunne ha mulighet til å forme formasjonsplanet under rensprosessen, både på tvers og langs av sporet. Det er også ønskelig med tilstrekkelig utgravingsdybde, slik at hele ballastprofilen kan renses, inkludert der hvor sporet ligger med overhøyder. Maskinen skal ideelt sett kunne ha mulighet for sideflytting av sporstigen for å komme inn i trange partier, for eksempel ved plattformområder.

RM-76 opererer med to avtagbare graveenheter som gir mulighet for total utgravingsbredde på enten 4030mm eller 4280mm. Utgravingsbredden kan økes til 7,72 m ved bruk av spesielle utvidelsesenheter. Denne rekkevidden er tilstrekkelig for å kunne ta hele ballastbredden for et enkeltspor, med en ekstra margin. Utgravingsdybden til enheten er normalt 25-30cm under svillen, men kan justeres dypere, avhengig av behov (Government of India, 2019, s. 101).

Løhren (2011a, s. 20) nevner to ulike metoder for ballastrensing som har vært praktisert i Norge; vanlig ballastering og flankerensing (ballastskulderrensing). Den første metoden forutsetter rensing av den delen av ballastprofilen som ligger innenfor gravenhetens standard bredde, for å sikre akseptabel elastisitet og bæreevne av sporet. For RM-73 vil dette utgjøre 4,03 – 4,28m. Denne metoden har vært praktisert i Norge i mange år, før en har innsett at urensede ballastskuldrene med mye finstoff, har hindret vannavrenningen fra ballasten. Resultatet av dette er vann stående i ballasten. Dette har ført til at flankerensingen har blitt mer populært den siste tiden. Ved flankerensingen renses kun ballasten fra svilleende og ut. Alternativt ble det brukt ballastfordeler for å dytte ballastskuldre innover mot senterspor i forkant av rensesprosessen. Uansett valg av metode, virker operasjonen å ikke være mest optimal og billigst. Utfordringen med tette skuldre er illustrert nedenfor.



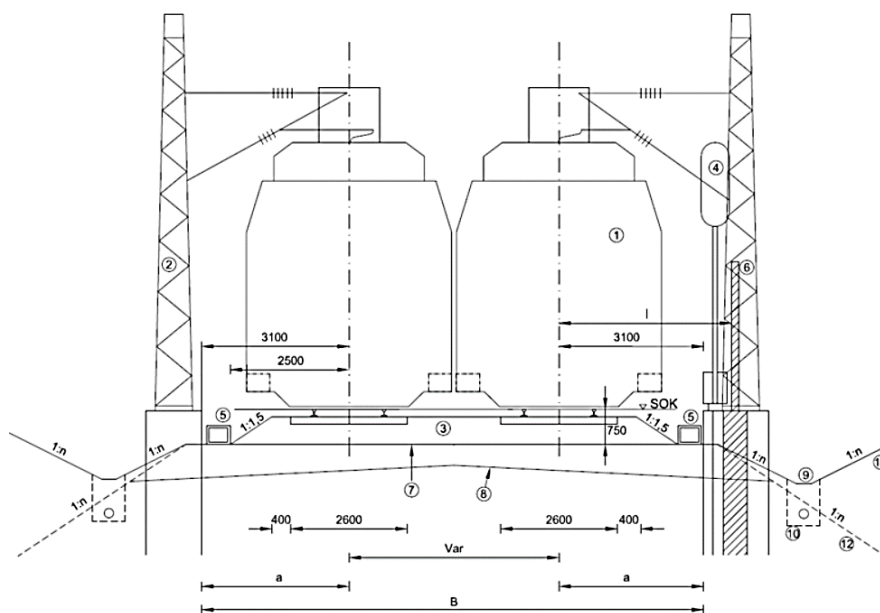
Figur 2-12: Forurensete ballastskuldre ved standard utgravingsbredde.

Ved bruk av moderne ballastrenseverk er dette problemet løst, og hele ballastbredden kan renses under én operasjon. I hvert fall i teorien. Plassering av kabelkanaler vil ha påvirkning på hvor bredt og godt ballasten kan renses. Videre i denne oppgaven ønskes det å synliggjøre denne avhengigheten.

2.6 Plassering av kabelkanaler

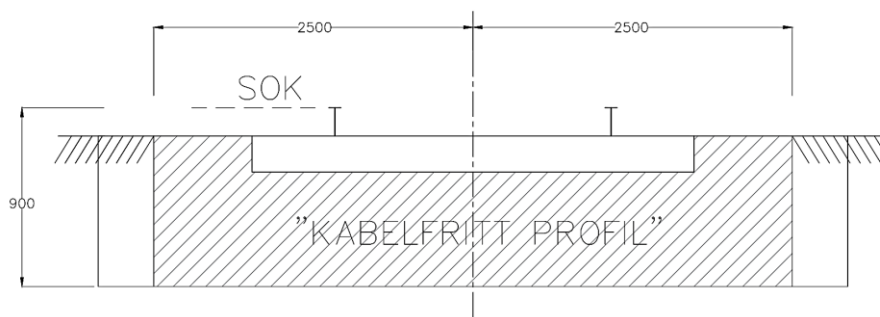
I lys av den informasjonen om ballasten og dens egenskaper som er gitt ovenfor, er det interessant å se hvordan TRV definerer plassering av kabelkanaler i forhold til over- og underbygning.

TRV opererer med to eksempler av normalprofiler for spor i dagen; ett for enkeltspor og ett for dobbeltspor. Prinsippet for legging av kabelkanal er identisk for enkelt- og dobbeltspor, derfor vises det kun det ene tilfellet. Dette er illustrert i Figur 2-13 nedenfor.



Figur 2-13: Eksempel på normalprofil daglinje, dobbeltspor. Kilde: (Bane NOR, 2022e)

Slik det kommer frem av figuren skal kabelkanaler legges i en avstand på minimum 2,5m fra senterspor. Denne avstanden kommer fra et krav om kabelfritt profil. Kabelfritt profil er fastsatt ut ifra behovet for å gjennomføre maskinelt arbeid i ballastlaget. Kabler liggende langs spor bør ligge utenfor kabelfritt profil for å unngå skade ved for eksempel pakking av spor eller ballastrensing. Ideen med kabelfritt profil er illustrert nedenfor.



Figur 2-14: Kabelfritt profil basert på krav i TRV. Kilde: (Bane NOR, 2022d)

Det er tidligere i avsnitt 1.2 listet opp en rekke krav TRV stiller til legging av kabelkanaler på formasjonsplanet. Kravene beskriver blant annet legging av kanaler på et pukkfundament, noe som ikke fremgår tydelig av de normalprofilene som Bane NOR opererer med i dag. Normalprofilene til Bane NOR viser kabelkanaler liggende direkte på formasjonsplanet, uten noen form for fundament eller oppfylling. Dersom kabelkanaler skal legges på et fundament av pukk, er det ikke definert dimensjoner på fundamentet og dermed heller ikke høyde av kabelkanaler i forhold til skinne eller sville.

I tillegg er det uklart hva som ligger i begrepet stabilitet av kabelkanaler med tanke på oppfylling og eventuelle arbeider i ballastlaget. TRV definerer ikke hvilke arbeider i ballastlaget som skal kunne påvirke plasseringen av kabelkanaler. Dersom det skal fylles

opp rundt kabelkanaler for å sikre stabilitet, er størrelsen og formen på oppfyllingen ikke definert.

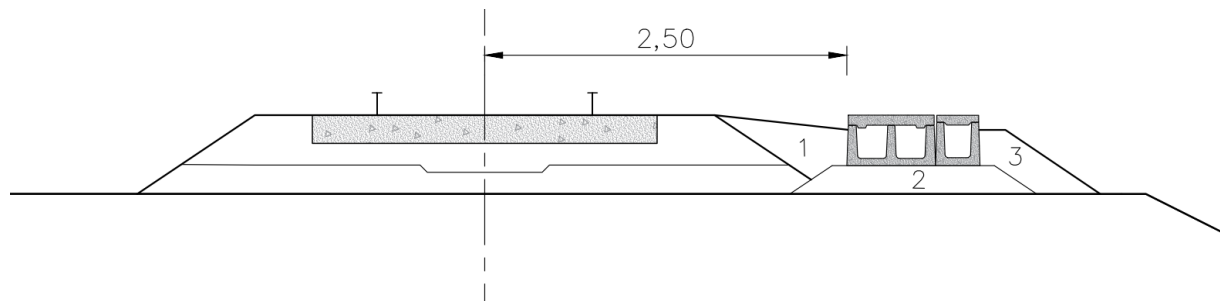
Teknisk designbasis for InterCity (Bane NOR, 2019c, s. 52-55), som er en infrastrukturveileder for høyhastighetsbaner, opererer med noen forskjellige normalprofiler. Fundamentet under kanaler og oppfyllingen rundt er skissert, men utformingen og dimensjoner av disse elementene ikke er definert.

Det er på side F i Vedlegg 3 vist noen eksempler på diverse forsøk for fastsettelse av dimensjoner for fundamentet under kanalen og oppfyllingen rundt denne. Temaet har blitt gjentatte ganger tatt opp i ulike prosjekter og det er derfor behov for å:

- fastsette dimensjoner for fundamentet under kanaler
- fastsette dimensjoner for oppfyllingen rundt
- fastsette optimal plassering av kanaler i høyde
- fastsette hvilke materialer skal inngå i de ulike massene rundt kanalen

Figur 2-15 nedenfor viser én 2-løps og én 1-løps kanal på et pukkfundament med fraksjon 8-20mm (2), oppfyllingen mot ballasten (1) og oppfyllingen på utsiden av kanalen (3), begge av ukjent fraksjon. Basert på informasjonen om ballasten og dens egenskaper som er gitt i forrige avsnitt, er det lurt å stille spørsmål, hvordan plassering av kabelkanaler tett på ballastlaget påvirker dens funksjon, og hva de ulike lagene rundt kabelkanalene bør bestå av.

Kapittel 4 vil prøve å svare ut på hva den optimale plasseringen av kabelkanaler med tanke på prosjektering, bygging og vedlikehold er. Dette skal undersøkes for de kabelkanalkonfigurasjonene som tidligere ble beskrevet i avsnitt 2.3.3, og i forhold til diverse overbyggningsoppsett av overhøyde, sporradius, svilletype m.m.



Figur 2-15: Masser rundt kabelkanaler. 1 - oppfylling mot ballast, 2 – fundament under kanaler, 3 - oppfylling på utsiden av kanaler.

3 Metode

Det er i forrige avsnitt redegjort for teori knyttet til kabelkanaler og grensesnittet mellom kabelkanaler og over- og underbygningen.

Dette kapitlet gir en grundig innledning til metoder som er benyttet i etterfølgende avsnitt for å kunne besvare forskningsspørsmålene. Formålet med denne oppgaven er å se på plassering av kabelkanaler langs spor og svare på spørsmål om hvilke konsekvenser legging av disse har for over- og underbygning. Problemstillingen består av en rekke delspørsmål hvor hvert av disse krever egen forskningsmetode.

Intervjuer er benyttet for å kunne konfrontere det faglige grunnlaget beskrevet i forrige avsnitt, med erfaringer og personlige meninger til respondenter som har hatt med føringsveier å gjøre til daglig. I tillegg skal intervjuene gi svar på opphavet til krav TRV stiller til legging av kabelkanaler, samt gi en pekepinn på hva som er viktig ved utformingen av fundamentet og oppfyllingen rundt kanaler fra ulike fagets perspektiv.

Forankring av informasjonen fra intervjuene og det faglige grunnlaget gjøres ved forenklet dimensjonering av pukkfundamentet under kanaler og oppfyllingen rundt disse. Formen og størrelsen på disse elementene vil ha påvirkning på bredden av formasjonsplanet og derfor også på investeringskostnader.

Til slutt gjennomføres det en litteraturstudie av krav til legging av kabelkanaler i utlandet.

3.1 Intervju

Ulempen med litteraturstudie om legging av kabelkanaler langs jernbanespor er at det ikke finnes mye litteratur tilgjengelig om dette temaet. Det er derfor gjennomført en serie av sju intervjuer med personer som har hatt erfaring med kabelkanaler. Fordelen med intervju er muligheten til å innhente personlige meninger og argumenter, samt stille oppfølgingsspørsmål.

3.1.1 Utvelgelse av respondenter

Det var planlagt gjennomføring av fire til åtte intervjuer med respondenter med ulik tilnærming til kabelkanaler. Det ble gjennomført totalt seks individuelle intervjuer og ett gruppeintervju med to personer. To av intervjuene er fullført med prosjekterende fra rådgiverbransjen innenfor fagfeltet føringsveier. To av intervjuene er gjennomført med ansatte i Bane NOR med relevant erfaring innen overbygning og elektro. De ytterligere to intervjuene er gjennomført med ansatte hos entreprenører med deres erfaring fra anleggsplassen. Gruppeintervjuet ble foretatt med to ansatte hos Baneservice AS, for å få et innblikk i deres erfaringer med plassering av kabelkanaler i forbindelse med ballastvedlikehold.

Respondenter i Bane NOR er foreslått av medveileder til denne oppgaven som selv er ansatt i bedriften. Totalt ble intervjuforespørsel sendt til fire personer, hvorav to har sagt ja, én har takket nei, og én har ikke besvart. Andre seks respondenter er rekruttert via mitt kontaktnettverk og gjennom litteraturinnsamlingsprosessen, ved videresending fra person til person.

3.1.2 Intervjuprosess

Det er gjennomført en semistrukturert intervjuprosess, det vil si at forhåndsbestemte spørsmål ble sendt til respondentene i god tid før oppstart av hvert intervju. Dette ga mulighet til god forberedelse. Intervjuobjektene sto fritt til å svare åpent og det var mulig å stille oppfølgingsspørsmål. Spørsmålene var identiske for alle respondentene.

Det ble utarbeidet en intervjuguide som er vedlagt denne oppgaven (Vedlegg 3). Totalt tretten spørsmål ble formulert og stilt til hver respondent. Spørsmålene ble laget med hensyn til å få konkrete svar om plassering av kabelkanaler langs spor, utforming av pukkfundamentet under og oppfyllingen rundt kanalen. Det er undersøkt hva respondentene mener er fordeler og ulemper ved ulike plasseringer av kabelkanaler, samt fordeler og ulemper ved bruk av ulike materialer kabelkanalene er laget av. Bruk av intervjuguiden var et godt hjelpemiddel som har sikret en strukturert intervjuprosess.

Intervjuene er gjennomført på Microsoft Teams, primært på grunn av tilgjengelig tid og avstand til respondenter. Under intervjuprosessen er det tatt lyd- og videoopptak for innsamling av data. Gjennomsnittlig intervjutid er beregnet til ca. førtifem-seksti minutter.

3.1.3 Transkribering

Transkribering er utført i etterkant av hvert intervju i form av et referat. Denne prosessen har sikret at ingen viktig informasjon er oversett. Gjennomsnittlig tid brukt til transkribering av ett intervju var ca. fire-fem timer. Respondenter har fått tilsendt referatet til gjennomsyn og godkjenning. Eventuelle kommentarer ble innarbeidet før bearbeiding av data kunne starte.

3.1.4 Dataprosessering

Det første steget i bearbeidingen av intervjuene var gjennomlesing av alle referater for å skape et større overblikk over helheten. Videre ble det laget ulike kapitler tilpasset hovedspørsmålene i denne oppgaven. Nødvendig informasjon er plukket ut fra hvert intervju og satt sammen i respektive avsnitt.

3.1.5 Etikk

Ettersom det er benyttet opptak under intervjuprosessen, samt at sensitiv informasjon om respondenter har vært behandlet, måtte prosjektet registreres i Norsk senter for forskningsdata (NSD). Alle respondentene har i forkant av intervjuene fått et informasjonsskriv om håndtering av personopplysninger som måtte godkjennes. All sensitiv informasjon oppbevares på privat datamaskin frem til prosjektets slutt og slettes etter sensurering av oppgaven.

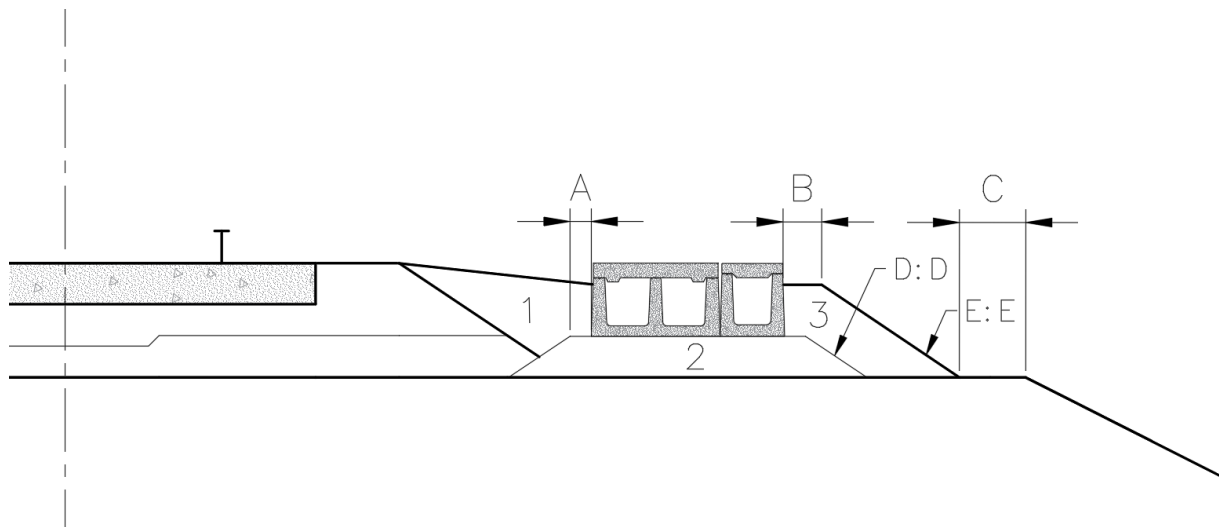
3.2 Dimensjonering og modellering

Tillatte kabelplasseringer presentert i forrige hovedavsnitt danner utgangspunkt for fastsettelse av typiske kabelkanalkonfigurasjoner på formasjonsplanet. Disse danner igjen et grunnlag for dimensjonering av pukkfundamentet og oppfyllingen rundt kanalene. For å kunne fastsette disse størrelsene, er det benyttet noen forenklete geotekniske metoder.

Figur 3-1 nedenfor viser ettersøkte størrelser for fyllinger rundt kanaler, hvor følgende mål inngår:

- A – bredde av fundamentet på utsiden av kanaler
- B – bredde av oppfyllingen på utsiden av kanaler
- C – avstand fra oppfyllingen på utsiden av kanaler til formasjonsplankant

- D:D – skråningshelning til fundamentet
- E:E – skråningshelning til oppfyllingen på utsiden



Figur 3-1: Ukjente størrelser for fyllinger rundt kanaler. 1 - oppfylling mot ballast, 2 - fundament under kanaler, 3 - oppfylling på utsiden av kanaler

3.2.1 Geoteknisk tilnærming

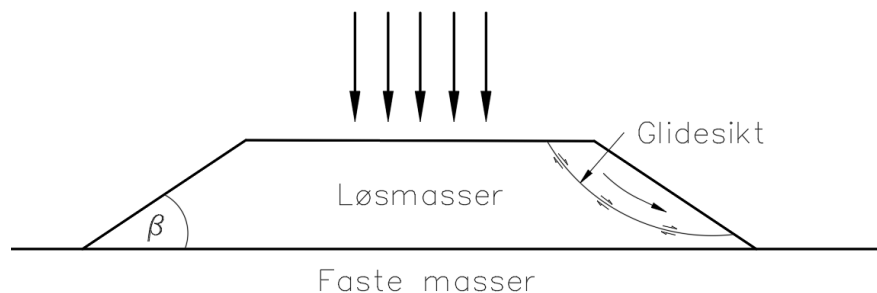
Det er benyttet noen forenklede geotekniske metoder for bestemmelse av teoretisk størrelse av fundamentet under kanaler og oppfyllingen rundt disse. Det er sett på stabilitet av fyllingsmasser under kanaler, bæreevne til fundamentet, og jordtrykk fra fyllmasser mellom ballast i sporet og kanalene.

Stabilitet

Dimensjonering av fundamentet under kanaler består av bestemmelse av fundamentbredde under ulike kanalkonfigurasjoner, vist tidligere i avsnitt 2.3.3. Først bestemmes egenlast og lastfaktorer for utvalgte kabelkanaler. Fundamentbredde (A) fastsettes basert på beregninger av fundamentets sikkerhet mot flateutglidning ved maksimal linjelast fra kabelkanaler. Fylling under kanaler betraktes som en minimodell av friksjonsmasser på et fast og godt fundamentert underlag (formasjonsplanet). Wituns sin modell for stabilitet i fyllinger legges til grunn. Basert på pukkens egenstabilitet angis det maksimal skråningshelning (D:D). Fundamentets minimumtykkelse bestemmes ut fra kanalens optimale plassering i høyde i forhold til spor (sville eller skinne). Denne størrelsen fastsettes derfor på en kvalitativ basis.

Stabilitetsproblemer oppstår i masser under fyllinger, i skjæringer og skråninger, men kan oppstå i selve fyllingen dersom denne er fundamentert på faste masser. I begrepet stabilitet legges til grunn en betraktning om et snitt i en skråning av jord- eller andre løsmasser. Snittet danner et av flere tenkelige glidesikter. I dette snittet gjøres det en likevektsbetraktning for glidedrivende moment på den ene side, og stabiliserende moment på den annen. Figur 3-2 nedenfor viser bruddmekanismen som oppstår i det kritiske glidesiktet dersom skjærfastheten til materialet i grunn blir overskredet av skjærspenningen fra materialets egenvekt og eventuelle tilleggsbelastninger. Dersom

denne utglidningen forårsakes kun av materialets egenvekt, er det snakk om egenstabilitetsproblematikk.



Figur 3-2: Stabilitet av fyllinger på faste masser. Kritisk glidesikt. β - skråningshelning.

For vurdering av stabiliteten innføres ofte en sikkerhetsfaktor mot brudd (F) eller materialkoeffisient (γ_m). Navnsetningen varierer fra land til land og mellom ulike kilder. I denne oppgaven benyttes γ_m for videre analyse. Det kan bevises at for grovkornige materialer, hvor attraksjonen³ $a \approx 0$, kan sikkerhetsfaktoren skrives på følgende form (Wilun, 2019, s. 322-325):

$$\gamma_m = \frac{\tan \Phi}{\tan \beta} \quad (3.1)$$

hvor:

- γ_m – sikkerhetsfaktor mot brudd
- Φ – friksjonsvinkel til materialet
- β – skråningshelning

Det betyr at skråningen forblir stabil så lenge fyllingens skråningsvinkel er mindre enn friksjonsvinkelen til materialet. Formelen gjelder for skråninger i tørre tilstand, det vil si over grunnvannsnivå. I tilfeller med grunnvannstrømning gjennom skråningen, vil det gjelde andre formler som er lite aktuelle for et godt drenert fundament under kabelkanalen.

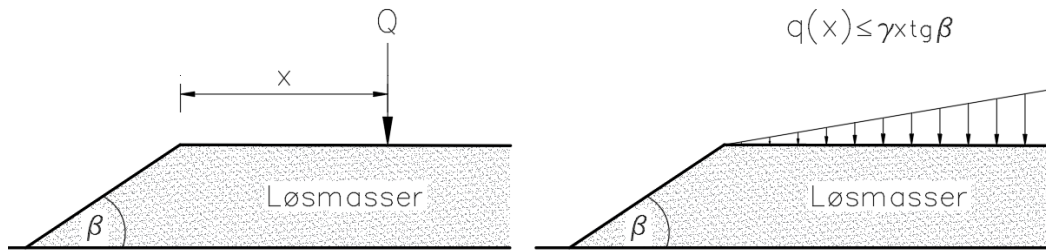
Det finnes flere overslagsmetoder for beregning av stabilitet. Som oftest benyttes direktemetoden med et idealisert, todimensjonalt problem og likevektsbetraktning langs skjærflaten (Statens vegvesen, 2022, s. 173). Her skiller det igjen mellom ulike analysemetoder avhengig av drenerte eller udrenerte forhold. Direktemetoder er best egnet for raske overslagsberegninger av stabilitet.

Aarhaug (1992, s. 335-362) angir lamellemetoder som et alternativ. Lamellemetoden er den tradisjonelle måten å beregne stabiliteten på hvor jordmasser deles inn i vertikale segmenter og det beregnes stabilitet til hvert segment. Metoden er svært nøyaktig og allsidig, men krever langt mer tid enn direktemetoder.

Wilun (2019, s. 322-325) kommer med en annen tilnærming for beregning av stabilitet for fyllinger av løsmasser. Metoden tar utgangspunkt i en kontinuerlig belastning av en fylling hvor lasten (Q) påføres i en konstant avstand fra fyllingskant (x). Belastningen fra

³ Attraksjon – er målet for hvor godt partiklene tiltrekker hverandre i en masse. Avhenger av partikkelens størrelse, fuktighet og mineralsk sammensetning (Wilun, 2019, s. 52)

linjelasten får en form av trekantfordeling mot skråningskanten, slik det er vist i Figur 3-3 nedenfor.



Figur 3-3: Lineær belastning av en fylling. Basert på Wilun (kilde, s. 324).

Maksimal tillat belastning av en fylling kan ikke overskride:

$$q_{maks}(x) = \gamma x t g \beta \quad [kPa] \quad (3.2)$$

hvor:

- γ – tyngdetetthet til materialet
- x – avstand til fyllingskanten
- β – skråningshelning til fyllingen (fra ligning (3.1))

Ifølge Wilun er ligningen gjeldende for fyllinger av løsmasser hvor attraksjonen til materialet, $a = 0$, og massens friksjonskoeffisient, $\Phi > 0$. Ligningen gjelder uavhengig av fyllingshøyde. Metoden forutsetter ingen vannstrømning gjennom fyllingen.

Maksimal tillat linjelast langs fyllingen, Q_{maks} , i en avstand, x , fra fyllingskanten, kan finnes med følgende formel:

$$Q_{maks}(x) = \frac{3q_{maks}(x)x}{4} \quad [kN/m] \quad (3.3)$$

Ved å sette ligning (3.2) inn i ligning (3.3) og løse den med tanke på x , kan minimal avstand fra senter av fundamentet til fyllingskanten uttrykkes med:

$$x \geq \frac{2\sqrt{Q_{opptrende}}}{\sqrt{3\gamma t g \beta}} \quad [m] \quad (3.4)$$

hvor $Q_{opptrende}$ er den gjeldende linjelastningen fra kabelkanalen.

Det kan bevises at metoden gir forsvarlige verdier for maksimale skråningshelninger ved dimensjonering av linjelaster for vei- og jernbanefyllinger.

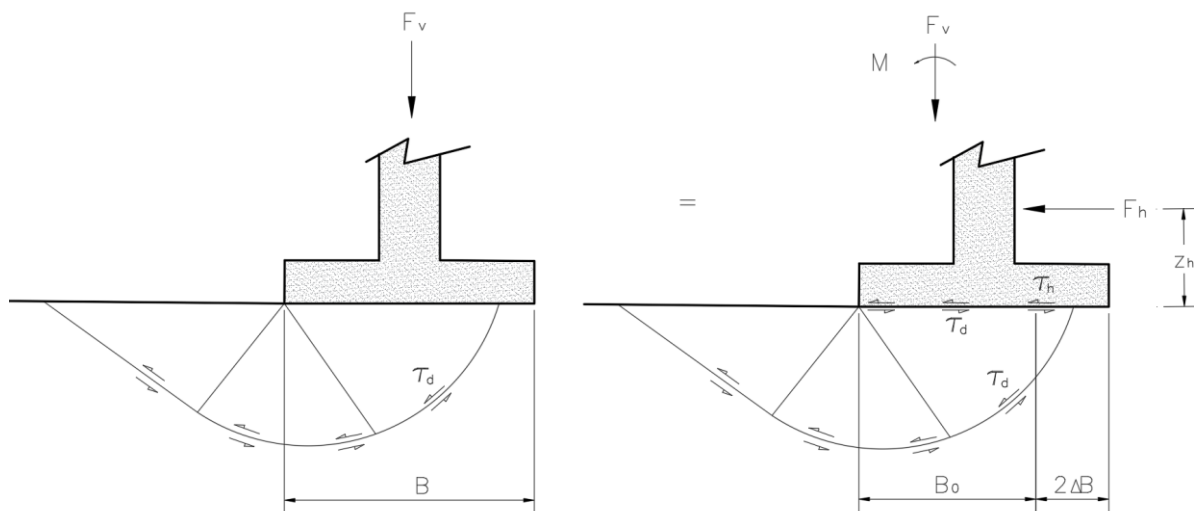
I alle tilfeller blir effektivspenningsanalyse (a- ϕ -analyse, drenert analyse) den eneste riktige metoden for grovkornige materialer rundt kanaler. Dette skyldes at eventuelt poreovertrykk dreneres bort fra materialet umiddelbart etter påført belastning.

Bæreevne

Kabelkanaler legges på et i utgangspunktet godt fundamentert formasjonsplan med tilstrekkelig bæreevne. Det antas derfor å være lite hensiktsmessig å se på bæreevnen til massene under kanaler direkte. Det er derimot interessant å vurdere hvilke ruhetsforhold finnes i massene under kanaler lokalt, samt hvilke krefter må til for at kanaler skal begynne å gli. Denne opplysningen benyttes for dimensjonering av oppfylling på utsiden av kanaler i en kraftlikevektsbetraktning.

Det tas utgangspunkt i bæreevne til et fundament. Statens vegvesen Håndbok V220 (2022) og Aarhaug (1992) angir ulike metoder for beregning av grunnens bæreevne ved fundamentering. Formålet med vurdering av bæreevnen er å avgjøre hvor store fundamenter til en konstruksjon må være, for at masser under ikke svikter. I likhet med stabilitetsberegninger skiller det mellom effektiv- og totalspenningsanalyser, og det er den førstnevnte metoden som vil være gjeldende her av samme årsaker som nevnt i forrige avsnitt.

I vurderingen av bæreevnen ses det på et enten sentrisk eller eksentrisk belastet fundament. For vurdering av kabelkanaler med jordtrykk av pukkmasser fra siden og eventuelle tilleggslaster fra arbeider i sporet, vil eksentrisk belastet fundament være aktuelt. Begge tilfeller er illustrert i Figur 3-4 nedenfor.



Figur 3-4: Effektiv sålebredde for sentrisk og eksentrisk belastet fundament. Basert på Statens vegvesen V220.

Når fundamentet belastes eksentrisk regnes det med lastens eksentrisitet, ΔB , samt fundamentets effektive bredde, B_0 . Resultantkraften, F_v , virker sentrisk om den effektive bredden, det vil si at det er denne bredden som har virkene bæreeffekt. Fundamentets totalbredde kan skrives med formelen:

$$B = B_0 + 2\Delta B \quad [m] \quad (3.5)$$

Eksentrisitet bestemmes ut ifra en momentbetraktning om sålens underkant:

$$\Delta B = \frac{F_h \times \gamma_f \times z_h}{F_v} \quad [m] \quad (3.6)$$

hvor:

- F_h – horisontallast
- F_v – vertikallast
- γ_f – partialfaktor for lastvirkning
- z_h - avstand fra såleunderkant til horisontalkraftens angrepspunkt

Ifølge Aarhaug (1992, s. 210-220) kan opptrenede fundamenttrykk, q_v , bestemmes ut fra egenvekt og eventuelle tilleggslaster, for eksempel trafikklaster. Følgende formel kan benyttes:

$$q_v = \frac{F_v}{A_0} = \frac{F_v}{B_0 \times L} \quad [kN/m^2] \quad (3.7)$$

hvor:

- F_v – vertikallast
- B_0 – effektiv fundamentbredde
- L – fundamentlengde

Horisontalt er fundamentet presset av en dimensjonerende kraft $q_h = F_h \times \gamma_f$, over et areal $B_0 \times L$. Dette gir en skjærpåkjenning mellom fundamentsåle og underliggende masser:

$$\tau_h = \frac{F_h \times \gamma_f}{B_0 \times L} \quad [kN/m] \quad (3.8)$$

Massens utnyttbare skjærfasthet under sålen kan i a-φ-analysen uttrykkes med:

$$\tau_d = (a + q_v) \tan \rho \quad [kN/m] \quad (3.9)$$

der:

$$\tan \rho = \frac{\tan \varphi}{\gamma_m} \quad (3.10)$$

hvor:

- a – materialets attraksjon
- q_v – opptrenede fundamenttrykk
- ρ – mobilisert friksjonsvinkel
- φ – materialets friksjonsvinkel
- γ_m – sikkerhetskoeffisient/materialkoeffisient

Ved å sette skjærspenningen fra fundamentet, τ_h , i forhold til materialets utnyttbare skjærfasthet, τ_d , fås det som kalles for ruhet, r . Ruheten er i en geoteknisk sammenheng friksjon mellom fundamentet og massene under. Ruheten ligger normalt mellom 0 og 1. Dersom forholdet $r = \frac{\tau_h}{\tau_d} > 1$, er den mobiliserte friksjonskapasiteten mot glidning fullt utnyttet, og fundamentet vil kunne begynne å gli. I effektivspenningsanalysen uttrykkes ruheten slikt:

$$r = \frac{\tau_h}{\tau_d} = \frac{q_h}{(a \times B_0 \times L + q_v) \tan \rho} \quad (3.11)$$

Dersom fundamentet skal stå i ro gjelder det:

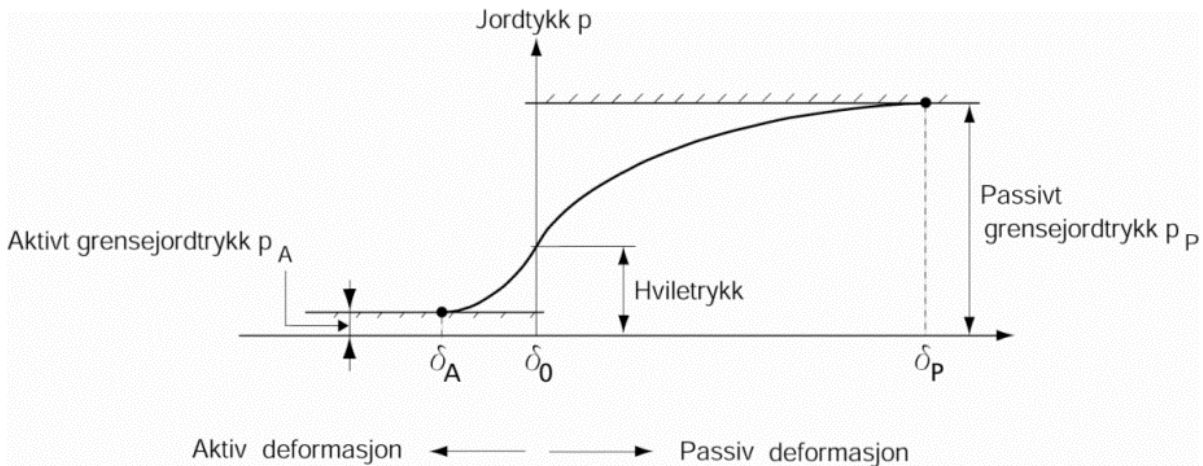
$$q_h < a \times B_0 \times L \times \tan \rho + q_v \times \tan \rho \quad [kN] \quad (3.12)$$

Ligning (3.12) gir et uttrykk for maksimal horisontalbelastning på fundamentet før det begynner å gli. Denne ligningen ønskes benyttes videre for dimensjonering av oppfyllingen på utsiden av kabelkanaler. Slik det ble nevnt innledningsvis, er vurdering av bæreevnen på et godt fundamentert formasjonsplan lite hensiktsmessig. Beskrivelse av bæreevnefaktorer, vurdering av fundamentering i horisontal eller skrått terreng med tilhørende reduksjonsfaktorer, samt krav til ruhet for ulike materialer ved dimensjonering av støttemurer og landkar, er ansett å være lite aktuelt i denne oppgaven. Det samme vil være gjeldende for grunnvannsnivå og dets påvirkning på effektiv tyngdetetthet til massene under fundamentet. Bæreevneanalysen i denne oppgaven avgrenses til vurdering av ruhet i glidesiktet mellom kanaler og pukkfundamentet.

Jordtrykk

Tilbakefyllingsmasser mellom kanaler og ballastpukken i sporet (området 1 i Figur 2-15) vil yte en viss press mot kanalens sidevegg. Dette presset i kontaktflaten mellom kanalen og massene kalles for jordtrykk. I forbindelse med dimensjonering av oppfyllingen på utsiden av kanalen er det ønskelig å bestemme jordtrykkets horisontale resultantkraft.

Det skilles med tre ulike former av jordtrykk; aktivt, passivt og hviletrykk. Dette er illustrert i Figur 3-5. Aktivt jordtrykk (δ_A) forutsetter at konstruksjonen beveger seg bort fra jorda og at horisontaltrykk mot veggen avtar. I motsatt fall antas det at veggen presses inn mot jorda og trykket i kontaktflaten øker. En får passivt jordtrykk (δ_P). Hviletrykket (δ_0) er det trykket som eksisterer i jorda mot en vegg som har ingen bevegelse. Hviletrykket benyttes ofte i analyser hvor masser tilbakefylles bak fundamenter. Massene er forutsatt å ikke bli komprimert. Det er i denne oppgaven antatt at kanalens vegg ikke forskyves etter tilbakefyllingen, og på denne måten fås det konservative verdier av jordtrykket sammenlignet med aktivt jordtrykk.



Figur 3-5: Sammenheng mellom jordtrykk og horisontal veggforskyvning (Statens vegvesen, 2022, s. 187).

Figur 3-6 viser horisontalspenning, σ_{x1} , virkende på kanalens sidevegg i en hviletrykksituasjon. Spenningen mot kanalens vegg har en trekantfordeling med andripende resultantkraft i en avstand $H/3$ fra kanalens bunn. Spenningen mot veggen vil være avhengig av fyllingens tyngdetetthet, $\rho * g$, og effektiv hviletrykkskoeffisienten, K_0 .

Den effektive hviletrykkskoeffisienten sier noe om forholdet mellom effektive vertikalspenninger, σ_z , og effektive horisontalspenninger, σ_{x1} , i en jordart. Ifølge Aarhaug skal beregningen av horisontalspenningen foregå på en effektivspenningsbasis. Den effektive hviletrykkskoeffisienten kan derfor uttrykkes med:

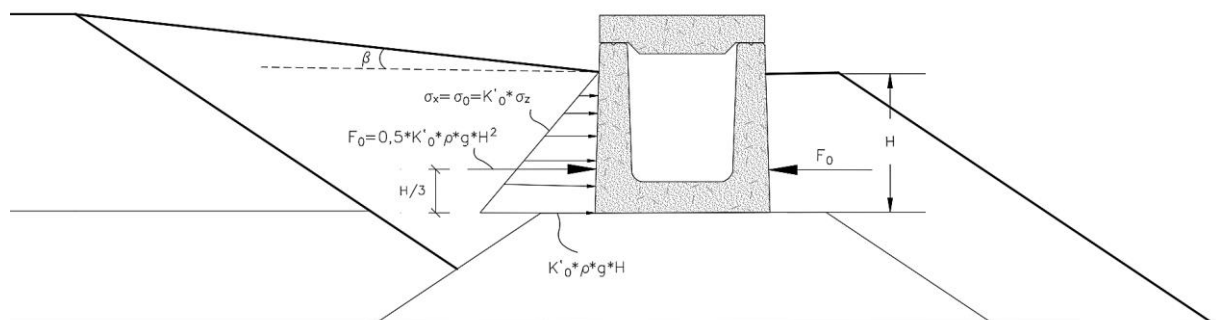
$$K_0 = 1 - \sin\rho \quad (3.13)$$

hvor:

- ρ - utnyttet friksjonsvinkel, iht. ligning (3.10)

Dersom terrenget bak veggen har en helning, β , vil det oppstå skjærspenninger i masser bak kanalen. Jordtrykkets resultanten antas å virke parallelt med jordoverflaten. Dette tas det hensyn til i beregninger av hviletrykkskoeffisienten. Statens vegvesens Håndbok V220 angir følgende formel (Statens vegvesen, 2022, s. 198):

$$K_{0;\beta} = K_0 (1 + \sin\beta) \quad (3.14)$$



Figur 3-6: Hviletrykk mot kabelkanal. Prinsippet basert på Aarhaug (1992, s. 255)

Resultanten til den totale hvilekraften per meter kanal vil være lik arealet av spenningstrekanten, og kan finnes med følgende formel:

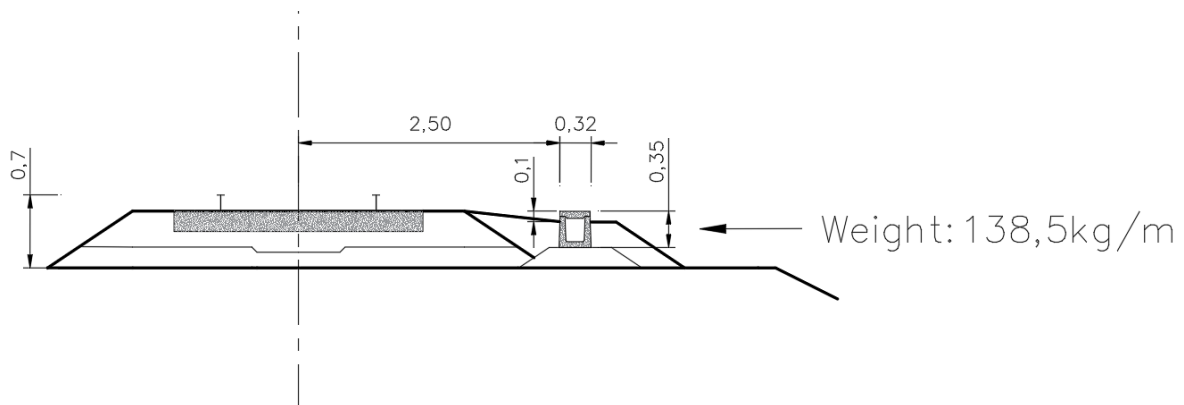
$$\begin{aligned}
 F_0 &= 0,5 \times K_{0;\beta} \times \rho \times g \times H^2 = \\
 &= 0,5 \times K_{0;\beta} \times \gamma \times H^2 \quad [kN/m]
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

Tilsvarende som i beregning av stabilitet og bæreevne, ses det bort fra vannstrømning i masser over formasjonsplanet.

3.2.2 Simulering hos Plasser & Theurer

Dimensjonering av oppfyllingen rundt kabelkanaler har vært den mest kompliserte delen av denne oppgaven. Dette skyldes usikkerheten i hvilke krefter som påvirker kanalens horisontale beliggenhet, i tillegg til opplagte sidetrykk fra oppfyllingens tyngdekraft. Disse kreftene er forutsatt å kunne komme fra maskinelt arbeid i sporet. På grunn av begrenset tid, midler og omfang av denne oppgaven, er det kun valgt å se på ballastrensing og kreftene som påvirker kabelkanaler i denne operasjonen. Ballastrensingen er antatt å yte størst kraft mot kanalens sidevegg på grunn av operasjonens store inngrepsgrad i ballastlaget. Det er ikke gjennomført tilsvarende analyser for andre vedlikeholdsaktiviteter i overbygningen.

Spesielt for denne oppgavens formål, har Research & Simulation avdeling hos Plasser & Theurer i Linz, i Østerrike, gjennomført en datasimulering av en ballastrensingsoperasjon på en av deres vedlikeholdsmaskiner. Datasimuleringen av horisontal påkjenning mot kabelkanaler ved ballastrensing ble gjennomført for kanalkonfigurasjonen vist i Figur 3-7 nedenfor.



Figur 3-7: Valgt oppsett for simulering av horisontale krefter mot en 1-løps kanal ved ballastrensing.

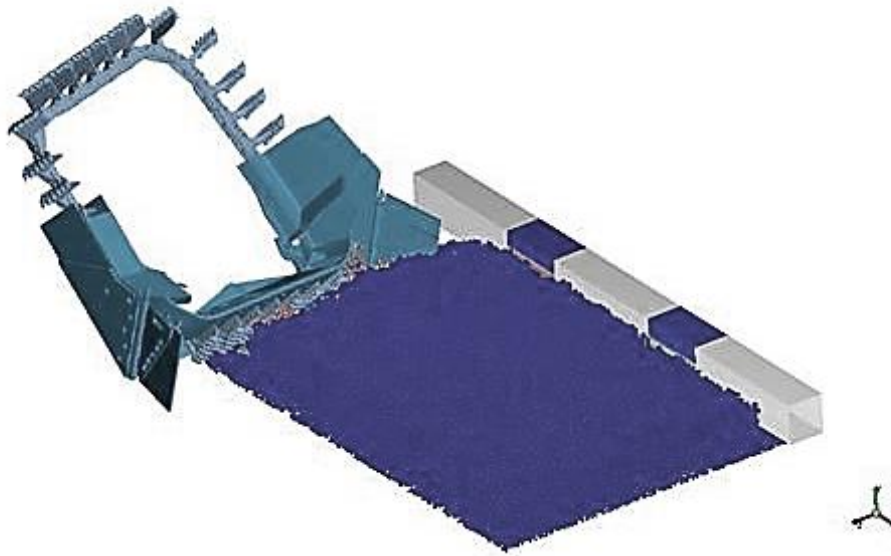
På grunn av begrenset tid og midler har det kun vært mulig å simulere én løsning, for én kabelkanal- og sporkonstruksjonsoppsett. Oppsettet vist ovenfor er antatt å være det mest kritiske. Valget begrunnes i følgende forutsetninger:

- En 1-løps kanal veier minst ($1,57 \text{ kN/m}$). Komponenten til kanalens tyngdekraft vil være lavere sammenlignet med større kanaler eller flere kanaler i parallell. Med andre ord, jo lavere vekt, desto større sannsynlighet for kanalens sideforskyvning.

- Topp av kanalen plasseres i høyde med topp av nærmeste sville. Det er antatt at jo lavere plassering av kanal i forhold til formasjonsplan, desto større kontaktflate mellom graveenheten og kanalen. Dette gir potensielt størst påkjenning fra renseverket.
- Forskjell i ballasthøyde er antatt å ha neglisjerbar påvirkning fordi det er kanalens høyde i forhold til sville som bestemmer størrelsen på kontaktflaten mellom ballasten som presses ut og selve kanalen. Ved økende ballasthøyde, øker kanalens høyde i forhold til sville, mens kontaktflaten mellom ballasten og kanalen blir tilnærmet uendret.
- Avstand fra senterspor til kanalen er gitt av krav i TRV.
- Oppfyllingens høyde under kanalens løkk er gitt av krav i TRV.

Simuleringen er gjennomført i en datasimulator for et moderne sporombyggingstog (RUS 1000S) som kan utføre skinne- og svillebytte, samt ballastrensningen i én og samme operasjon. Toget har vært brukt med stor suksess i flere land i Europa, blant annet i Sverige, Nederland og Østerrike. I utgangspunktet skal RUS 1000S ha de samme egenskapene som andre ballastrenseverk. Simuleringen er gjennomført under følgende operasjonelle forutsetninger:

- Av tidsmessige årsaker er simuleringen gjennomført på en strekning med total 4m lengde. Kun høyre del av snittet vist i Figur 3-7 er tatt med i simuleringen. Avstanden mellom nærmeste del av graveenheten og kanalen er satt til 0,6m.
- Normale operasjonelle forhold for RUS 1000 S er valgt med tanke på togets hastighet og kjedehastighet for graveenheten. Dette er henholdsvis 250m/time og 3,2m/s.
- Det er valgt sfærisk form for stein i ballastpukken for å begrense tiden av simuleringen. Ifølge Plasser & Theurer har dette neglisjerbar påvirkning på sluttresultatet basert på deres tidligere erfaringer med tilsvarende simuleringer.
- Innstilling for allokering av stein i ballastpukken er valgt for ren ballast og ikke forurenset ballast av tidsmessige årsaker. Dette kan i noen grad påvirke resultater. Effekten av simuleringen, ifølge Plasser & Theurer, kan kompenseres ved å justere på andre simuleringsparametere, noe som ble gjort i denne simuleringen.
- Det er antatt tørr ballastpukk i simuleringen. Ballastens dynamiske egenskaper er forskjellige under våte forhold. Dette er ikke undersøkt i denne simuleringen.
- I simuleringsprosessen oppstår det dynamiske effekter ulike steder langs kanalen. For å få mest riktig resultat, var det nødvendig å dele kanalen (4m) i kortere avsnitt. Krefter virkende på kanalen var bestemt både for hver enkel del av kanalen, og for hele kanalen samlet. En slik tilnærming muliggjør bestemmelse av gjennomsnittet for horisontale krefter mot kanalen. Dette er illustrert i Figur 3-8 nedenfor.

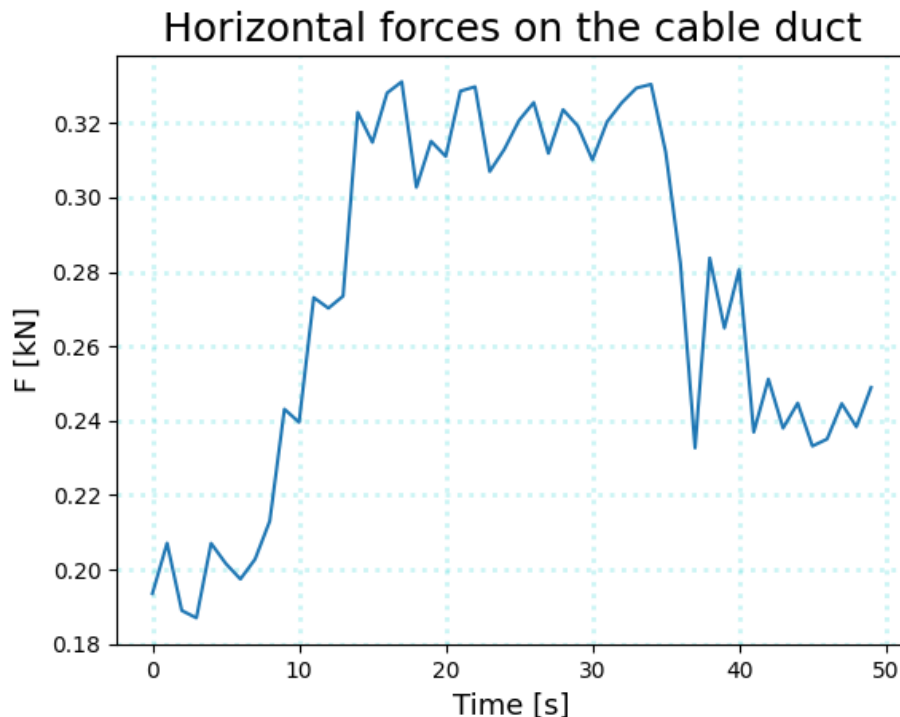


Figur 3-8: Simuleringsprosess for ballastrensing og påkjenning mot 1-løps kanal. Kilde: Plasser & Theurer.

Resultater fra simuleringen har vist at effekten av ballastrensingen på nærliggende 1-løps kanal er neglisjerbar, uansett valg av testet utstrekning. Figur 3-9 nedenfor viser en grafisk fremstilling av horisontalkraft mot kabelkanalen over en 0,5m lang strekning (grå snitt midt mellom to blå strekk i Figur 3-8).

Figuren viser at i første 0-6 sekunder er påkjenningen fra ballastrenseverket ikke merkbar. Påkjenningen begynner å bli merkbar i det maskinen kommer inn i det midterste strippet. Horisontalkraften øker og ballastpukken mellom maskinen og kabelkanalen flytter på seg. Pukken utøver en horisontalpress mot sidevegg i kanalen. Når renseverket har passert den betraktete stripen, faller horisontalkreftene til omtrent samme nivå som ved starten av passeringen. Plasser & Theurer opplyser at det oppstår kortvarig dynamisk effekt mot kanalen, hvor forholdet mellom den dynamiske og statiske effekten er ca. 1,5.

Maksimal horisontalkraft fra simuleringen er målt til omtrent 0,33kN per 0,5m lengde kanal, det vil si 0,66kN per løpemeter kanal. Ifølge Plasser & Theurer vil ikke påkjenningen mot andre kanaltyper og størrelser være veldig forskjellig fra estimatet for 1-løps kanal. Det samme påstås for endring av svilletepe og valg an annen ballasthøyde. Det er denne kraften som tas videre med i effektivspenningsanalysen og bestemmelse av størrelse for oppfyllingen på utsiden av kanalene.



Figur 3-9: Horisontalkraft mot 1-løps kanal ved ballastrensning. Kilde: Plasser & Theurer.

3.2.3 Optimal plassering av kanaler i høyde

Optimal plassering av kabelkanaler i høyde bedømmes basert på sammenligning av tverrsnittarealer til de ulike delene av overbygningsskroppen, det vil si ballastpukken, oppfyllingen rundt kanaler og fundamentet under kanaler. Dette utføres for tre ulike høydeplasseringer av en 1-løps kanal:

- topp kabelkanal i høyde med topp av nærmeste sville
- topp kabelkanal i høyde med topp av sville i spormidte
- topp kabelkanal i høyde med topp av sville under SOK

Øvelsen utføres for ulike sporkonstruksjoner, det vil si standardoppsett av ulike skinner, sviller og ballasthøyder. Beregning av arealer og måling av formasjonsplanbredder gir en pekepinn på hvilken plassering av kanaler i høyde er rimeligst med tanke på materialforbruk og innblanding av finkornete masser i ballastlaget.

Det benyttes Novapoint sin jernbanemodul hvor enkle banemodeller prosjekteres. Deretter lages det tverrsnitt for de ulike oppsettene. Arealene og avstandene måles digitalt i AutoCAD. Registrerte data sammenlignes med formasjonsplanbredder i TRV. Tverrsnittene med tilhørende data vises i Vedlegg 1.

3.3 Studie av utenlandsk litteratur

Som supplement til faglig teori, intervjuer og dimensjonering av nødvendige størrelser, er det foretatt en litteraturstudie av utenlandske krav til legging av kabelkanaler langs jernbanespor. Formålet med dette er å finne likheter og ulikheter i forlegningsmetoder av kabelkanaler i ulike land, samt å finne mulige inspirasjoner.

Det er forsøkt å samle inn relevante eksempler av tegninger og krav fra to andre nordiske land; Sverige og Danmark. I tillegg er det valgt å se på relevant litteratur fra Tyskland og Polen. Utvelgelsen begrunnes i to ting; alle overnevnte land har fulgt Teknisk spesifisering for samtrafikkveie (TSI), og det var relativt enkelt å anskaffe relevant litteratur gjennom Rambøll sine kontorer i disse landene. Utvelgelsen er ansett som forsvarlig fordi TSI sikrer teknisk harmonisering i jernbanesystemer i ulike land, selv om lokale og historiske forskjeller i tekniske løsninger kan forekomme. Norge er underlagt TSI krav gjennom EØS-avtalen.

4 Resultat

I dette kapitlet presenteres resultater fra gjennomførte intervjuer, dimensjonering og modellering, samt resultater fra gjennomlesing av utenlandsk litteratur.

4.1 Intervju

For å kunne svare på hovedforskningsspørsmålene om konsekvenser ved legging av kabelkanaler for over- og underbygningen, er det gjennomført en serie av sju intervjuer. Intervjuene er benyttet for å konfrontere det faglige grunnlaget beskrevet tidligere mot erfaringer og personlige meninger til respondenter som har hatt med kabelkanaler å gjøre til daglig. Intervjuene skulle ha avdekket hvilke utfordringer og behov ulike faggrupper har med legging av kabelkanaler. Det er derfor valgt fire ulike hovedgrupper av respondenter. Disse er vist i Tabell 4-1 nedenfor. Gruppene har bestått av to respondenter hver. Respondenter har hatt ulik faglig bakgrunn. Noen av personer har hatt erfaring fra mer enn én gruppe.

Tabell 4-1: Intervjurespondenter.

<i>Hovedgruppe</i>	<i>Antall respondenter</i>
Bane NOR – prosjektering og krav	2
Rådgivere - prosjektering	2
Entreprenører - bygging	2
Vedlikeholdspersonell - vedlikehold	2

Resultater av intervjuene er basert på intervjuguiden som er vedlagt denne oppgaven (Vedlegg 3). Intervjuguiden består av en innledende del og tretten konkrete problemstillinger som hver respondent har gitt svar på. Problemstillingene er basert på tre alternative plasseringer av kabelkanaler. Alternativ 1 viser kabelkanaler plassert på et pukkfundament med oppfylling, noe som er den mest praktiserte løsningen i Norge i dag. Alternativ 2 viser kabelkanaler plassert direkte på formasjonsplanet slik dette er angitt i TRV. Alternativ 3 viser kabelkanaler delvis nedgravd i formasjonsplanet, og er inspirert av noen løsninger fra utlandet. Formålet med denne variasjonen er å gjøre det enklere for respondenter å resonere seg frem til ulike fordeler og ulemper, enn om en hadde bare hatt et alternativ å forholde seg til. I videreanalysen nedenfor refereres det til de ulike alternativene og sidenummereringen i intervjuguiden.

4.1.1 Plassering av kabelkanaler i høyde og plan

Plassering av kabelkanaler i høyde omfatter spørsmål knyttet til referansehøyde for topp av kabelkanaler i forhold til sville, skinne eller annet referansepunkt. Formålet med dette spørsmålet er å definere hva respondenter mener om optimal plassering av kabelkanaler høydemessig. Plassering av topp av kabelkanaler er avgjørende for definering av fundamentets størrelse under kanaler og oppfyllingen rundt. I tillegg stilles det spørsmål

om avstand mellom kabelkanaler og senterspor, samt om krav til kabelfritt profil. Temaet refererer primært til problemstillingene 1, 2, 3, 4 og 8 i intervjuguiden.

Prosjekterende er stort sett enige om at avstand fra senterspor til kabelkanaler er godt definert i TRV gjennom kabelfritt profil, og at dette knyttes til ballastrensing. Prosjekterende benytter som oftest 2,52m som utgangspunkt for å ha en liten margin for eventuelle justeringer. I noen tilfeller benytter prosjekterende kortere avstander, spesielt i tunneler og trange partier, men for spor i dagen er det 2,52m som gjelder. Prosjekterende reagerer ikke, eller reagerer negativt i tilfeller hvor kabelkanaler, lagt inn 2,5m fra senterspor, havner i ballastpuken. Dette forekommer i tilfeller hvor sporet bygges med store overhøyder. Prosjekterende kommenterer også at i slike tilfeller ballastskulderkant bør gå helt ned til formasjonsplanet, og ikke bli avskåret av fundamentet under kanaler.

Prosjekterende har mest erfaring med løsningen hvor kabelkanaler legges på et fundament av pukk med oppfyllingen rundt (alternativ 1), selv om alternativet med kabelkanaler direkte på formasjonsplanet er akseptabelt. Prosjekterende mener at denne måten ble tidligere benyttet før en har valgt å flytte langsgående jordledere fra innsiden av kabelkanaler og har lagt de ned under kanaler. Dette skyldtes gjentatte tyveri av kobbertråder. Prosjekterende er enige om at alternativ med kabelkanaler delvis under formasjonsplanet ikke er den optimale løsningen. Prosjekterende nevner blant annet utgravinger i ferdigetablert formasjonsplan og masseoverskudd, samt det at jo dypere bunn av kabelkanaler ligger, desto vanskeligere blir det å trekke kabler mot objekter lang spor.

Faktorene nevnt ovenfor har betydning for kanalenes høyde i forhold til spor, men prosjekterende har ingen spesifikke ønsker knyttet til nøyaktig referansenivå. Prosjekterende påstår at alternativet med topp av kabelkanaler liggende i høyde med topp av sville under laveste skinne er mest gunstig med tanke på materialforbruk, slik det kommer frem av figurene i intervjuguiden.

Ansatte i Bane NOR mener også at avstanden mellom senterspor og kabelkanaler er godt definert gjennom kabelfritt profil og at det stort sett praktiseres 2,5m. Ansatte i Bane NOR nevner at i noen tilfeller tillates kortere avstander og at 2,52m har blitt sett i rådgiverbransjen. Kravet om kabelfritt profil knyttes til ballastrensing, sporstabilisering og andre maskinelle vedlikeholdsarbeider i sporet, hvor det ikke ønskes å ha noen kabler innenfor det angitte profilet. Ifølge Bane NOR en avstand på 2,30m har blitt vurdert i de områdene hvor kabelkanaler er støpt inn og danner en rett vegg mot ballasten, men dette gjelder primært i tunneler. Ansatte i Bane NOR peker på utfordringer ved å legge flere kabelkanaler i parallell på utsiden av kabelfritt profil. Ifølge Bane NOR krever dette bred underbygning, noe som er spesielt utfordrende på eksisterende baner. Ansatte i Bane NOR ønsker heller ikke at kabelkanaler legges lenger bort enn 2,5m med tanke på tilgang til kanaler ved utlegging av nye kabler og reparasjon av eksisterende føringer, og spesielt ikke på utsiden av KL-master.

Høydemessig finner Bane NOR på mange fordeler og ulemper mellom ulike plasseringer av kabelkanaler. Kanaler skal helst ikke ligge for lavt, for å unngå oppfylling med ballastpukk, noe som forekommer ofte i dag. Samtidig ønsker en ikke å ha kabelkanaler liggende for høyt for å unngå unødvendig høye oppfyllinger under. Praktisk sett vil en ha disse liggende i høyde med topp av nærmeste sville, for å kunne enklere forholde seg ved utlegging av kanaler. Ifølge Bane NOR er det vanskelig å finne en ideell løsning spesielt i kurver med stor overhøyde, men en ønsker ikke å ha kanaler liggende i den hoveddelen av ballastprofilet.

Entreprenørene er enige i at standardløsningen for avstand mellom senterspor og nærmeste kanal er 2,5m. Dette skyldes behov for god plass for alt maskinelt arbeid i sporet som sporpakking, svillebytte og ballastrensing. Denne avstanden forekommer oftest på nye baner, mens på eksisterende banestrekninger har entreprenører enkelte steder også hatt erfaringer med korte avstander. Entreprenørene poengterer i tillegg at det er sjeldent sett større avstander enn 2,5m og at dette er ugunstig med tanke på plassering av kabelkanaler på innsiden av KL-master. Ideelt sett ønsker en kanalene lagt mest mulig rett, uten spesielle føringslinjer mellom KL-mastene. Entreprenørene har mest erfaring med alternativ 1 hvor kabelkanaler legges på et fundament av finnpukk, mens alternativ 2 og 3 har blitt sett spesielt i prosjekter med reetablering av eldre banestrekninger eller ved etablering av OPI-kanaler under kabelkanaler. Ifølge entreprenørene er alternativ 1 desidert den mest benyttede metoden i dag.

Høydemessig plasserer entreprenørene kanaler i høyde med topp av nærmeste sville slik at kanalene følger kurvaturen i sporet. Entreprenørene reagerer forskjellig i tilfeller hvor sporet ligger med store overhøyder og fundamentet under kabelkanaler skjærer seg inn i ballastprofilet. På den ene siden påstår denne gruppen av respondentene at tyngde til fundamentet under og oppfyllingen rundt kanaler bistår i å bedre sporets sidestabilitet. Imidlertid kommenterer entreprenørene at det er uheldig dersom fundamentet under kanaler, bestående av finere masser enn ballastpukken for øvrig, blander seg inn i ballastlaget.

Vedlikeholdspersonalet påstår at 2,5m fra senterspor er en minimumsløsning for kabelkanaler liggende på begge sider av sporet. Standardbredde for en kniv på et renseverk er 4,6 - 4,7m, så med 5,0m tilgjengelig plass går renseprosessen akkurat, men ikke uten komplikasjoner. Vedlikeholdspersonalet opplyser at renseverket opererer i en dybde på minimum 30cm under sville og det dannes et trau mellom kanaler i renseprosessen. Formen på trauet avhenger av kvaliteten på eksisterende ballastpukk. Dersom steinmassen er veldig tett, vil det dannes tilnærmet vertikale vegg i renseprofilet. I motsatt fall vil stein rase inn i renseprofilet og danne et trapesformet profil med ca. 45 graders vegg. I begge tilfeller foregår utgravingen for nært kanaler og det hender relativt ofte at disse velter inn i sporet. I praksis ønsker vedlikeholdspersonalet at rensingen foregår helt inntil kabelkanaler, slik at det ikke ligger noen forurensete masser igjen. Dette skyldes at ved første regnfall kan disse massene enkelt blandes inn i den nye ballastpukken som legges ut etter rensingen. Utgravingen helt inntil kanaler øker risiko for velt. Dersom kanaler velter, foregår dette ofte over en lengre strekning og har stor konsekvens for rensarbeidet. Signalkablene må ikke legges om uten kontroll av signalmannskap.

Vedlikeholdspersonalet påstår at dersom kabelkanaler hadde ligget lengre bort fra sporet, kunne hele ballastprofilet renses i den bredden en vil, i det kniven i renseverket kan skjøtes til 6-7m bredde. Istedenfor ligger det ofte forurensende masser på begge sider av sporet med basseng av vann mellom kanaler. I slike tilfeller slippes vannet ut ved å grave noen lokale utløp som fylles med pukk.

Høydemessig vil vedlikeholdspersonalet gjerne ha kanaler liggende så høyt som mulig. Ideelt ønskes det topp av kabelkanaler i høyde med topp av skinne. Dette skyldes at det vil unngås overfylling av kanaler fra pukkvoغن som følger etter rensingen. Av denne grunn, foretrekker vedlikeholdspersonalet alternativ med kanaler på et fundament av pukk.

4.1.2 Utforming av fundamentet under kabelkanaler

I utformingen av fundamentet under kabelkanaler inngår spørsmål om fundamentets størrelse og skråningshelning, samt materialer benyttet i dette laget. Størrelsen av dette elementet vil ha påvirkning på formasjonsplanbredden. Type og fraksjon av materialet i dette laget vil kunne ha påvirkning på ballasten og dens funksjoner. Temaet refererer til spørsmål 5, 6 og 7 i intervjuguiden.

Hovedfunksjonen til fundamentet under kanaler er, ifølge prosjekterende, å sikre stabilitet til kabelkanaler. I tillegg nevner prosjekterende tiltak mot tyveri av kobbertråder som en funksjon. Prosjekterende påstår at bredden av fundamentet under kanaler handler mer om toleranse og forenkling av arbeidet ved utlegging av kanaler, enn om et tall knyttet til stabilitet. Ifølge prosjekterende er 10cm på hver side av kabelkanaler et fornuftig tall. Skråningshelningen til fundamentet bør fremgå av materialets egenstabilitet.

Det er enighet blant prosjekterende om fraksjon til massen under kanaler. Dette følger stort sett av krav i TRV, hvor pukk 8-20mm angis. Det nevnes likevel andre fraksjoner som har vært benyttet i ulike prosjekter, for eksempel 8-16mm eller 8-22mm. Ifølge prosjekterende skal massene ikke være for grove for å ikke skade jordlederen, men heller ikke for fine, for å ikke hindre dreneringen.

Ifølge ansatte i Bane NOR skal fundamentet under kanaler jevne ut formasjonsplanet slik at kanaler kan ligge stabilt. På denne måten minimeres også faren for setninger. Store setninger kan føre til vann stående i kanaler og i verste fall til brudd av ledningene. Fundamentets tykkelse under kanaler har respondenter i Bane NOR ikke sterke meninger om, men det påstås at det er viktig at massene som inngår i fundamentet, ikke går inn i den delen av sporet hvor det gjennomføres for eksempel sporpakking eller ballastrensing. Det er en viss risiko for at massene i fundamentet dras inn i ballastlaget, avhengig av type arbeidsmaskin som brukes. Dette kan føre til at en får uønskete fraksjoner inn i ballastlaget, samt at kabelkanalenes fundament undergraves, med fare til velt til slutt. Bane NOR poengterer i tillegg at fraksjoner i fundamentet som brukes i dag (8-20mm) er nokså ikke så farlige med tanke på innblanding i ballastlaget. Det er finstoffet som utgjør den største faren for tetting av ballastlaget. Derfor foreslår respondenter i Bane NOR å spesifisere krav om null finstoffinnhold i materialet under kanaler. Ansatte i Bane NOR påstår også at det kunne ha vært vurdert bruk av litt grovere masser under kanaler, for eksempel 18-24mm.

Fundamentbredde med tanke på kabelkanaler har ifølge ansatte i Bane NOR ikke så stor betydning. Skråningshelningen til fundamentet skal være lik som for ballastlaget for øvrig, det vil si 1:1,5.

Entreprenørene mener at hovedfunksjonen til fundamentet under kanaler er flerdelt. For det første skal fundamentet av finere fraksjoner sikre mer stabilt avrettingslag for kanaler. I tillegg skal fundamentet sørge for at topp av kanaler plasseres i riktig høyde i forhold til sville. Entreprenørene nevner dreneringsegenskaper til pukken, og at vannet under kanaler skal kunne renne bort uhindret. Til slutt poengterer entreprenørene at det ønskes et lag av masser som er skånsomme mot kanaler og trekkerørene som skal ut mot objekter langs spor. Entreprenørene påstår at bredden på fundamentet skal ha en viss toleranse for enklere utlegging av kabelkanaler, slik at disse ikke vipper inn mot sporet eller ut mot grøften. Dette skyldes at fundamentet til kanaler bygges først etter at formasjonsplanet er etablert, og før etablering av ballastlaget. Skråningshelningene til fundamentet bør være lik som for ballastpukken for øvrig.

Entreprenørene anvender ulike fraksjoner av finnpukk under kanaler, alt fra 0 til 20mm, avhengig av lokal tilgjengelighet, tilgang til overskuddsmasser og pris. 8-16mm er ifølge entreprenørene en standard fraksjon som er billigst, mens TRV opererer med 8-20mm.

Vedlikeholdspersonalet peker på behov for vurdering av utformingen til fundamentet mot fremtidig vedlikehold av ballastlaget. Vedlikeholdspersonalet mener at ved ballastrensingen vil deler av fundamentet kunne graves bort. Vedlikeholdspersonalet opplyser at under kanaler brukes det ofte singel eller subus, men at det helst ønskes samme masser som i sporet ellers.

4.1.3 Uforming av oppfyllingen rundt kabelkanaler

I utforming av oppfyllingen rundt kabelkanaler inngår spørsmål om oppfyllingens størrelse og skråningshelning, samt materialer benyttet i disse lagene. Oppfyllingen består av én del liggende mellom ballastlaget og kanaler, samt én del på utsiden av kanaler. Størrelsen av disse elementene vil ha påvirkning på formasjonsplanbredden. Type og fraksjon av materialet i disse lagene vil kunne ha påvirkning på ballasten og dens funksjoner. Temaet refererer til spørsmål 5, 6 og 7 i intervjuguiden.

Prosjekterende mener at vurdering av størrelse av oppfyllingen rundt kabelkanalen er en vanskelig sak. Prosjekterende påstår at dette blir umulig uten å vite påkjenningen mot kabelkanaler og uten å gjennomføre praktiske forsøk i sporet. Prosjekterende mener at oppfyllingens bredde på utsiden av kabelkanaler kan være null, og gå skrått ned direkte mot formasjonsplanet. Det samme gjelder avstanden mellom bunnen av ytre oppfylling og formasjonsplankanten. Prosjekterende nevner at kabelkanaler er mest sannsynlig tunge nok til å selv ligge stabilt, med mindre det ytes en kraft vinkelrett på kanaler med vilje, og at kravet om sidestabilitet er litt overdrevet.

Det er en viss uenighet i hvilke masser som skal brukes mellom kabelkanaler og ballastpukken, og på utsiden av kanaler (side O i Vedlegg 3). Den ene respondenten påstår at det viste snittet har et kunstig skille mellom massene rundt kabelkanalene og at alle masser skal i virkeligheten kunne bestå av et og samme material, for eksempel av pukk 8-20mm. Den andre respondenten har valgt 31,5mm-63mm ballastpukk mellom ballasten og kanalene, samt tilfeldig masse på utsiden av kanalene.

Ifølge ansatte i Bane NOR er funksjonen til oppfyllingen rundt kabelkanaler todelt. For det første skal fyllingen mellom ballastpukken og kanaler sikre at det ikke samler seg noe støv, løv og annet uønsket materiale i dette området. Dette vil gjøre det vanskelig å gå langs sporet. Ifølge ansatte i Bane NOR den delen av oppfyllingen bygges med ballastpukk med samme fraksjon som ballasten for øvrig, for å sikre god nok drenering. Fyllingen på utsiden av kanaler skal sikre kanalenes stabilitet, men det tas forbehold om at selve kanaler burde aldri være en del av sidestabiliseringen. Bane NOR påstår også at størrelsen på denne oppfyllingen kunne kvantifiseres ved behov, men det finnes ikke gode svar på hvilke krefter som påvirker kabelkanaler ved arbeider i ballastlaget. Bane NOR ønsker oppfyllingens skråningshelning å være 1:1,5. Ansatte i Bane NOR nevner også at avstanden mellom oppfyllingenes bunn og formasjonsplankanten kan være null. Det ønskes bruk av ballastpukk med ordinær fraksjon også på utsiden av kabelkanaler.

Ifølge entreprenørene skal oppfyllingen på begge sider av kanaler bistå med å øke sporets sidestabilitet, sammen med tyngden av kanaler. Entreprenørene mener at fyllingen på utsiden er viktig for å hindre at kanaler flyttes ved maskinelt arbeid i sporet. Fyllingens størrelse på utsiden er ikke enkelt å definere, men den bør minimaliseres med tanke på unødvendig utvidelse av formasjonsplan. Entreprenørene nevner at fyllingen på utsiden

(nr. 2, side N i Vedlegg 3) kunne gå direkte skrått ned mot formasjonsplanet fra kanten av kabelkanalen. Det samme er ønskelig for bredden mellom oppfyllingen på utsiden av kanalen og formasjonsplankanten (nr. 3, side N i Vedlegg 3). Entreprenørene understreker imidlertid at reduksjon av disse størrelsene er knyttet til en viss risiko for at kanaler kan etter hvert forsvinne ut i skrånninger av ulike årsaker.

Det er primært enighet i at massene mellom ballastlaget og kabelkanaler bør bestå av ballastpukk med fraksjon 31,5-63mm for å unngå innblanding av finere masser i ballastlaget. Ifølge entreprenørene er dette ikke alltid praktisert. I prosjekter diskuteres det ofte bruk av finere masser i dette området, blant annet med tanke på skånsomhet mot kanaler. På utsiden av kanaler har det, ifølge entreprenørene, vært benyttet alt fra stedlige jordmasser, via ballastpukk og frem til grove friksjonsmaterialer fra forsterkningslaget. De sistnevnte kommer fra utgravninger av masser for OPI-kanaler.

For vedlikeholdspersonalet er det viktig at masser liggende mellom spor og kanaler, og som delvis raser inn i sporet etter passering av renseverkstoget, består av ballastpukk og ikke mindre masser som «forurenser» ballasten på nytt. Ideelt sett ønsker vedlikeholdspersonalet masser med lik fraksjon på begge sider og under kanaler.

4.1.4 Prosjektering, bygging og kostnader

Her inngår det spørsmål om fordeler og ulemper knyttet til prosjektering av kabelkanaler, samt prosjektering av over- og underbygning i forhold til ulike kanalplasseringer. I tillegg stilles det spørsmål om vanskelighetsgrad ved bygging av disse alternativene, samt om kostnader. Temaene er direkte knyttet til hovedforskningsspørsmålene og refererer til spørsmål 9 og 10 i intervjuguiden.

Ifølge prosjekterende er alternativ 1 med fundamentet under og oppfyllingen rundt kanalen det mest tidkrevende alternativet for prosjektering. Dette skyldes flere elementer som må dimensjoneres og modelleres. Prosjekterende peker imidlertid på at verken alternativ 2 eller 3 har et fundament under kanalen og det ville også være tidkrevende å dimensjonere og modellere. Det påstås i tillegg at alternativ 2 mangler oppfylling rundt kanaler.

Prosjekterende mener at kabelkanaler liggende direkte på formasjonsplanet er det enkleste og minst kostbare alternativet å bygge, men det pekes fortsatt på mangel av oppfylling rundt, og fundamentet under kanalene. Samtidig poengterer prosjekterende at alternativet med kanaler liggende delvis under formasjonsplanet kan både være mest kostbar og mest trøblete å bygge. Prosjekterende mener at en grøft må graves i et allerede etablert formasjonsplan og at en får overskuddsmasser. Masser i forsterkningslaget er for grove for etablering av kabelkanaler og det ønskes ikke å komme med finere fraksjoner i dette laget.

Ifølge ansatte i Bane NOR er alternativet hvor kabelkanaler legges på et fundament av pukk det mest brukte og samtidig komplekse alternativet. Grunnen til dette er at det samles ulike fraksjoner i ett punkt, noe som vanskeliggjør både prosjektering og bygging av dette alternativet. Ifølge ansatte i Bane NOR bruk av små fraksjoner tett på ballastlaget kan by på dreneringsproblemer. Det ble nevnt at alternativ med kabelkanaler direkte på formasjonsplanet er en rimelig løsning så lenge øvre sikt i forsterkningslaget består av et avrettingslag av finere materialer. Alternativ med kanaler nedgravd inn i formasjonsplanet er ansett som mest utfordrende og samtidig mest kostbart på grunn av graving i et allerede etablert og komprimert formasjonsplan. Bane NOR poengterer at kanaler liggende direkte på, eller delvis nedgravd inn i formasjonsplanet, er mest utsatte for å bli fylt med pukk ved utlegging av øvre ballastlag.

Entreprenørene har ikke mange meninger om prosjektering, men det nevnes at alternativ 1 er den vanligste som bygges i Norge i dag. Kompleksiteten ved å legge kanaler enten direkte på formasjonsplanet eller på et fundament er ikke veldig forskjellig. Så lenge entreprenøren får de ekstra massene priset inn, ligger kostnaden for dette på samfunnet. Entreprenørene peker derimot på alternativ 3, med kanalene delvis under formasjonsplanet, som et potensielt dyrest og mest komplisert løsning, på grunn av antall operasjoner en slik forlegning medfører. Metoden er også kritisert med tanke på trekking av kabler fra kanaler til objekter langs spor.

Vedlikeholdspersonalet har ingen kommentarer angående prosjektering eller bygging av kabelkanaler og kostnader knyttet til dette.

4.1.5 Vedlikehold av overbygningen og kabelkanaler

Temaet er knyttet til fordeler og ulemper ved ulike plasseringer av kabelkanaler i forhold til vedlikeholdsaktiviteter i over- og underbygningen. Temaet er direkte knyttet til hovedforskningsspørsmålene og refererer til spørsmål 8 og 11 i intervjuguiden.

Prosjekterende påstår at det ikke er store forskjeller mellom alternativene når det gjelder vedlikehold, så lenge lokket er tilgjengelig og lar seg demontere. Alternativet med oppfylling og fundamentet under kanaler virker rimeligst med tanke på utgraving av masser for trekking av kabler fra kanalen mot objekter langs spor. Samtidig virker nedgravde kanaler å være mest utsatt for å bli overdekket med ballaststein i ettertid, noe som kan gjøre supplering av kabler i kanaler mer utfordrende. Prosjekterende nevner ingenting om vedlikehold av ballasten.

Ansatte i Bane NOR peker ut alternativet med kabelkanaler direkte på formasjonsplanet som mest utsatt for oppsamling av uønskede materialer mellom kanaler og ballasten. Videre peker Bane NOR på at alternativ med nedgravde kanaler er mest utsatt for å bli dekket av ballaststein ved for eksempel suppleringer av ballastlaget. I tillegg nevner Bane NOR at alternativ med kanaler direkte på formasjonsplanet gir lite støtte for lokk som skyves fra kanaler ved vedlikeholdsarbeider. Lokket dytter ned og en liten gravemaskin må brukes for å legge det tilbake på plass.

Bane NOR påpeker også at bruk av flere masser med ulike fraksjoner i ett punkt, kan føre til dreneringsproblemer og dermed behov for hyppigere vedlikehold. På samme måte trekkes fram at innblanding av uegnete fraksjoner i ballastlaget kan føre til fortetting av ballastlaget og behov for hyppigere ballastrensing. Dersom fundamentet under kanalen ligger altfor nær senterspor, kan dette føre til undergraving av fundamentet og til slutt velt av kanaler ved ballastrensing.

Ifølge entreprenørene kan bruk av ulike masser rundt kabelkanaler skape problemer med fremtidig vedlikehold av disse massene, for eksempel ved ballastrensing. Entreprenørene nevner spesielt at ballastpukk bør benyttes mellom spor og kanaler. Entreprenørene påstår at alternativ med fylling rundt kanaler er enklest å vedlikeholde fordi det er enkelt å ta bort kanalens lokk, samt det er enkelt å gå mellom sporet og kanaler. Alternativer med kanaler liggende direkte eller delvis under formasjonsplanet anses å være utsatt for igjenfylling av ballastpukk. Ifølge entreprenørene bør kabelkanaler plasseres i så nær avstand til senterspor som mulig, med tanke på supplering av kabler fra skinnegående utstyr.

Vedlikeholdspersonalet fokuserer mest på avstand til kabelkanaler og at disse skal ligge høyest mulig i forhold til skinne. I tillegg ønsker vedlikeholdspersonalet størst mulig

homogenitet i massene rundt kanaler. Dette er beskrevet tidligere i forbindelse med ballastrensing. Vedlikeholdspersonalet ønsker kanaler lengst bort fra sporet, men har full forståelse for at tilgjengelig plass er en utfordring flere steder.

Vedlikeholdspersonalet opplyser i tillegg at det ikke har vært observert noen forskyvning av kabelkanaler bort fra senterspor på grunn av andre vedlikeholdsaktiviteter i sporet, for eksempel sporjustering, sporstabilisering eller snøbrøyting.

4.1.6 Alternative løsninger

Spørsmål om alternative løsninger er rettet mot andre løsninger enn kabelkanaler av betong, og andre løsninger enn kanaler liggende på formasjonsplanet. Temaet er direkte knyttet til hovedforskningsspørsmålene og refererer til spørsmål 12 og 13 i intervjuguiden.

Ifølge prosjekterende finnes det flere alternative løsninger for legging av kabelkanaler langs spor. Kabelkanaler på pæler nevnes som et ofte benyttet alternativ. Disse brukes spesielt i områder hvor utvidelse av eksisterende fyllinger er kostbar. Selv om selvbærende betongkanaler på pæler koster mer enn vanlige kanaler, er det ofte et rimeligere alternativ enn kostbare grunnarbeider knyttet til utvidelse av formasjonsplanet. Både kanaler av betong og plast benyttes i en konstruksjon på søyler, selv om prosjekterende mener at sistnevnte har tvilsom varighet. Konstruksjonen virker ikke å være robust og er ikke nødvendigvis tilpasset norske forhold.

Føring av kabler i trekkerør ved siden av sporet er mer et unntak enn god løsning og anbefales ikke av prosjekterende. Av andre løsninger nevner prosjekterende OPI-kanaler og kanaler av glassfiber. Prosjekterende mener at føring av kabler i OPI-kanaler ikke er likeverdig som i vanlige kanaler fordi kablene er ikke tilgjengelige på samme måte. Det førstnevnte alternativet benyttes ofte for kabler som ikke behøver god tilgang, for eksempel høyspentkabler. I slike kanaler må kablene trekkes gjennom, noe som er mer krevende enn legging av kabler i kanal. Glassfiberkanaler har ikke prosjekterende vært bort i, men påstår at dette er et fint alternativ i trange partier hvor det er vanskelig å holde seg utenfor kabelfritt profil. Som et alternativt nevner prosjekterende betongkanaler montert over hverandre.

Ansatte i Bane NOR mener at alternativ med kabelkanaler på pæler er en god løsning. Fordeler med disse utført med kanaler av plast er blant annet lett tilgang, lav vekt, ingen behov for maskinelt arbeid og enkelt vedlikehold. Ansatte i Bane NOR nevner likevel at det har vært noen utfordringer med stabiliteten av søylene over tid.

Kabelkanaler av plast, mener ansatte i Bane NOR, er en overkommelig løsning, så lenge disse ligger stabilt. Fordelene er lav vekt, enkel montering og miljøperspektiv for resirkulert plass. Det nevnes kun midlertidige anlegg hvor kabelkanaler av plast er brukt mest.

Av andre måter å føre kabler på nevner Bane NOR vare- og trekkerør både under og ved siden av kanaler, spesielt for kabler som ikke krever flere avgreninger. Legging av kanaler og rør utenfor formasjonsplanet nevnes som et alternativ for utvidelse av formasjonsplanet. Plasseringen av disse bør koordineres godt mot linjegrøfter langs spor. I trange skjæringer kan kanaler eller rør festes direkte til fjellveggen, men dette er heller ikke en foretrukket løsning. Kanaler av glassfiber nevner Bane NOR som akseptable der hvor det er mangel på plass, spesielt ved overganger mellom bru og fyllinger.

Entreprenørene har vært bort i flere ulike forlegningsmetoder og never blant annet pæler, OPI-kanaler, samt riktig separering og dislokering av kabler som gode måter å spare plass på. Av løsninger på pæler nevner entreprenørene enten tre- eller stålpæler med levetid på

henholdsvis 30 og 50 år. Her ville entreprenørene helst bruke selvberende betongkanaler. Kanaler av plast frarådes på grunn av tvilsom holdbarhet. Til tross for at plastkanaler veier mye mindre, er mer miljøvennlige og er enklere å montere, nevner entreprenører ulemper med flyvende lokk ulike steder i landet. I tillegg er plastkanaler uegnet for legging av høyspenningskabler. Slike kanaler er ifølge entreprenørene godt egnet kun for midlertidige anlegg.

Ifølge entreprenørene er det blitt mer og mer vanlig å legge tele og signalkabler i det samme kanalløpet fordi kabelbehovet ved ERTMS er mye mindre enn ved de tradisjonelle signalsystemene. Telekabler lages av fiber som krever mindre kabelkanaler for å dekke behovet. Telefiber blåses ofte inn i 40mm rør under kabelkanalene og på denne måten reduseres bredden av kabelkanaler. Alternativt kan kabelkanaler legges på begge sider av sporet.

Vedlikeholdspersonalet er mest glad i alle løsninger som ligger lengst unna sporet. Fra vedlikeholdsperspektiv er kanaler plassert på pæler og hengt på søyler en ideell løsning. Det poengteres at det er flere og flere installasjoner som kommer langs spor i nåtider og at det snart neppe blir plass til vedlikeholdsarbeidet. Vedlikeholdspersonalet understreker også at kanaler laget av plast ikke er varige, og at det flere steder i landet er observert løsne lokk eller oppsprukne plastkanaler.

4.1.7 Hovedutfordringer og -behov

Nedenfor vises en samling av kartlagte utfordringer og behov som har kommet frem i intervjuprosessen.

Tabell 4-2: Oppsummering av hovedutfordringer og -behov fra ulike faggrupper.

<i>Hovedutfordringer og behov</i>	
Plassering av kanaler i høyde og plan	<ul style="list-style-type: none"> • behov for plass til langsgående jordledere og fiberrør i fundamentet under kanaler • behov for oppbygging til ønsket høyde ifm. fare for igjenfylling av kanaler • behov for tilstrekkelig avstand fra spormidtd ifm. ballastrensing • behov for å plassere kanaler utenfor ballastprofilen • behov for plassering av kanaler innenfor KL-master med tilgang fra sporside • behov for enkel trekking av kabler mot objekter langs spor • utfordring med igjenfylling av kanaler under anlegget og under vedlikeholdet ved for lav plassering • utfordring med høyt forbruk av steinmaterieell ved for høy plassering av kanaler
Utforming av fundamentet	<ul style="list-style-type: none"> • behov for plass til langsgående jordledere og fiberrør i fundamentet under kanaler • behov for toleranse ved utlegging av kanaler • behov for masser som er skånsomme mot kabler og kanaler • behov for tilstrekkelig drenering rundt kanaler • utfordring med mindre fraksjon enn ballastpukk for øvrig tett på ballastlaget
Utforming av oppfyllingen	<ul style="list-style-type: none"> • behov for støtte for kanalenes lokk under vedlikehold • behov for solid underlag for å kunne gå langs spor

	<ul style="list-style-type: none"> • behov for tilstrekkelig drenering rundt kanaler • behov for tilstrekkelig oppfylling på utsiden, spesielt der hvor kanaler ligger på høye fyllinger • utfordring med å finne riktig størrelse av oppfyllingen på utsiden • utfordring med å definere egnet fraksjon både på inner- og yttersiden av kanaler
Prosjektering, bygging og kostnader	<ul style="list-style-type: none"> • behov for mer standardiserte løsninger for prosjekterende • utfordring med flere kabelkanaler i parallell og kostbar utvidelse av formasjonsplanet på eksisterende banestrekninger • utfordring med trekking av kabler til objekter langs spor i alternativ med delvis nedgravd kanal
Vedlikehold	<ul style="list-style-type: none"> • utfordring med igjenfylling av kanaler • utfordring med bruk av flere fraksjoner på ett sted • utfordring med for liten avstand mellom spor og kanaler ved ballastrensing • utfordring med undergraving av kanalenes fundament ved ballastrensing
Alternative løsninger	<ul style="list-style-type: none"> • utfordringer med plastkanaler • utfordringer med komposittmaterialer

4.2 Dimensjonering av fundamentet under kabelkanaler

I dette avsnittet foretas forenklet dimensjonering av pukkfundamentet under ulike konfigurasjoner av kabelkanaler gitt tidligere i avsnitt 2.3.3, og basert på geotekniske metoder beskrevet i metodekapittelet. Det angis begrunnelse for valg av laster, lastfaktorer, materialkoeffisienter og materialparametere.

4.2.1 Laster og materialer

Laster og lastfaktorer

I henhold til TRV skal NS-EN 1997-1 Eurokode 7 – del 1 benyttes for geoteknikk dimensjonering av jernbaneanlegg. I henhold til standarden skal bruddgrensetilstanden analyseres i jord og bergvolum som utsettes for lastvirkningene og i de konstruksjonene som bæres eller støttes av dette volumet (Statens vegvesen, 2022, s. 7). Dimensjonerende laster, F_d , fås ved å multiplisere karakteristiske laster, F_{rep} , med lastfaktorer, γ_F :

$$F_d = \gamma_F \times F_{rep} \quad (4.1)$$

Det skal skilles mellom lastfaktorer for geoteknikk dimensjonering og dimensjonering av konstruksjoner. I geoteknikk dimensjonering og beregninger av stabilitet, jordtrykk og bæreevne opererer Eurokode 7 – del 1 med lastfaktor for permanente laster, $\gamma_G = 1,0$. For variable laster gjelder, $\gamma_f = 1,3$. Dimensjonering av konstruksjoner er ikke aktuell i denne oppgaven.

Trafikklasten på jernbane defineres i TRV ved hjelp av lastmodell 71. Lastmodellen benyttes for dimensjonering av banens underbygning i stabilitets- og bæreevneberegningen, samt ved dimensjonering av spornære elementer, for eksempel spunt eller lave fyllinger på bløt

grunn. Lasten forutsettes å ha en virkende effekt i en bredde 2,5m fra senterspor målt fra underkant sville (Bane NOR, 2023b). For lokal vurdering av stabilitet, bæreevne og jordtrykk mot kanaler, liggende i avstand større eller lik 2,5m fra senterspor, antas det at lasten vil ha neglisjerbar effekt. Det antas ingen tillegg for dynamiske effekter fra togtrafikken eller bruk av kanaler som gangbaner. Ifølge V220 (Statens vegvesen, 2022, s. 166) ses det også bort fra snølaste i geoteknisk dimensjonering.

Materialer og materialkoeffisienter

Valg av materialkoeffisienter sikrer dimensjoneringen i tilfeller hvor egenskaper til materialer avviker i ugunstig retning fra den karakteristiske verdien. I tillegg hensyntas eventuelle avvik i modellen.

Valg av materialfaktorer (γ_m) ved stabilitetsberegninger for jernbanetekniske anlegg defineres i Bane NORs TRV (Bane NOR, 2023a), og er avhengig av tre faktorer; analysetype, konsekvensklasse og bruddmekanisme. Dimensjoneringskriteriene er vist i tabellen nedenfor.

Tabell 4-3: Materialfaktor ved stabilitets- og bæreevneanalyse.

Analysetype	Konsekvensklasse	Bruddmekanisme		
		Seigt	Nøytralt	Sprøtt
Effektivspenningsanalyse, (a ϕ -metoden)	CC1 Mindre alvorlig	1,25	1,30	1,40
	CC2 Alvorlig	1,30	1,40	1,50
	CC3 Meget alvorlig	1,40	1,50	1,60

Det er tidligere i oppgaven begrunnet valg av effektivspenningsanalyse ut ifra forholdet mellom poretrykk og påført last.

Ifølge Bane NOR settes ingen tiltak som omfattes av TRV til konsekvensklasse CC1. Nærmest relatert tiltak som kan finnes er lave jernbanefyllinger av mineralske masser fundamentert på grunn med høy bæreevne og med liten terrenghelning. Slike tiltak omfattes av konsekvensklasse CC2. Imidlertid inngår ikke geoteknisk dimensjonering av fundamenter og oppfyllinger rundt kabelkanaler i TRV. Tabell NA-A1(901) i Eurokode 0 angir veiledende eksempler for klassifisering av ulike bygninger, konstruksjoner og konstruksjonsdeler. I henhold til standarden, kan grunn- og fundamenteringsarbeider ved enkle og oversiktlige grunnforhold plasseres i klasse CC1 (Standard Norge, 2016, s. 105). Det er denne forutsetningen som legges til grunn.

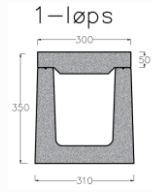
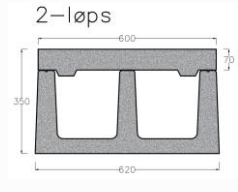
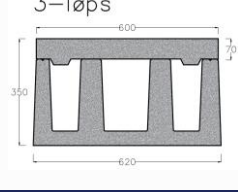
Bruddmekanisme sier noe om bruddforløpet. Her skilles det mellom seigt, sprøtt og nøytralt brudd. Jo raskere bruddet foregår desto mer sprøtt det er. Håndbok V220 anbefaler seig eller nøytral bruddmekanisme for fyllingsmasser av sprengstein (Statens vegvesen, 2022, s. 311). Dette gir materialfaktorer 1,25 – 1,30.

Tabell 4-4 på neste side angir alle last- og materialfaktorer, samt materialparametere benyttet for geoteknisk dimensjonering. Tabell 4-5 gir oversikt over kabelkanal-konfigurasjoner og deres parametere.

Tabell 4-4: Last- og materialegenskaper.

Last- og materialegenskaper	Verdi	Kilde
Tyngdetetthet armert betong	$\gamma_{betong} = 25 \text{ kN/m}^3$	Standard Norge, Eurokode 1, tabell A.1 (Standard Norge, 2019, s. 24)
Tyngdetetthet pukk	$\gamma_{pukk} = 19 \text{ kN/m}^3$	Håndbok V220 (Statens vegvesen, 2022, s. 112)
Attraksjon pukk	$a = 0 - 10 \text{ kN/m}^2$	Håndbok V220 (Statens vegvesen, 2022, s. 112)
Friksjonsvinkel pukk	$\phi_{pukk} = 42 - 45^\circ$	Håndbok V220 (Statens vegvesen, 2022, s. 112)
Materialkoeffisient (sikkerhetsfaktor)	$\gamma_m = 1,25 - 1,30$	TRV (Bane NOR, 2023a)
Egenlastkoeffisient kanaler	$\gamma_G = 1,00$	Håndbok V220 (Statens vegvesen, 2022, s. 9)
Variabelastkoeffisient	$\gamma_f = 1,30$	Håndbok V220 (Statens vegvesen, 2022, s. 9)

Tabell 4-5: Kabelkanalenes egenlast.

Kabelkanalkonfigurasjon	Tverrsnitt $A \text{ [m}^2\text{]}$	Tyngdetetthet $\gamma_{betong} \text{ [kN/m}^3\text{]}$	Lastfaktor, γ_G	Egenlast ⁴ $Q_{opptrende} = A \times \gamma_{betong} \times \gamma_G$ $[\text{kN/m}]$
<p>1-løps</p> 	0,063	25	1,00	1,57
<p>2-løps</p> 	0,119	25	1,00	2,97
<p>3-løps</p> 	0,134	25	1,00	3,36

⁴ Kanalenes egenlast antas å opptre som en linjelast virkende sentrisk på fundamentet.

<p>2+1-løps</p>	0,182	25	1,00	4,54
<p>3+1-løps</p>	0,197	25	1,00	4,93
<p>2+2-løps</p>	0,238	25	1,00	5,94
<p>2+1+1-løps</p>	0,244	25	1,00	6,11
<p>3+2-løps</p>	0,253	25	1,00	6,33
<p>3+1+1-løps</p>	0,260	25	1,00	6,50

4.2.2 Pukkens egenstabilitet

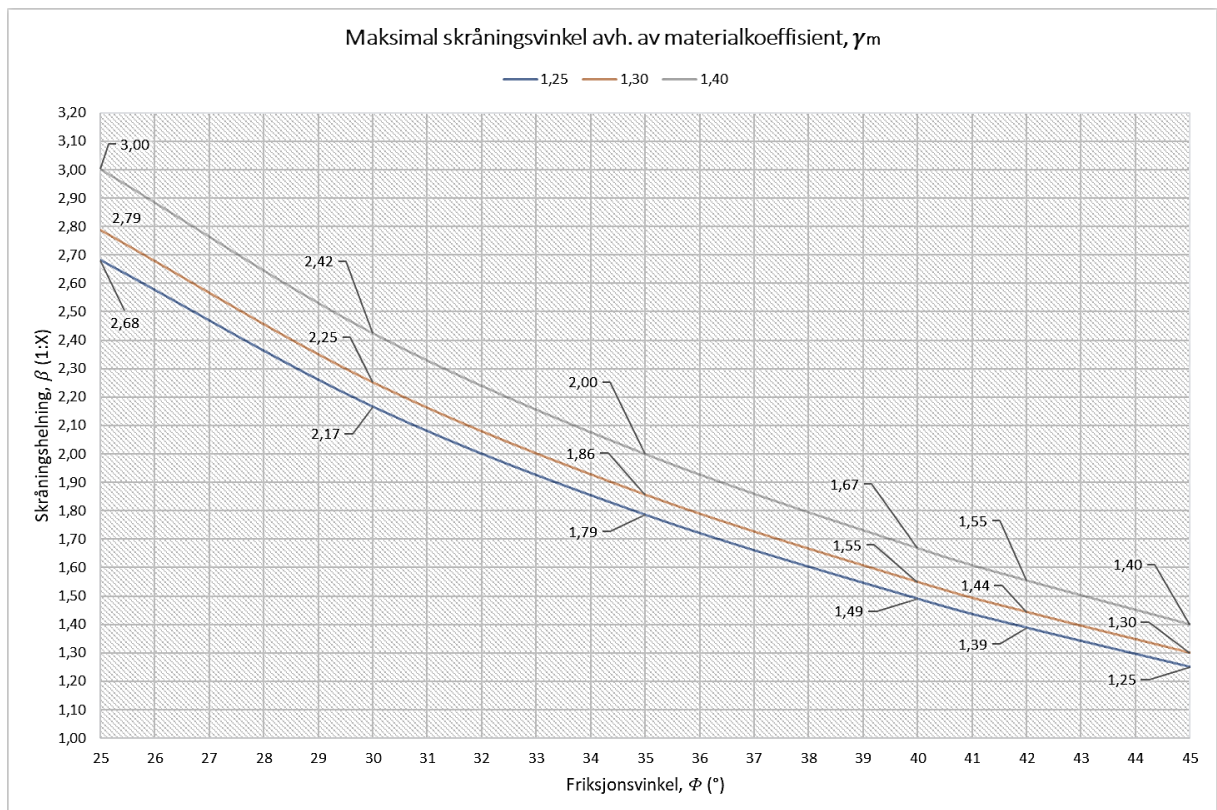
Pukkens egenstabilitet fastsetter maksimal skråningshelning til fundamentet under kanaler, samt skråningshelningen til oppfyllingen på utsiden (forhold D:D og E:E i Figur 3-1). Egenstabilitet vurderes ut ifra formel (3.1), hvor materialets maksimale friksjonsvinkel og materialkoeffisient inngår. Tabell 4-6 nedenfor angir maksimale verdier for skråningshelninger, β , for ulike friksjonsvinkler. Verdiene gjelder for en skråning i tørr tilstand.

Tabell 4-6: Maksimal tillatt skråningshelning, β . Materialkoeffisient, $\gamma_m = 1,25$.

Friksjonsvinkel, Φ	$\tan\beta = \tan\Phi/\gamma_m$	Maks. skråningshelning, β (°)	Maks. skråningshelning, β (1: x)
25°	0,373	20,5°	1: 2,68
30°	0,462	24,8°	1: 2,17
35°	0,560	29,3°	1: 1,79

40°	0,671	33,9°	1: 1,49
42°	0,720	35,8°	1: 1,39
45°	0,800	38,7°	1: 1,25

For sprengstein og andre komprimerte friksjonsmaterialer ligger anbefalte verdier for maksimal indre friksjonsvinkel i området 42° – 45°. Dette er antatt å være gjeldende også for pukk. Tabellen ovenfor viser at jo større indre friksjonsvinkel, desto brattere tillatt skråningshelning. Dersom en velger materialkoeffisient, $\gamma_m = 1,25$, vil det være forsvarlig å benytte skråningshelninger slakkere enn 1:1,25. Dersom mer konservative verdier for materialfaktor legges til grunn, vil situasjon være slikt det er vist i Figur 4-1 nedenfor.



Figur 4-1: Maksimal skråningshelning til fundandamet for ulike materialkoeffisienter, γ_m .

Figuren ovenfor viser at høyere sikkerhetsfaktorer gir slakkere tillatte skråningshelninger for samme type material. For pukkmasser med indre friksjonsvinkel i området 42° – 45°, og sikkerhetsfaktorer mellom 1,25 – 1,40, vil minste tillatte skråningshelning ligge i intervallet 1:1,39 – 1:1,55. Det er interessant å legge merke til at ved indre friksjonsvinkel lik 45°, vil maksimal skråningshelning være lik verdien av den valgte materialkoeffisienten. Basert på resultatene ovenfor kan det foreslås at fundamentets skråningshelninger (D:D og E:E) fastsettes til 1:1,5.

4.2.3 Sikkerhet mot flateutglidning

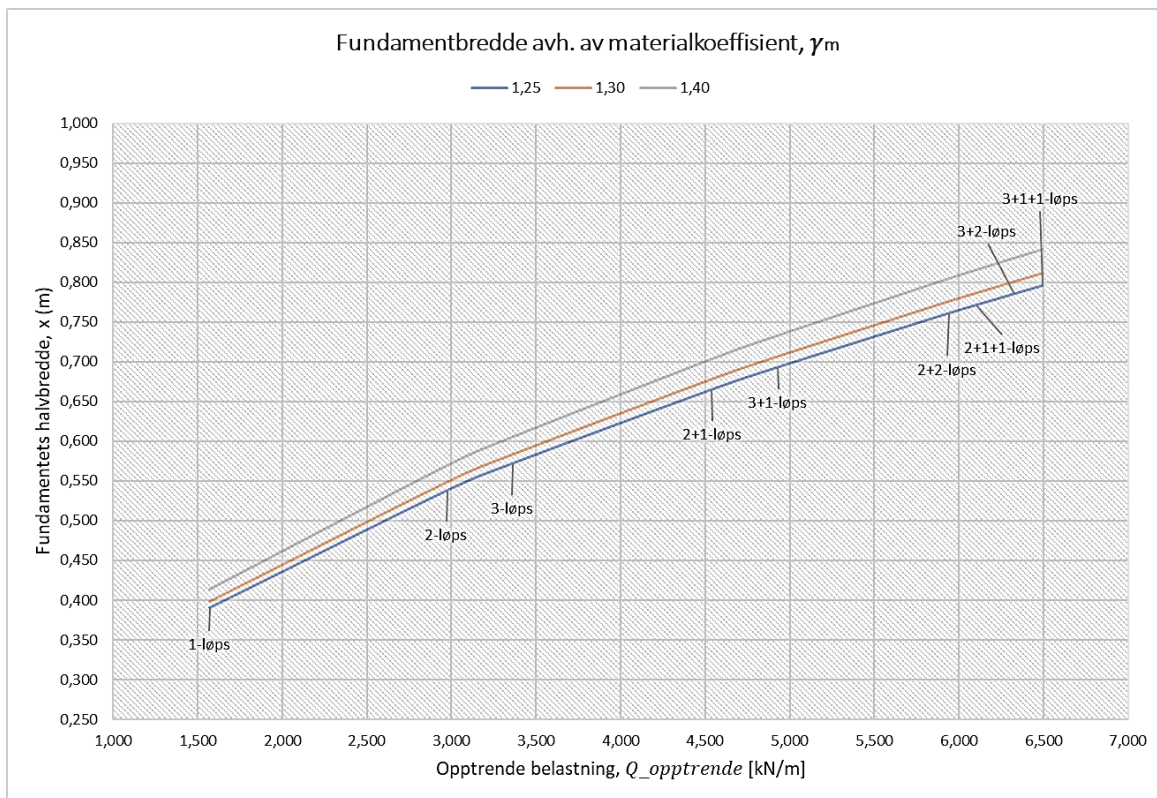
I beregningene av sikkerhet mot flateutglidning inngår bestemmelse av fundamentbredde for ulike kabelkanalkonfigurasjoner. Wiluns metode presentert i avsnitt 3.2.1 benyttes. Metoden gir svar på dimensjonerende størrelse av fundamentets skulder, A , gitt i Figur 3-1.

Tabell 4-7 nedenfor viser gjeldende beregninger. I beregningene er det tatt hensyn til kanalenes egenvekt, inkludert lastfaktor. Pukkens indre friksjonsvinkel og materialkoeffisient settes i første omgang til henholdsvis 42° og 1,25. Pukkens attraksjon settes lik null, i henhold til forutsetninger i Wiluns metode. Dette er en konservativ tilnærming.

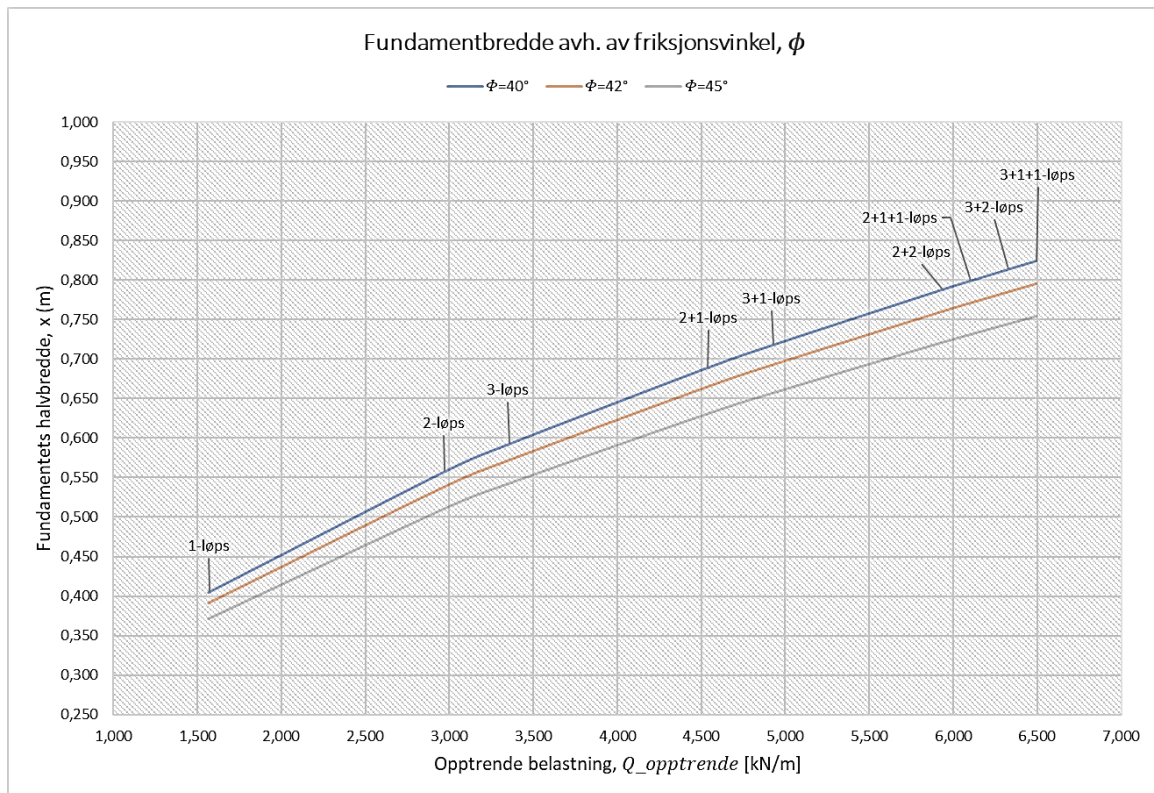
Tabell 4-7: Fundamentets dimensjonerende skulderbredde på utsiden av kabelkanaler.

Pukkens egenskaper			Egenlastfaktor Tyngdetetthet Friksjonsvinkel Materialkoeffisient Attraksjonen	$\gamma_G = 1,0$ $\gamma_{pukk} = 19kN/m^3$ $\Phi = 42^\circ$ $\gamma_m = 1,25$ $a = 0$	
Kabelkanal- konfigurasjon	Kanalens bredde K [m]	Opptrenede egenlast, $Q_{opptrenede}$ [kN/m] (fra Tabell 4-5)	Fundamentets min. halvbredde, x , $x \geq \frac{2\sqrt{Q_{opptrenede}}}{\sqrt{3\gamma_t g \beta}}$ [m]	Fundamentets totalbredde, $2x$, [m]	Fundamentets skulder, $A = x - \frac{K}{2}$ [m]
1-løps	0,31	1,57	0,39	0,78	<u>0,24</u>
2-løps	0,62	2,97	0,54	1,08	<u>0,23</u>
3-løps	0,62	3,36	0,57	1,14	<u>0,26</u>
2+1-løps	0,93	4,54	0,67	1,33	<u>0,20</u>
3+1-løps	0,93	4,93	0,69	1,39	<u>0,23</u>
2+2-løps	1,24	5,94	0,76	1,52	<u>0,14</u>
2+1+1-løps	1,24	6,11	0,77	1,54	<u>0,15</u>
3+2-løps	1,24	6,33	0,79	1,57	<u>0,17</u>
3+1+1-løps	1,24	6,50	0,80	1,59	<u>0,18</u>

Beregningene viser at fundamentets totalbredde øker i takt med kanalens økende egenlast, noe som ikke er overraskende. Kvadratrotfunksjonen (3.4) er økende i intervallet fra 0 til ∞ . Beregningene viser, noenlunde overraskende, at fundamentets skulderbredde avtar med kanalens økende egenlast. Dette skyldes ikke-lineart forhold mellom opptrenede egenlast, $Q_{opptrenede}$, og minimum avstand til fyllingens skråningskant, x . Sammenhengen mellom påført last og fundamentbredde følger en parabel i ligningen (2.4). Dette vises i Figur 4-2 nedenfor.



Figur 4-2: Fundamentets halvbredde, x , for ulike materialkoeffisienter, γ_m . $\phi = 42^\circ$.



Figur 4-3: Fundamentets halvbredde, x , ved ulike friksjonsvinkler, ϕ . $\gamma_m = 1,25$.

Figur 4-2 og Figur 4-3 ovenfor viser hvordan fundamentbredde varierer avhengig av valgt materialkoeffisient og friksjonsvinkel.

Ved valg av materialkoeffisient $\gamma_m = 1,25$ i henhold til Eurokode 0, samt et konservativt valg av friksjonsvinkel, $\phi = 42^\circ$, vil skulderbredder beregnet i Tabell 4-7 være gjeldende. Fordi det er lite ønskelig med breddevariasjon, rundes tallene opp slik det er vist i Tabell 4-8.

Tabell 4-8: Bestemte skulderbredder og skråningshelninger for ulike kanalkonfigurasjoner.

Kabelkanalkonfigurasjon	2+2-løps 2+1+1-løps	2+1-løps 3+2-løps 3+1+1-løps	1-løps 2-løps 3-løps 3+1-løps
Fundamentskulder, A [m]	0,15	0,20	0,25
Skråningshelning, $D:D$ og $E:E$	1:1,5		

4.3 Dimensjonering av oppyllingen på utsiden av kabelkanaler

I dette avsnittet vises forenklet dimensjonering av oppyllingen på utsiden av kabelkanaler. Først beregnes jordtrykk mot kanalenes sidevegg. Deretter beregnes ruhetsforholdet i glidesiktet mellom kanaler og fundamentet.

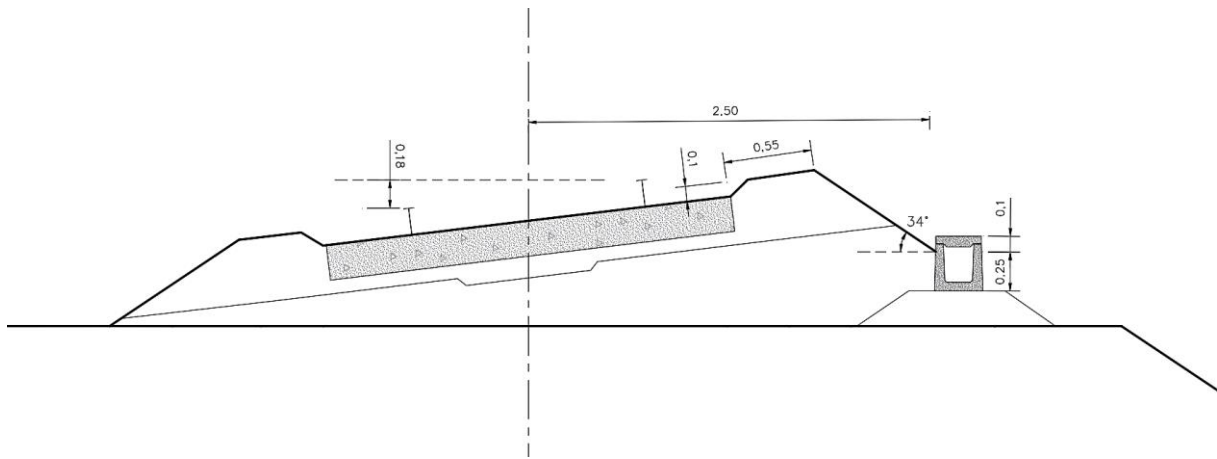
4.3.1 Jordtrykk mot kanalens sidevegg

Jordtrykk mot kanalens sidevegg er antatt å komme fra maskinelt arbeid i sporet og fra tilbakefylling av pukkmasser mellom ballasten i sporet og selve kanalen (området 1 i Figur 3-1). Størrelsen av maskinell påkjenning fra et ballastrenseverk ble tidligere vist i avsnitt 3.2.2. For å finne størrelsen av jordtrykket, benyttes ligninger tidligere gitt i kapittel 3.2.1.

Alle kabelkanaler har lik høyde, men 1-løps kanal har 20mm tynnere lokk. Det betyr at sidevegg i en 1-løps kanal vil ha større oppfyllingshøyde målt fra bunnen av kanalen enn andre kanaler. I henhold til TRV sine krav, skal oppfyllingens høyde være lavere enn 50mm under underkant lokk.

Oppfyllingens helning bak kanalen, β , vil være avhengig av svillelengde, sporets overhøyde, sporets kurveradius og referansehøyde til selve kanalen. Dimensjonerende svillelengde vil være ved lengst mulig sville, det vil si 2,6 meter. Maksimal tillatt overhøyde i Norge er 180mm, selv om denne forekommer svart sjeldent og gjelder kun for rene persontrafikkbaner. Avstand fra senterspor kommer frem av krav gitt i TRV og settes til 2,5m. I en dimensjonerende situasjon fås det en 1-løps kanal liggende i en ytterkurve, i en skarp sving med krav om utvidet ballastkulder.

Høydemessig plasseres kanalen slikt at ballastkulderkant kan opprettholde krav om helning 1:1,5, samtidig som pukkens oppfylling ligger 50mm lavere enn underkant lokk. Topp av kabelkanalen vil i dette tilfellet ligge omtrent i nivå med svilletopp under laveste skinne. Dette er illustrert i Figur 4-4 nedenfor. Pukkens helning bak kanalen i denne situasjonen vil ikke overstige 34° (målt inn i AutoCAD).



Figur 4-4: Maksimal terrenghelning bak kanalen.

Tabell 4-9 nedenfor viser beregninger av hviletrykksresultantkraft avhengig av oppfyllingshelning på baksiden av kanalen. Materialfaktor forutsettes fortsatt å være 1:1,25 og friksjonsvinkel settes til 42°.

Tabell 4-9: Beregning av hviletrykksresultant mot kanalens vegg.

Pukkens egenskaper				Egenlastfaktor Tyngdetetthet Friksjonsvinkel Materialkoeffisient			
				$\gamma_G = 1,0$ $\gamma_{pukk} = 19kN/m^3$ $\Phi = 42^\circ$ $\gamma_m = 1,25$			
Helning til oppfylling bak kanal, β [°]	Kontak flate-høyde, H [m]	$\tan\phi$	$\frac{\tan\rho}{\gamma_m} = \frac{\tan\Phi}{\gamma_m}$	Mobilisert friksjonsvinkel, ρ [°]	Effektiv hviletrykkskoeffisient, $K_0' = 1 - \sin\rho$	Effektiv hviletrykkskoeffisient med faktor β , $K_{0,\beta}' = K_0' (1 + \sin\beta)$	Resultantkraft, $F_0 = 0,5 K_{0,\beta}' \gamma H^2$ [kN/m]
0	0,25	0,900	0,720	35,8°	0,42	0,42	0,25
5						0,45	0,27
10						0,49	0,29
15						0,52	0,31
20						0,56	0,33
25						0,59	0,35
30						0,62	0,37
35						0,65	0,39
40						0,68	0,41
45						0,71	0,42

Beregningene viser at i dimensjonerende situasjon, vil hviletrykket mot kanalen være cirka 0,39 kN/m. Dersom materialets friksjonsvinkel justeres mellom 40° – 45°, uten å endre på materialets sikkerhetsfaktor, vil beregnet jordtrykk variere henholdsvis fra 0,35 til

0,41 kN/m. Dersom materialets sikkerhetsfaktor økes til 1,30 – 1,40, med friksjonsvinkelen på 42°, vil jordtrykket være henholdsvis 0,40 og 0,43 kN/m. I teoretisk best mulig scenario med friksjonsvinkelen på 45° og materialkoeffisienten 1,25, vil trykket mot kanalen være 0,35 kN/m. I verst tenkelig scenario, vil trykket være 0,45 kN/m. Gjennomsnittet mellom best og verst tenkelig scenario vil være 0,40 kN/m, noe som avviker marginalt fra resultatet i Tabell 4-9. Denne verdien kan derfor antas videre i oppgaven.

4.3.2 Ruhetsforhold i glidesiktet

I kapittel 3.2.1 ble det redegjort for ruhetsforholdet mellom horisontale- og vertikalkrefter i glidesiktet under et fundament. Dette prinsippet brukes for kabelkanaler liggende på et pukkfundament. Ligning (3.12) gir et uttrykk for maksimal tillatt horisontalbelastning på en kanal før kanalen begynner å gli. Dersom det antas ingen attraksjon i pukkmaterialet, kan ligningen forenkles til:

$$q_h < q_v \times \tan \rho \quad [kN] \quad (4.2)$$

Denne forenklingen er konservativ i det pukkens attraksjon bidrar til å øke materialets skjærfasthet i glidesiktet. Med andre ord, vil det være enklere å skyve kanalen dersom attraksjonen i pukken under settes lik null. Horisontalpåkjenningen skal ikke være større enn produktet av vertikalkrefter virkende på fundamentet, og den mobiliserte friksjonskoeffisienten til pukkmaterialet.

Vertikalbelastningen utgjøres av kanalenes egenlaster, gitt tidligere i Tabell 4-5, multiplisert med egenlastfaktor, $\gamma_G = 1,0$. I beregningen av bæreevnen ses det bort fra egenvekt til materialer i områder 1 og 3 (Figur 2-15). Dette begrunnes i at belastningen på pukkfundamentet fra kanaler oppstår en god stund før masser i området 1 og 3 legges ut. I henhold til Statens vegvesens Håndbok V221 (Statens vegvesen, 2014, s. 30) skal motfyllinger alltid legges ut samtidig med hovedfyllingen for å oppnå ønsket effekt. Dette er en konservativ tilnærming fordi tyngden av en motlast ville bistå mot glidningen av kanalen.

Horisontalpåkjenningen bestemmes ved å summere hviletrykket funnet i forrige avsnitt med maskinell påkjenning fra ballastrensingen. Beregning av kapasitet mot glidning vil også her være avhengig av pukkes egenskaper; friksjonsvinkel og materialkoeffisient. Tabell 4-10 på neste side viser beregninger av ruhetsforholdet for en 1-løps kanal med ulike friksjonsvinkel til puk.

Beregningene viser at for en 1-løps kanal, materialfaktor $\gamma_m = 1,25$, og pukkens friksjonsvinkel på 45°, skal det være mulig å oppnå ruhetslikevekt uten oppfylling på utsiden av kanalen. Det betyr at pukkens øvre grense for friksjonsvinkelen er nådd. Det er heller ikke rom for strengere sikkerhetsfaktorer enn det er antatt i beregningen. Med de angitte forutsetningene kan det påstås at oppfylling på utsiden av kanalen ikke er nødvendig for at kanalen skal ligge i ro. Påstanden kan begrunnes med følgende argumenter:

- Attraksjonen er satt til null. I virkeligheten vil attraksjonen i komprimerte fyllinger av puk kunne være opp til 10 kN/m², jf. Tabell 4-4.
- Dimensjonerende jordtrykk mot kanalens sidevegg er antatt å ha hviletrykksform, noe som i seg er konservativt.
- Hviletrykket er beregnet i mest ugunstig situasjon, hvor sporet ligger med overhøyde 180mm. En reduksjon av overhøyden fra 180mm til 150mm, gir en

reduksjon av terrenghelning bak kanalen på 4°, og en reduksjon av horisontalpåkjenningen, q_h , med 2,4%.

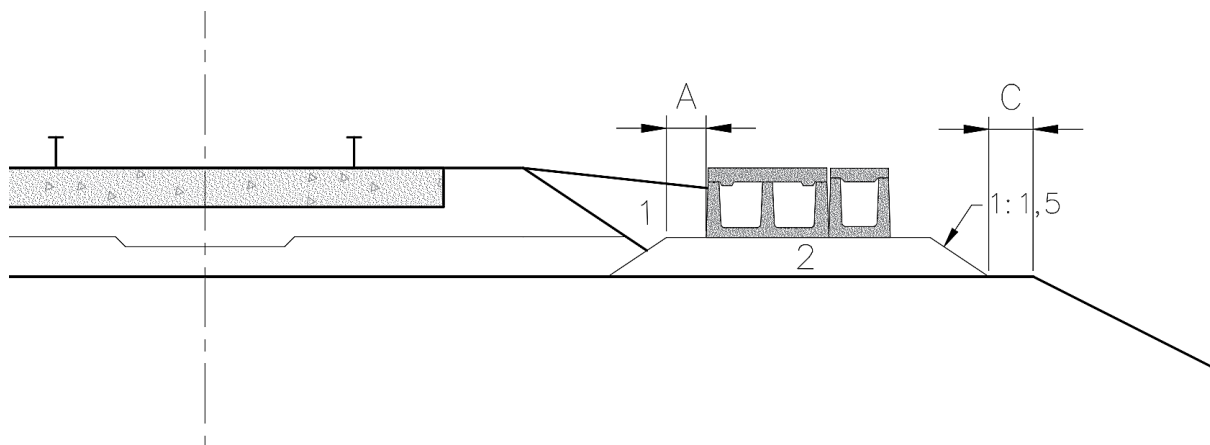
Ettersom en 1-løps kanal veier minst, vil det ikke være behov for å utføre tilsvarende beregninger for tyngre kanalkonfigurasjoner. I denne oppgaven gjennomføres det heller ikke tilsvarende beregninger for kabelkanaler av plast.

Tabell 4-10: Beregning av ruhetsforhold for en 1-løps kanal.

Friksjonsvinkel, ϕ	$\tan \phi$	γ_m	$\tan \rho = \frac{\tan \phi}{\gamma_m}$	Horisontalpåkjenning, $q_h = F_0 \times \gamma_G + F_{rens} \times \gamma_f$ [kN/m]	Vertikalpåkjenning, $q_v = Q_{opptrende} \times \gamma_G \times \tan \rho$ [kN/m]
25°	0,466	1,25	0,373	$q_h = 0,4 \times 1,0 + 0,66 \times 1,3$ $= 1,26$	0,59
30°	0,577		0,462		0,73
35°	0,700		0,560		0,88
40°	0,839		0,671		1,05
42°	0,900		0,720		1,13
45°	1,000		0,800		1,26

4.4 Sluttdesign av masser rundt kabelkanaler

Forenklet dimensjonering av størrelser gitt i forrige avsnitt gir svar på utformingen av masser rundt kabelkanaler. Figur 4-5 under viser hvordan Figur 3-1 har utviklet seg etter dimensjoneringen.



Figur 4-5: Sluttdesign av masser rundt kabelkanaler. Eksempel med 2+1-løps kanaler.

Verdier av A for ulike kanalkonfigurasjoner hentes fra Tabell 4-8. Verdi av C fastsettes på kvalitativ basis da det ikke fantes gode beregningsmetoder for å finne denne størrelsen. Basert på gjennomførte intervjuer og et ønske om å ha en margin mot utglidning av masser på høye fyllinger, settes avstanden C til 50mm. Avstanden blir større i tilfeller hvor TRVs krav til planeringsbredder er dimensjonerende.

4.5 Bestemmelse av optimal referansehøyde

Plasseringen av kanaler i forhold til et bestemt referansepunkt i høyde vil ha påvirkning på volum av materialer som inngår i de ulike områdene som ble beskrevet i forrige avsnitt. I tillegg vil planeringsbredden av hele banelegemet bli påvirket. Optimal plassering av kabelkanaler i høyde bedømmes basert på sammenligning av arealer til de ulike delene av overbygningsskroppen, det vil si ballastpukken, oppfyllingen rundt kanaler og fundamentet under kanaler. Det sammenlignes også planeringsbredder og beskrives andre fordeler og ulemper ved ulike alternativer.

Enkle banemodeller er prosjektert i Novapoint sin jernbanemodul for å generere ulike tverrsnitt i henhold til dimensjoneringskriteriene gitt nedenfor i Tabell 4-11. Arealene og avstandene er målt digitalt i AutoCAD og vist i Vedlegg 1. Masser rundt kabelkanaler er dimensjonert etter funn i forrige avsnitt. For enkelhetsskyld er det antatt at banelegemet er fundamentert på en fylling.

Tabell 4-11: Dimensjoneringskriterier for bestemmelse av kanalenes optimale referansehøyde.

<i>Dimensjoneringskriterier</i>	<i>Beskrivelse</i>
Kabelkanalkonfigurasjon	- 1-løps kanal
Kanalens referansehøyde	- topp av kabelkanal i høyde med topp av sville nærmest kanalen - topp av kabelkanal i høyde med topp av sville i spormidt - topp av kabelkanal i høyde med topp av sville under SOK
Svillelengde	- 2600mm, 2500mm, 2400mm og 2300mm
Ballasthøyde	- 700mm for JBV 54/JBV 97/NSB 90/NSB enhetssville standard - 750mm for JBV 60/NSB 95 standard
Sporets overhøyde	- for overhøyder fra 0mm til 180mm
Sporets kurvatur	- kanaler mot kurvens inner- og ytterside

Modellering og beregninger er utført kun for en 1-løps kanal av tidsmessige årsaker. Det er antatt her at for andre kanalkonfigurasjoner hadde en fått forholdsmessig lignende resultater. Dette skyldes at bredere kanaler, eller flere kanaler i parallell, ikke endrer høydeforhold, og symmetrien blir lik. Dette kan enklere forestilles ved å se på Vedlegg 1 hvor relevante tverrsnitt er tegnet ut.

Ballasthøyden måles fra SOK og ned til formasjonsplanet, mens ballasttykkelsen måles fra underkant sville og ned til formasjonsplanet. Ballasttykkelsen vil kunne variere innenfor samme krav for ballasthøyde, avhengig av valgt skinne- og svilletepe. I eksisterende spor med krav om 700mm ballasthøyde vil denne forskjellen kunne utgjøre maksimalt 28mm for samme svilletepe. Dette kommer frem av høydeforskjell mellom 37,5kg og 54E2 skinneprofiler. I teorien er det slikt at jo lavere skinneprofil benyttes i sporet, desto høyere vil toppen av sville ligge. Dette vil igjen kunne påvirke referansenivå for topp av kabelkanaler og videre den totale planeringsbredden. I praksis har sviller ulik design og ulike høyder langs svillens lengde, så antall mulige varianter er omtrent så stort som antall sville- og skinneskombinasjoner. For enkelhetsskyld betraktes derfor sville som et rektangel plassert sentrisk om sentersporakse.

Valg av skinneprofil vil først og fremst være avhengig av overbygningsklasse. Lave skinneprofiler tilhører ofte lave overbygningsklasser som fases stegvis ut i takt med økning av aksellaster. I vurderingen av optimal referanse høyde for eksisterende spor, med svillelengder 2300–2500mm, og med krav om 700mm ballasthøyde, er det derfor valgt mer moderne skinneprofil, 54E3.

Det er vurdert tre ulike referanse høyder for plassering av topp av kabelkanalen, slik det er angitt i Tabell 4-11 og vist i Vedlegg 1. Tverrsnittene er tegnet ut slik at kabelkanaler plasseres med lik referanse høyde både mot sporets inner- og ytterside, selv om en kunne tenke seg en blanding av disse alternativene. Det siste alternativet kun vurderes, uten å bli tegnet.

Først beskrives resultater for kanaler plassert på begge sider av sporet. Resultatene viser at ved plassering av kabelkanaler i høyde med topp av nærmeste sville vil avstanden mellom kanaler og formasjonsplanet variere avhengig av sporets overhøyde og om kanaler ligger mot kurvens inner- eller ytterside. Fordelen med dette alternativet er at kanaler mot kurvens ytterside vil ligge høyere enn i alternativene med annen referanse høyde. Dette gir potensielt lavere risiko for oppfylling med ballastpukk ved for eksempel ballastsupplering i sporet. Det fås også slakere helning fra ballastskulderkant mot kanaler i yttersving, noe som gir bedre leie for lokk til kanalen. Benytter en det samme prinsippet for kanaler liggende mot kurvens innerside, vil det vise seg at kanaler havner lavere enn i de to andre alternativene. Faren for oppfylling vil derfor være større her dersom kanalen ligger i innersving.

En annen ulempe med denne plasseringen er at det alltid fås ulike høyder av fundamentet under kanaler på begge sider av sporet. Dette antas å kreve mer jobb og oppmerksomhet for både prosjekterende og entreprenør. Erfaringsmessig er det enklere å prosjektere og modellere noe som ligger med fast høyde over formasjonsplanet enn om høyden måtte variere hele tiden. Det antas også å være mer tidskrevende ettersom varierende kurvatur krever mer oppmerksomhet ved kontroll og utførelse.

Slik det kommer frem av Vedlegg 1, og verdi av arealet A3, vil denne plasseringen av kanalen i forhold til sville, generere størst sammenblanding av uønskede fraksjoner fra fundamentet under kanaler og inn i ballastpukken. Dette gjelder i alle tilfeller hvor overhøyde er forskjellig fra null, og uavhengig av type sporkonstruksjon. Jo større overhøyde desto mere material med fraksjon mindre enn 31,5mm blandes inn i ballastlaget. Dette anses uheldig med tanke på ballastegenskaper beskrevet tidligere, samt med hensyn til vedlikehold av ballastlaget og fare for undergraving av fundamentet ved ballastrensning.

Ved plassering av kanaler i høyde med topp av sville midt på sporet, blir høyden av fundamentet under kanalen lik på begge sider av sporet, uavhengig av overhøyde. Fundamenttykkelsen vil likevel fortsatt variere med overhøyden. Dette skyldes at ballasthøyden måles under laveste skinne og ned til formasjonsplanet, ikke i spormidten. Det betyr at jo større overhøyde desto høyere fundamentet.

Denne løsningen virker å gi mer forutsigbarhet med tanke på prosjektering, modellering og bygging enn det første alternativet. Færre hjelpeflater må genereres for utsetting av kanaler i 3D, spesielt dersom disse plasseres på begge sider av sporet. Det fås brattere helning i ballastskulderkant mot kanaler i yttersving, med de ulempene dette medfører. Samtidig fås det slakere helning mot kanaler på innersiden av sporet. Dersom en forutsetter at oppfyllingen skal ligge i henhold til TRV - 50mm under lokk, vil kanalenes

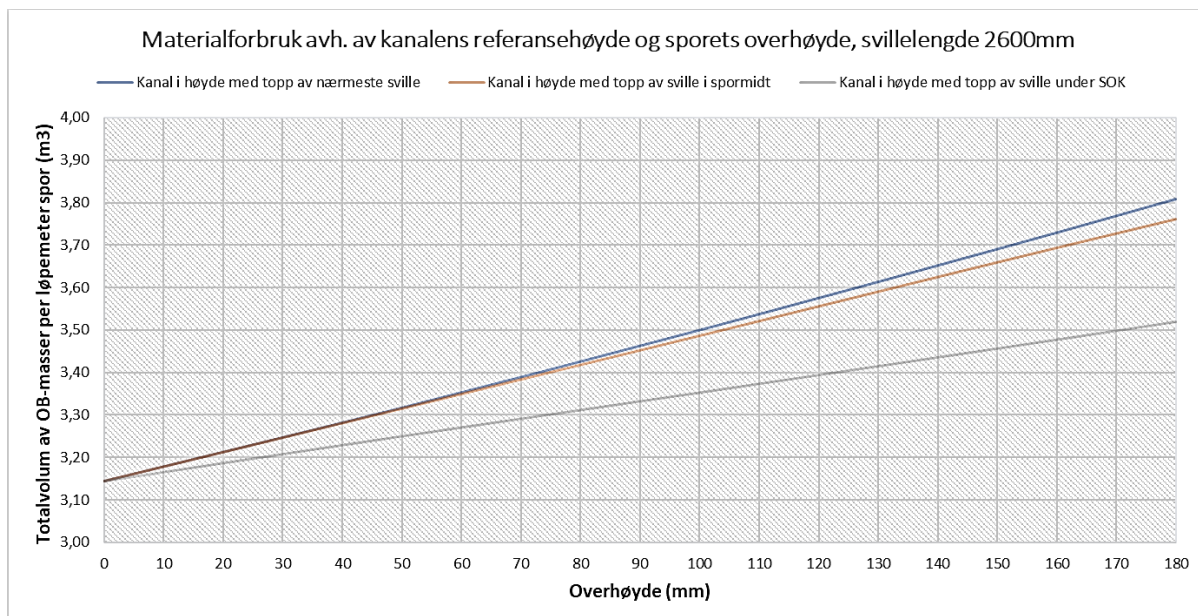
oppfylling i innersving være rettet innover mot sporet ved overhøyder større enn 100mm. Dette kan være uheldig med tanke på fare for gliding av lokk mot sporet ved vedlikeholdsarbeider.

Vedlegg 1 viser at innblanding av finere masser i ballastpukken i dette alternativet kan reduseres med opptil 2,8-3,1%, avhengig av valg av sporkonstruksjon, sammenlignet med alternativet hvor kanalen følger høyde på nærmeste sville.

Den tredje løsningen hvor kanaler plasseres i høyde med topp av sville under laveste skinne gir et fast volum av masser i fundamentet under kanalen. Størrelsen av fundamentet vil i dette tilfellet være kun avhengig av ballasthøyden i sporet. Løsningen er enklest å prosjektere ettersom alle kanaler plasseres i samme høyde i forhold til formasjonsplanet. Det vil være noe brattere skråningshelning mot kanalen liggende i yttersving enn i de to første alternativene, så sjansen for at kanaler fylles opp med pukkk er større i dette alternativet.

Løsningen reduserer mengden av innblandingssmasser med fraksjon mindre enn 31,5mm, med ca. 2,5-3,2% og 5,3-6,4% sammenlignet med henholdsvis forrige og første alternativ. Prosenten øker med økende svillelengde.

En annen viktig parameter ved vurderingen av kanalenes referansehøyde er forbruk av masser i overbygningen. Figur 4-6 nedenfor viser sammenheng mellom sporets overhøyde og det totale volumet av pukkmasser, avhengig av kabelkanalenes referansehøyde. Figuren viser åpenbart at mengde pukkk øker med økende overhøyde. Figuren viser også at plassering av kabelkanaler i høyde med topp av sville under SOK skiller seg fra de to andre plasseringene. For nye sporkonstruksjoner med 2600mm svillelengde og 750mm ballasthøyde vil maksimal besparelse i masseforbruket være 0,289m³ pukkk per løpemeter spor. Dette er 6,4% mindre enn med alternativ hvor kanaler følger høyde på nærmeste sville.



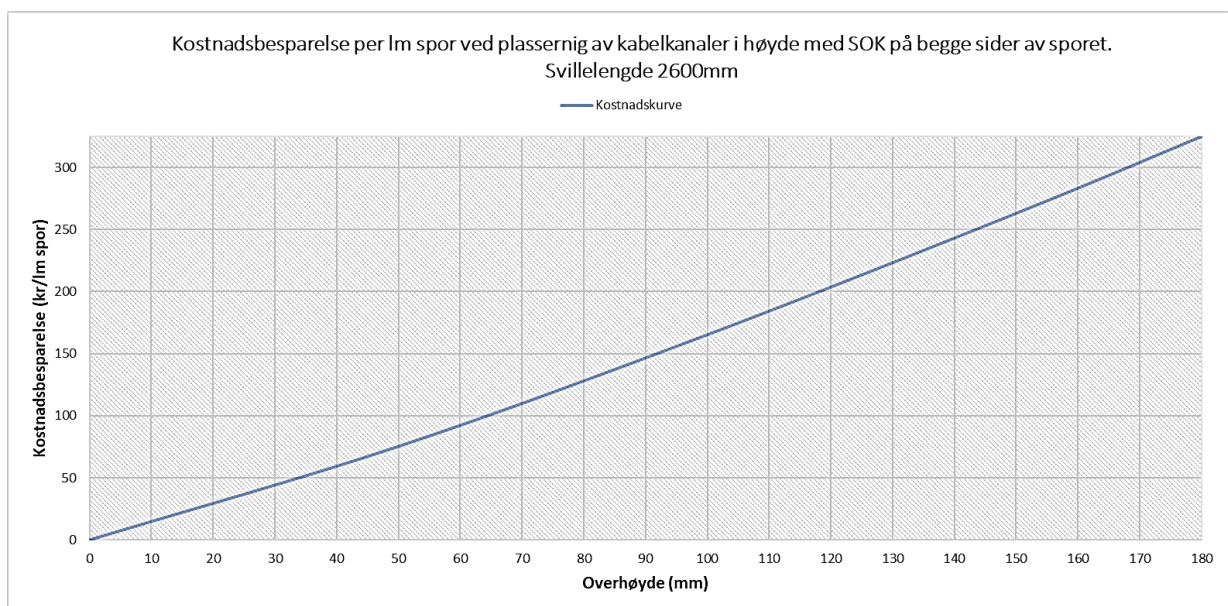
Figur 4-6: Volum av overbygningsmasser avhengig av kanalens referansehøyde og sporets overhøyde. Kanaler med lik referansehøyde på begge sider av spor.

For å kunne svare på spørsmål om dette er mye eller lite, må det gjøres noen grove overslag. Etter å ha vært i kontakt med ulike pukkkverk, er det funnet ut at pukkkprisen

varierer med fraksjon (antall knusestrinn), lokale forhold og tilgjengelighet, samt med leveringskostnader. Generelt er det slikt at jernbanepukk koster 5-10% mer enn andre tottrinnsknuste pukkmaterialer. Imidlertid vil noen finere, og ikke standard fraksjoner som TRV opererer med (8-20mm), være produsert i tretrinnsknusing. Dette gjør at prisen for ballastpukken og finpukken under fundamentet blir sammenlignbar. Av den samme grunnen kan det ses bort i fra masseforholdet mellom de to fraksjonene. Det er funnet ut at gjennomsnittlig pris til pukk kan settes til 400 kroner/tonn, inklusiv merverdiavgift og en gjennomsnittlig transportavstand på 25km. Videre kan det antas at en kubikk pukk tilsvarer ca. 1,5 tonn, noe som gir 600 kr/m³. Med denne innkjøpsprisen og et entreprenørpåslag på 25%, kan den endelige prisen settes til 750kr/m³. Det kan enkelt estimeres at maksimal besparelse ved å legge kabelkanaler i høyde med SOK, istedenfor i høyde med nærmeste sville, er ca. 325kr per løpemeter spor. Dette gjelder for spor med 2600mm svillelengde, 180mm overhøyde, 750mm ballasthøyde og med kabelkanaler med lik referansehøyde på begge sider av sporet. Ved halvert overhøyde vil besparelsen reduseres til ca. 150kr per løpemeter spor. Beregningene viser også at i det samme scenarioet er det mulig å oppnå mellom 5,35-6,0% besparelse ved bruk av kortere svillelengder. Besparelsen avtar med kortere svillelengder.

Tatt i betraktning at en løpemeter ferdig bygget overbygning erfaringsmessig koster ca. 4 000 – 6 000kr, vil neppe valg av referansehøyde for kabelkanaler liggende på begge sider av spor være utslagsgivende for økonomi. Spesielt når en husker at overhøyder større enn 150mm forekommer svært sjeldent i sporet. Figur 4-7 under viser sammenheng mellom sporets overhøyde og potensiell besparelse ved valg av økonomisk mest gunstig og ugunstig referansehøyde. Diagrammet er gjeldene for svillelengder 2600mm, kabelkanaler med samme referansehøyde, liggende på begge sider av sporet. For kortere svillelengder 2300mm-2500mm, vil besparelsen være slik det er vist i

Tabell 4-12 på neste side. Tabellen viser prosentpåslag for kostnadsbesparelsen (kr/lm spor) i forhold til 2600mm lang sville. Negative tall betyr større besparelse enn for referansesvill.



Figur 4-7: Kostnadsbesparelse avhengig av kanalens referansehøyde og sporets overhøyde. Kanaler med lik referansehøyde på begge sider av spor.

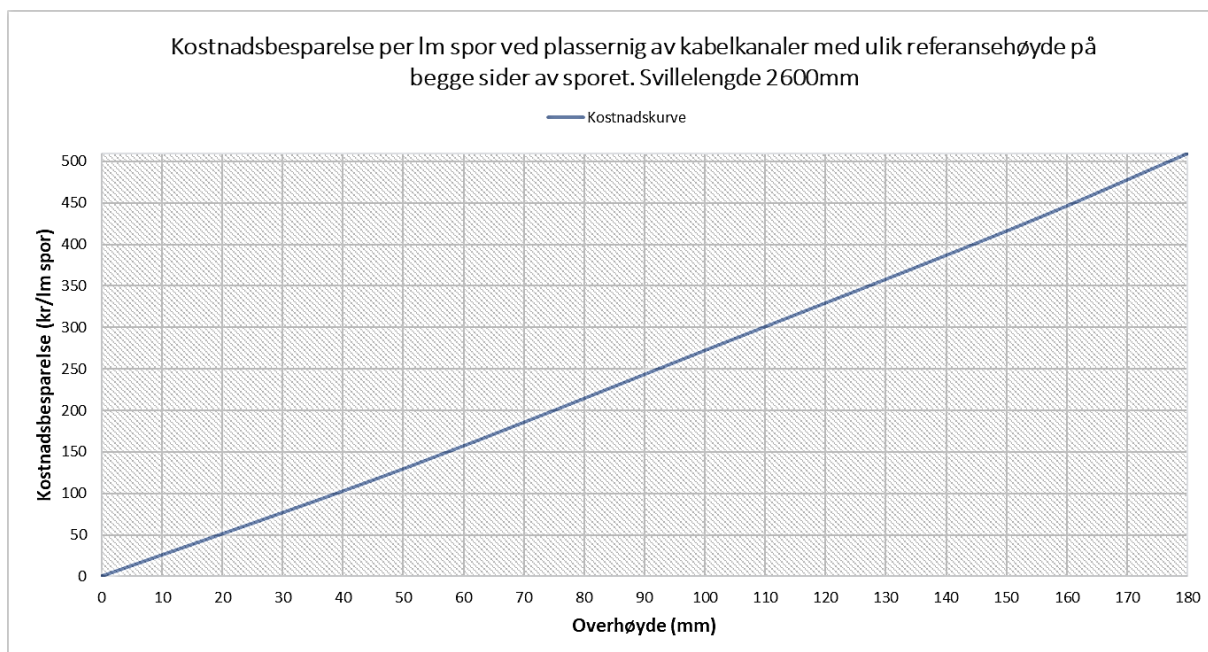
Tabell 4-12: Prosentvis reduksjon i kostnadsbesparelsen for kortere sviller ift. svillelengde 2600mm. Kanaler på begge sider av spor med lik referansehøyde - topp av kanalen i høyde med underkant SOK.

<i>Svillelengde (mm)</i> <i>Overhøyde (mm)</i>	2500	2400	2300
180	4,71%	3,58%	1,76%
150	2,18%	0,86%	0,00%
100	2,80%	0,68%	-0,68%
50	0%	-5,63%	-6,94%
0	0%	0%	0%

Det er ikke alltid plass til forlegning av kanaler kun på én side av spor, men dersom dette er tilfelle, vil situasjonen se litt annerledes ut. For kanaler plassert i sporets yttersving vil det være mest fordelaktig å legge disse i høyde med topp av sville under SOK. Gevinsten blir, på lik linje med kanaler plassert på begge sider av sporet, størst ved størst overhøyde. Dersom beregningseksemplet vist ovenfor følges også her, vil plassering av kanaler kun mot sporets ytterside, i høyde med topp av sville under SOK, gi en maksimal besparelse på 417kr per løpemeter spor.

Kanaler liggende i innersving vil ha større besparelse ved en annen referansehøyde – topp av kanalen i høyde med topp av nærmeste sville. Denne plasseringen i innersving gir en maksimal besparelse på 92kr. I en økonomisk ideell situasjon vil en derfor plassere kanaler i høyde med topp av sville under SOK i en yttersving, og i høyde med topp av nærmeste sville i en innersving. Sammenlagt kan den totale gevinsten være på 510kr per løpemeter spor, dersom det velges ulike referansehøyder på begge sider av sporet. Dette er 56,9% lønnsommere enn om en hadde valgt å legge kanaler med lik referansehøyde på begge sider av sporet. Dette utgjør også 8,5-12,8% av den totale kostanden for overbygningen, forutsatt 180mm overhøyde i sporet. Dette kan gjøre en prisforskjell over lengre strekninger med store overhøyder. Det er i tillegg viktig å påpeke at plassering av kanaler på denne måten minimerer mengde av materialer med fraksjoner mindre enn 31,5mm i ballastlaget.

Den sammenlagte kostnadskurven for spor med svillelengder 2600mm er vist i Figur 4-8 nedenfor. Kanaler plasseres i høyde med SOK i yttersving og i høyde med nærmeste sville i innersving. Det er ikke utført tilsvarende analyse for kortere svillelengder, men på grunn av symmetri antas det at forskjeller vil ligge innenfor noen prosentpoeng, slik det ble funnet i forrige eksemplet.



Figur 4-8: Kostnadsbesparelse avhengig av kanalens referansehøyde og sporets overhøyde. Kanaler med ulik referansehøyde på begge sider av spor.

Foruten arealer angir Vedlegg 1 planeringsbredder for enkeltspor med 1-løps kanal og ulike svillelengder. Avstander B_i og B_y illustrerer hvor mye plass det kreves for legging av kanalen mot sporets henholdsvis inner- og ytterside. I parentes angis det krav til planeringsbredder gitt av TRV. Disse kravene er ikke representative med tanke på plassering av kanaler, men de vises for sammenligning. Verdiene av b_i og b_y er planeringsbredder for ballasten og disse angis på en tilsvarende måte. Disse er ikke avhengig av plass til kabelkanal, men av svillelengde, ballasthøyde og sporets overhøyde. For verdiene av b_i og b_y registreres det avvik i forhold til krav gitt i TRV. Avstander mellom senterspor og ballastkant er forskjellige fra TRVs krav i de fleste tilfellene, for alle svillelengder. Det er en usikkerhet knyttet til hvilke geometriske krav som er lagt til grunn ved beregning av disse verdiene i TRV.

Det er ingen hemmelighet at en kan forsøke å legge kanaler på den ene eller andre siden av sporet for å unngå utvidelse av formasjonsplanet. Det kan også tenkes alternative forlegningsmetoder, for eksempel OPI-kanaler eller pæler. Hvis alternative plasseringer ikke er aktuelle, er det likevel interessant å vite hvilken referansehøyde gir smalest formasjonsplan.

Tallene viser at for spor med svillelengde 2600mm vil plassering av en 1-løps kanal i høyde med SOK gi ingen utvidelse av formasjonsplanet utover kravet (7,0m). Dette gjelder uavhengig av om kanalen legges på begge, eller kun én side av sporet.

Ved plassering av kanalen i høyde med topp av sville midt på sporet, vil utvidelsen av formasjonsplanet være i størrelsesorden 0,00-2,43%, avhengig av overhøyde. Bredere formasjonsplan vil først være nødvendig dersom sporets overhøyder overskrider ca. 100mm. Utvidelsen viser seg å være symmetrisk om spormidt. Det betyr at ved en maksimal utvidelse på 17cm, vil halvparten av denne ligge på hver sin side av sporet. Det betyr også at ved overhøyder større enn 100mm gir alternativet ingen gevinst ved å bytte plassering av kanalen fra den ene til den andre siden.

Løsningen med topp av kabelkanalen i høyde med topp av nærmeste sville vil favorisere kanalen liggende mot sporets innerside, ettersom dette gir ingen utvidelse av formasjonsplanet. Til gjengjeld vil den samme referansehøyden ved plassering av kanalen mot sporets ytterside, generere en utvidelse mellom 0-4,5%, avhengig av overhøyde. Dette tilsvarer 33cm bredere formasjonsplan i yttersving med maksimal overhøyde på 180mm.

For spor med sviller kortere enn 2600mm skal det ikke være mulig å opprettholde TRVs krav til planeringsbredder dersom en ønsker å legge kabelkanaler på formasjonsplanet på et pukkfundament. Til og med med den smaleste 1-løps kanalen, vil formasjonsplanbredde måtte utvides med opp til 0,55-0,88m, uavhengig av kanalens referansehøyde.

I tilfeller hvor kanaler legges på begge sider av spor, med lik referansehøyde, vil planeringsbredden være minst ved plassering av kanaler i høyde med topp av sville under SOK. Smalere planeringsbredder kan oppnås ved bruk av ulike referansehøyder mot sporets inner- og ytterside, slik det ble forklart tidligere. For kanaler liggende kun i innersving vil det være mest fordelaktig å plassere disse i høyde med topp av nærmeste sville for alle overhøyder. Kanaler liggende kun mot sporets ytterside bør plasseres med topp av kanaler i høyde med underkant av laveste skinne.

Utvidelse av formasjonsplanet er vanskelig å kvantifisere i kroner uten å gjøre flere antakelser. Kostnaden vil variere sterkt avhengig om det er nytt eller eksisterende spor. Videre vil fundamenteringsmetoden og grunnforhold styre prisen betydelig. Til slutt kan det være aktuelt å benytte alternative forlegningsmetoder for å begrense kostnader. Derfor er det i denne oppgaven kun sett på relative forskjeller i planeringsbredder avhengig av ulike referansehøyder. Et grovt overslag som kan gis her er å anta en løpemeterpris for ferdigbygget underbygning på 20 000–30 000 kr. Et riktig valg av referansehøyde kan gi en besparelse på opptil 2,4-4,5%. Dette tilsvarer ca. 500–1350kr per løpemeter spor. Sammenlagt med pukkbetparelsen beskrevet tidligere, er det noen kroner som kan spares her.

4.6 Plassering av kabelkanaler i utlandet

Forrige deler av resultatkapittelet fokuserte på beskrivelse av erfaringer med legging av kabelkanaler i Norge, samt analyse og dimensjonering av ulike størrelser rundt kanalene, basert stort sett på norske krav. Siste del av dette kapittelet vil fokusere på tekniske krav og eksempler for legging av kanaler i utvalgte land i Europa. Fokuset rettes mot plassering av kabelkanaler tett på ballastlaget.

4.6.1 Sverige

Trafikverket er det ansvarlige organet for jernbaneinfrastruktur i Sverige. Anbefalt standard for plassering av kabelkanaler langs jernbanespor i Sverige er vist i Vedlegg 2. Tegningen tilhører Trafikverkets offentlig tilgjengelig tegningsdatabase som inneholder et sett av standardiserte tekniske løsninger innenfor ulike jernbanetekniske disipliner (Trafikverket, 2022).

Ifølge regelverket skal kabelkanaler langs spor legges i en minimumavstand 2,45m fra senterspor. På eksisterende baner, hvor plassering av KL-master ikke tillater denne avstanden, kan kravet reduseres til minimum 2,30m. Avstandskravet ligner den i Norge, men opphavet til kravet er ukjent. Regelverket mangler informasjon om posisjon til kanalen i høyde. Det kun understrekes viktigheten av kanalplassering slikt at disse ikke gjenfylles av ballast ved fjerning av lokk.

I tillegg til kanaler av betong, tillates bruk av kanaler av komposittmaterialer og plast. Disse skal oppfylle en rekke krav knyttet til miljø, UV-resistans, brann, styrke og ikke minst montering av lokk, slik at lokkene ikke blåses bort. Bruk av andre kanaler enn betongkanaler skal imidlertid alltid godkjennes av Trafikverket under prosjektering.

Standardtegningen angir en del nyttig informasjon. Tegningen viser tre ulike bredder av betongkanaler som brukes i Sverige; 350mm, 535mm og 880mm. For spor uten overhøyde legges kanalene direkte på formasjonsplanet. Rett under kanalene skal toppen av forsterkningslaget tettes med knuste materialer med fraksjon 0-8mm. Dette antas å være nødvendig for avrettingsformål. Først når sporet bygges med overhøyde, vil det være behov for forhøyning i form av et pukkfundament. Dette beregnes etter en angitt formel, avhengig av overhøyden. Forhøyningen bygges kun i sporets yttersving med tilsvarende, fingraderte materialer. Løsningen virker fornuftig med tanke på at kanalen ikke høynes opp der det ikke er strengt nødvendig med tanke på igjenfylling.

Alle kanaler har en høyde på 350mm, akkurat som i Norge. Det betyr at for nye spor uten overhøyde, en ballasttykkelse på 750mm, samt 60kg skinne, vil kanalenes topp ligge 228mm lavere enn topp av sville. Det er betydelig lavere enn i Norge, hvor kanaler i spor uten overhøyde legges normalt i høyde med topp av sville. Dette gir potensielt lavere materialforbruk, smalere formasjonsplan og mindre andel av uønskelige fraksjoner i ballastpukken.

Ifølge tegningen er forhøyningen i yttersving begrenset oppad til 160mm. Det betyr at toppen av kanaler i yttersving, vil ha en fast høyde over formasjonsplanet på 510mm (160mm+350mm), for sporets overhøyder større/lik 100mm. Dersom det antas lignende sporparametere som i eksemplet ovenfor, vil toppen av kanaler ligge maksimalt 240mm under SOK, og etter trekking av skinnehøyde - 68mm lavere enn topp av sville under laveste skinne. Dette er kostnadmessig bedre løsning sammenlignet med det «økonomisk beste alternativet» i Norge.

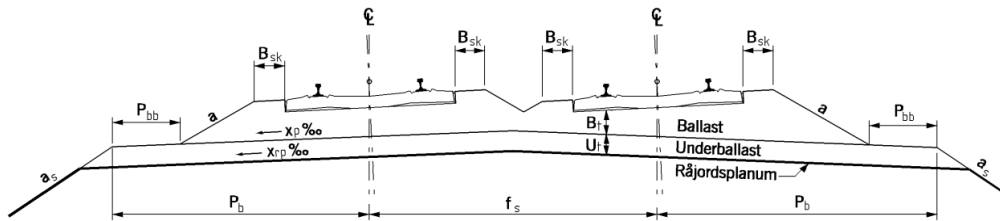
Standardtegningen angir ballastpukk som ønskelig material for oppfylling rundt kanaler. Det er ukjent hvilke forutsetninger er lagt til grunn ved dimensjonering av oppfyllinger rundt kanaler, men det kan legges merke til at fyllingsbredden på utsiden av kanaler avtar med kanalenes økende egenvekt. Behov for stabiliserende tiltak på utsiden av kanaler faller bort først for den tyngste kanalen. Dette kunne ha indikert større krefter fra arbeider i sporet enn forutsatt i denne oppgaven. For oppfyllingens skråningshelning velges 1:1, noe som er mindre konservativt enn anbefalinger og dimensjoneringer foretatt i forrige avsnitt.

4.6.2 Danmark

Banedanmark er et statlig selskap med ansvar for drift og vedlikehold av jernbaneinfrastruktur i Danmark. Ulike banenormer beskriver krav knyttet til legging av kabelkanaler langs jernbanespor. Informasjonen presentert nedenfor er hentet fra BN1-13-3 (Banedanmark, 2020, s. 29-30) og BN1-6-6 (Banedanmark, 2016, s. 9).

I Danmark stilles det like krav til avstand mellom senterspor og kabelkanal som i Norge og Sverige. Her gjelder det minimum 2,50m i normal situasjon og 2,30m som unntak. Det stilles krav til at kanaler plasseres i lik avstand regnet fra nærmeste flate mot spormidt. Dersom kravet tolkes riktig, unngår en plassering av kanaler i konflikt med ballastlaget. Kanaler plasseres direkte på formasjonsplanet, slik at avrenning av banelegemet ikke hindres, eller slik at føringsveiesystemet fungerer drenerende i seg selv.

Det er ikke funnet bedre spesifiserte regler for plassering av kabelkanaler med tanke på kanalenes referansehøyde. Det samme gjelder for krav til oppfyllinger eller fundamenter under. Det er heller ikke funnet noen informasjon om type og dimensjoner av kanaler som er i daglig bruk. Banedanmarks standard normalprofil for dobbeltspor vist nedenfor, gjenspeiler dette godt.

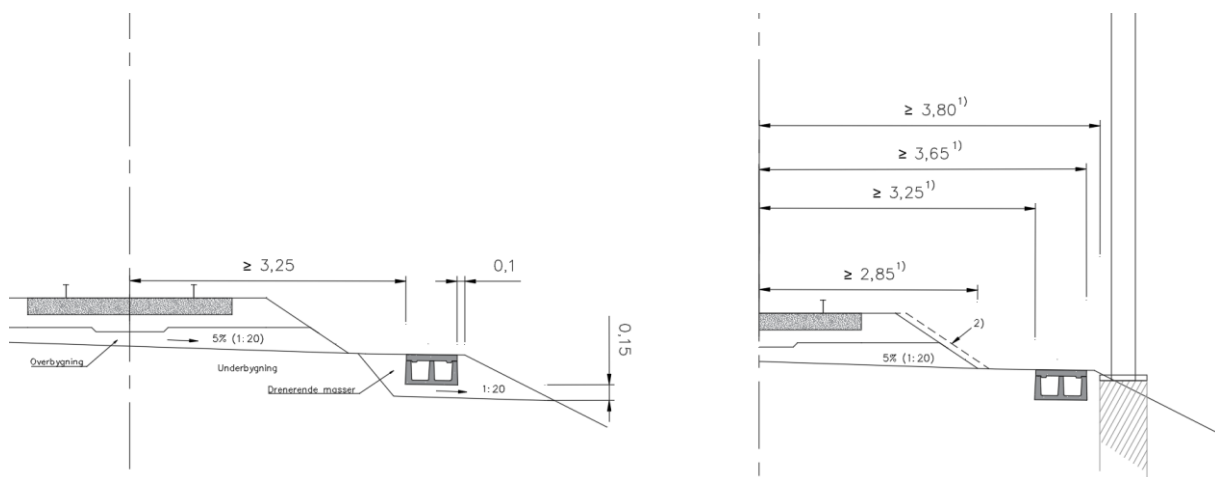


Figur 4-9: Normalprofil for et dobbeltspor i Danmark. Kilde: (Banedanmark, 2016, s. 9)

4.6.3 Tyskland

Deutsche Bahn (DB) er tysk offentlig selskapet med ansvar for infrastruktur, gods- og passasjertrafikk for mesteparten av det tyske jernbanenettet. Innenfor dette eksisterer mange datterselskaper med ulik rolle- og ansvarsfordeling. DB Netz har hovedansvar for jernbaneinfrastruktur som består av over 33 000 km (Deutsche Bahn, 2023).

Et helt annet teknisk prinsipp for plassering av kabelkanaler benyttes i Tyskland. Ifølge mailkommunikasjon med Rambøll i Tyskland og tysk infrastrukturforvalter, skal kanaler plasseres i en minimumavstand 3,25m fra senterspor. Dette er betydelig større avstand enn i Norge, Sverige eller Danmark. I unntakssituasjoner tillattes avstander ned til 2,5m. Kanaler bygges inn i deler av underbygningen med toppen av lokket i høyde med topp av formasjonsplanet. Avrenningen av vannet sikres med bruk av masser med høy permeabilitet rundt kanaler. Prinsippet er illustrert i Figur 4-10 nedenfor.



Figur 4-10: Standard plassering av kabelkanaler basert på krav i Tyskland.

Alle avstander markert med fotnote 1), i høyre del av figuren ovenfor, skal økes i takt med økende overhøyde i sporet. Ved overhøyder mellom 105 og 160mm skal avstanden økes fra 3,25m til 3,65m. Kortere utvidelser er forutsatt for lavere overhøyder. På denne måten sikres at kanalen ikke blir overdekket med ballastpukk i yttersving med overhøyder.

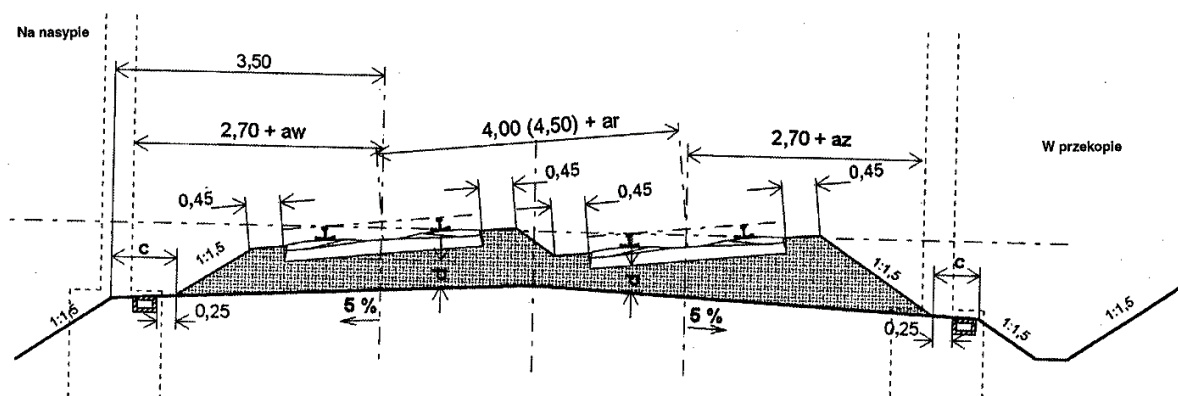
Utvidelsen tar i tillegg høyde for fremtidig supplering av ballast og sporløft (fotnote 2). KL-master plasseres på utsiden av kanaler.

Både i Tyskland og Danmark etableres formasjonsplanet enten med et takfall eller et sidefall. Dette gjør at avstanden mellom spormidtt og ytre ballastkant (b_y fra forrige kapittelet) er større i disse landene enn i Norge, forutsatt lik overbygningskonstruksjon. Formasjonsplanet i Norge bygges normalt uten tverrfall. Innføring av den samme regelen for minste avstand mellom kanal og spormidtt avhengig av sporets overhøyde, ville derfor gitt kortere avstand enn 3,25m i norske forhold.

4.6.4 Polen

Standard normalprofil for et dobbeltspor i Polen er vist i Figur 4-11. De polske statsbaner (PKP) er ansvarlig organ for bygging og vedlikehold av det polske jernbanenettet. Selv om illustrasjonen nedenfor viser kanaler plassert innenfor banelegemet, praktiseres dette svart sjeldent. Det anbefales at alle tele-, signal- og elektroinstallasjoner føres i en avstand på minimum 4m på utsiden av KL-anlegget, dersom dette er gjennomførbart innenfor PKPs sine eiendomsgrenser. Diverse forlegningsmetoder benyttes med desidert overskudd av nedgravinger i bakken og bruk av varerør. Strømforsyning til ulike elektrotekniske installasjoner sikres via luftledninger i egne master stående langs spor.

Dersom det er behov for legging av kanaler innenfor banelegemet, skal det tyske prinsippet følges. I likhet med Danmark og Tyskland, etableres formasjonsplanet med et takfall og det skal sikres kanalenes beliggenhet utenfor ballastprofilet. For alle overhøyder i sporet gjelder en fast avstand på 0,25m mellom kanaler og ballastpukken.



Figur 4-11: Standard normalprofil for et dobbeltspor i Polen. Kilde: (Ministerstwo Transportu i Gospodarki Morskiej., 1988, s. 5485)

5 Diskusjon

Dette kapittelet gir en oppsummering av resultatene funnet i forrige avsnitt. Legging av kabelkanaler langs spor drøftes med tanke på prosjektering, bygging, vedlikehold og kostnad. Det drøftes andre fordeler og ulemper ved ulike plasseringer av kabelkanaler. Kapittelet inneholder en kritisk vurdering av funn og usikkerheter i analysen.

En av grunnene til at denne oppgaven ble skrevet er prosjekterendes oppfatning om at plassering av kabelkanaler langs spor i dagen ikke er tilstrekkelig detaljert gjennom tekniske krav. Prosjektering av masser rundt kabelkanaler lander ofte mellom flere stoler i et prosjekt. Dette skyldes nok at ingen vil ha tilhørighet til materialer og størrelser som ikke er godt definert og dimensjonert. I en slik situasjon øker risikoen for at ting må prosjekteres på nytt, og det er enklere å gjøre feil.

En annen grunn til at denne oppgaven ble skrevet er prosjekterendes mistanke om at legging av kabelkanaler tett på ballastlaget kan ha negative sider. Dette gjelder spesielt når masser med ulike fraksjoner møtes samme sted, og der hvor kanaler liggende i sporets yttersving, tjener som støttevegger.

Litteraturstudien har vist at behovet for føringsveier og dermed kabelkanaler kommer til å bli, selv om nye informasjon- og signalsystemer har redusert dette behovet betraktelig. Plassering av kanaler langs spor er ikke skadelig i seg selv. Forlegningsmetoder og masser rundt kanaler er derimot en annen sak. Litteraturstudien av krav til ballastvedlikehold har indikert at behovet for ballastrensing ikke er strengt avhengig av finstofinnholdet (partikler $< 0,063\text{mm}$), men heller av skjevheten i siktkurvens nedre grense! Det betyr at plassering av kabelkanaler tett på ballastlaget, med en blanding av finkornete masser rundt, er lite ønskelig. Kornfordelingen i ballasten er et kompromiss mellom god bæreevne og god vannavrenning. Mengden av nedknusningsprodukter (partikler finere enn $22,4\text{mm}$) bør ikke overskride 10%, ellers vil massen kunne oppføre seg plastisk og permanente setninger i sporet vil kunne forekomme ved belastninger. Også ujevn fordeling av kornstørrelser i ballasten vil kunne føre til lokale setninger som ofte resulterer i vindskjevheter. Dette understreker viktigheten av å unngå partikler mindre enn $22,4\text{mm}$ i ballastlaget, og gir en indikasjon på når ballastrensingen skal kunne først være aktuell.

Kabelkanaler på et pukkfundament med fraksjon 4-16mm eller 8-16mm, eller en annen fraksjon mindre enn $22,4\text{mm}$, hvor deler av dette fundamentet legges under ballastpukken, virker ikke å være rimelig med tanke på ballastens egenskaper. Intervjuene har vist at et av formålene med fundamentet er å sikre bedre drenering rundt kanaler. Imidlertid brukes det masser som reduserer hullromprosenten i ballasten, fortetter ballasten og kan lede til at ballastens avrenningsegenskaper svekkes over tid. Dette kan igjen påvirke ballastens levetid i negativ retning.

Så lenge fraksjonen av masser under kanaler er definert, er det klart hva en skal forholde seg til. Det er dessverre ikke tilfelle for masser liggende mellom kanaler og ballastlaget, samt for masser på utsiden av kanaler. TRV har ingen spesifikke krav knyttet til dette. Blant respondenter er det primært enighet i at massene mellom ballastlaget og kabelkanaler bør bestå av ballastpukk med fraksjon 31,5-63mm for å unngå innblanding av finere masser i ballastlaget. Ifølge entreprenører er dette ikke alltid praktisert. I prosjekter diskuteres det ofte bruk av finere masser i dette området, blant annet med

tanke på skånsomhet mot kanalene. Vedlikeholdspersonalet ønsker seg gjerne at masser liggende mellom ballast og kabelkanaler, og som delvis raser inn i sporet etter passering av renseverkstoget, består av ballastpukk og ikke mindre masser som «forurenser» ballasten på nytt.

Intervjuene har vist at legging av kabelkanaler på et pukkfundament med oppfyllinger rundt har vært en tradisjonell forlegningsmetode i Norge. TRV definerer minste avstand fra senterspor til nærmeste kanal til å være 2,5m. Vedlikeholdspersonalet påstår at 2,5m er et absolutt minimum for kabelkanaler liggende på begge sider av sporet ved en ballastrensing. Utgravingen av ballasten foregår for nært kanalene og det hender relativt ofte at disse velter inn i sporet. Veltingen foregår ofte over en lenger strekning og har stor konsekvens for rensarbeidet. I noen områder må kanalene først legges om før ballastrensingen kan startes, og reetableres når arbeidet er gjennomført. Det er en fare for undergraving av fundamentet under kanaler ved ballastrensing i denne forlegningsmetoden. Ingen tør å gi svar på om disse fundamentene reetableres etter at en slik renseprosess er ferdig. Imidlertid foregår ballastrensingen svært sjeldent (hver 20-40 år) og det bør derfor stilles spørsmål om det hadde kostnadmessig vært forsvarlig å flytte kanalene lenger bort fra senterspor, og eventuelt utvide formasjonsplanet (større investeringskostnad), eller å beholde avstanden og heller ha høyere periodiske vedlikeholdskostnader knyttet til mer tidskrevende og komplisert rensing. En slik kostnøytteanalyse kunne vært interessant å gjennomføre. Det kan i tillegg stilles et spørsmål om hyppigheten av ballastrensingen er riktig i forhold til definisjonen av forurenset ballast (tidligere 0,063mm kontra nåværende 22,4mm)?

Avstanden fra kabelkanaler til senterspor på 2,5m har også andre bivirkninger. Det gjør at kanalene plasseres i en viss høyde over formasjonsplanet for å ikke bli gjenfylt av ballastpukken. Dette gjelder særlig der hvor sporet bygges med stor overhøyde, og spesielt i sporets yttersving. I det mest ugunstige scenarioet utvides også ballastskulder. Den siste faktoren forekommer imidlertid kun i hovedspor og hovedtogspor med små radier. Problemstillingen med igjennfylling av kanalene ble flere ganger lagt frem i intervjuprosessen. Imidlertid utnyttes denne ulempen for legging av langsgående jordledere og fiberrør i fundamentet under kanalene og på denne måten reduseres det potensielt antall parallelle kanaler. En høyere fylling under kanaler gjør det også enklere å trekke kabler til objekter langs spor.

TRV verken definerer hvor høyt kabelkanaler i dagen skal ligge, eller i forhold til hvilket referansenivå. Dimensjoneringen av fundamentet under kanaler og oppfyllinger rundt har gitt et grunnlag for bestemmelse av optimal høydeplassering for kanaler liggende 2,5m fra senterspor. Resultatene har vist at for kanaler liggende med lik referansehøyde på begge sider av sporet, er plassering av kanaler i høyde med SOK det mest lønnsomme og fordelaktige alternativet. Denne plasseringen gir lavest investeringskostnad, lavest andel av materialer med fraksjon mindre enn 22,4mm innenfor ballastprofilet, samt smalest planeringsbredde. Plasseringen anses også å være mest gunstig med tanke på prosjektering, på grunn av fast avstand mellom kanalene og formasjonsplanet. Resultatene viser også at dersom kanaler plasseres med ulik referansehøyde på begge sider av sporet, vil plasseringen av disse i høyde med topp av nærmeste sville være mest hensiktsmessig i innerkurver. For kanaler liggende i yttersving vil plassering av kanaler i høyde med SOK være det foretrukne alternativet. De samme resultatene vil være gjeldende for kanaler plassert kun på én side av sporet. Investeringskostnaden knyttet til bygging av disse alternativene vil være strengt avhengig av sporets overhøyde.

Beregningene og simuleringene har vist at oppfyllingen på utsiden av kanaler ikke er nødvendig. Dette er basert på at forutsetningene lagt til grunn i modellene er riktige. Dersom løsning med å legge kabelkanaler på et pukkfundament er det foretrukne alternativet, kunne plassen opprinnelig forutsatt for oppfyllingen, benyttes for å øke avstanden mellom kanaler og spormidt. Dette kunne redusere påkjenningen mot kanaler fra maskinelt arbeid i sporet ytterligere. Det bør imidlertid gjennomføres supplerende simuleringer for både ballastrensing og andre arbeider i sporet for å utelukke behovet for oppfyllingen helt. Det er viktig å påpeke at rensesimuleringen er gjennomført i en avstand på ca. 0,6m fra kabelkanalen. Rensingen nærmere kanalen, slik dette kommer frem av intervjuene, kunne ha avdekket større påkjenninger.

Med 2,5m sentersporavstand, tjener ofte kanaler som støttevegger for ballastprofilen. Studier av utenlandsk litteratur viser gode eksempler på plassering av kanaler med større avstand enn 2,5m. Plasseringer fra Tyskland og Polen viser smarte måter å sikre at kanaler ikke lander i ballastprofilen, uavhengig av sporets overhøyde. Større avstand fra spormidt gir mulighet for lavere plasseringer av kanaler i forhold til formasjonsplanet og potensielle besparelser i masser. Alternative måter for drenering rundt kanaler kan benyttes. Imidlertid skal en huske på at opphavet til kravene fra utlandet ikke er godt kjent, og at løsningene ikke nødvendigvis er godt egnet i Norge. Terrengets topografi kan i stor grad avgjøre hvilke løsninger som er best egnet hvor. Det kan være krevende og kostbart å utvide eksisterende formasjonsplan på høye og smale fyllinger. I norske forhold er dette spesielt aktuelt på eksisterende banestrekninger. For nye baner derimot, virker dette ikke som et utenkelig alternativ.

Det er i denne oppgaven også funnet ut at alternative forlegningsmetoder for kabelkanaler benyttes oftere og oftere. Spesielt løsninger med betongkanaler på pæler har vist seg å være godt egnet. Løsninger med plastkanaler og komposittmaterialer er mindre populære, men anvendes i områder hvor det er trangt eller under midlertidige anlegg. Disse løsningene vil neppe erstatte konvensjonell legging av betongkanaler direkte på formasjonsplanet, som fortsatt er den mest foretrukne metoden i Norge.

6 Konklusjon, anbefaling og videre arbeid

Kabelkanaler på et pukkfundament med oppfyllinger rundt har vært en tradisjonell forlegningsmetode i Norge. Plassering av kabelkanaler 2,5m fra senterspor med denne metoden kan ha negative konsekvenser for ballastens kvalitet og levetid. Metoden påvirker også prosjektering, bygging og vedlikehold av over- og underbygningen.

Resultatene av denne oppgaven har vist at for kanaler med lik referanse høyde på begge sider av sporet, er plassering av kanaler i høyde med SOK det mest lønnsomme og fordelaktige alternativet. Denne plasseringen gir lavest investeringskostnad, lavest andel av materialer med fraksjon mindre enn 22,4mm innenfor ballastprofilet, samt smalest planeringsbredde. Plasseringen anses også å være mest gunstig med tanke på prosjektering, på grunn av fast avstand over formasjonsplanet. Resultatene viser også at dersom kanalene plasseres med ulik referanse høyde på begge sider av sporet, vil plasseringen av kanaler i høyde med topp av nærmeste sville være mest hensiktsmessig i innerkurver. For kanaler liggende i yttersving vil plassering av kanalen i høyde med SOK være det foretrukne alternativet. De samme resultatene vil være gjeldende for kanaler plassert kun på én side av sporet. Det anbefales at disse referanse høydene legges til grunn i TRV for spor i dagen.

Det er gjennom denne oppgaven funnet ut at oppfylling på utsiden av kabelkanaler ikke er nødvendig. Det anbefales ytterlige simuleringer av påkjenning fra andre maskinelle arbeider i sporet, f.eks. snøbrøyting, sporpakking og ballastprofilering for å kunne bekrefte dette. Det anbefales også verifisering av funn for ballastrensingen i denne oppgaven, ved å utføre flere simuleringer med ulike innstillinger.

Basert på definisjonen av forurenset ballast, anbefales det at teknisk regelverk spesifiseres med krav om ikke bruk av materialer andre enn ballastpukk med nominell fraksjon i oppfyllingen mellom ballastlaget og kabelkanaler.

Til slutt anbefales det en vurdering av muligheter for å flytte kabelkanaler lenger bort fra sporet med en utredning av konsekvenser knyttet til det. Plassering av kanaler i forhold til KL-master bør utredes spesielt. Modeller brukt i andre land i Europa, for eksempel Tyskland eller Polen, kan vurderes nærmere som mulig inspirasjon.

Referanser

Aarhaug, O. R. (1992) *Geoteknikk*. Trondheim.

Back, A. (2021) Lavspenningsanlegg i jernbanen. Forelesning.

Bane NOR (2016) *Teknisk regelver. Definisjon: Elektromagnetisk kompatibilitet (sameksistens)*. Tilgjengelig fra: [https://trv.banenor.no/wiki/Definisjon:Elektromagnetisk_kompatibilitet_\(sameksistens\)](https://trv.banenor.no/wiki/Definisjon:Elektromagnetisk_kompatibilitet_(sameksistens)) (Hentet: 03.09.2022).

Bane NOR (2019a) *Jernbanen i tall*. Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/Om-oss/Jernbanen-i-tall/> (Hentet: 28.08.2022).

Bane NOR (2019b) *Bilag 1. Tekniske prinsipper ved innføring av ERTMS*.

Bane NOR (2019c) Teknisk designbasis for InterCity. *Linjen*.

Bane NOR (2020a) *Veileder. Utforming av driftsbanegårder*. Tilgjengelig fra: https://proing.banenor.no/wiki/_media/fag/felles/iup-00-a-00977_05a_003.pdf.

Bane NOR (2020b) *Nasjonal signalplan*. Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/contentassets/950951c96924496996fce1b06d7f10d9/nasjonal-signalplan-2020.pdf> (Hentet: 01.09.2022).

Bane NOR (2022a) *Teknisk regelverk. Plassering og legging av kabelkanal*. Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Profiler_og_minste_tvverrsnitt#Plassering_og_legging_av_kabelkanal (Hentet: 18.09.2022).

Bane NOR (2022b) *Teknisk regelverk. Gyldighet*. Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Felles_bestemmelser/Generelle_bestemmelser#Gyldighet (Hentet: 15.09.2022).

Bane NOR (2022c) *Ny togradio i sikte for norsk jernbane*. Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/jernbaneforetak/nyhetsbrev/ny-togradio-i-sikte-for-norsk-jernbane/> (Hentet: 26.08.2022).

Bane NOR (2022d) *Teknisk regelverk. Kabellegging og kabelkanaler*. Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Felles_elektro/Prosjektering_og_bygging/Kabellegging_og_kabelkanaler (Hentet: 15.10.2022).

Bane NOR (2022e) *Teknisk regelverk. Profiler og minste tvverrsnitt - normalprofil for daglinje*. Tilgjengelig fra:

https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Profiler_og_minste_tvverrsnitt#Normalprofil_for_daglinje (Hentet: 10.11.2022).

Bane NOR (2023a) *Teknisk regelverk. Stabilitet*. Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Stabilitet (Hentet: 10.01.2023).

Bane NOR (2023b) *Teknisk regelverk. Underbygning. Generelle tekniske krav*. Tilgjengelig fra: https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Generelle_tekniske_kvav (Hentet: 21.01.2023).

Banedanmark (2016) Banenorm BN1-6-6. Tverrprofiler for ballasteret spor.

Banedanmark (2020) Banenorm BN1-13-3. Ledningsanlæg på Banedanmarks arealer.

Bygg.no (2019) *Banebrytende teleprosjekt til 380 millioner skal gi Follobane-passasjerene netthastighet i verdensklasse*. Tilgjengelig fra: <https://www.bygg.no/banebrytende-teleprosjekt-til-380-millioner-skal-gi-follobane-passasjerene-netthastighet-i-verdensklasse/1400094!/> (Hentet: 26.08.2022).

Det Kongelige Samferdselsdepartement (2021) *Nasjonal transportplan 2022-2033*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/fab417af0b8e4b5694591450f7dc6969/no/pdfs/stm202020210020000dddpdfs.pdf> (Hentet: 28.08.2022).

Deutsche Bahn (2023) *DB Netze Track*. Tilgjengelig fra: https://www.deutschebahn.com/en/group/business_units/DB_Netze_Track-6929422 (Hentet: 24.02.2023).

Esveld, C. (2015) *Modern Railway Track*. Version 3.8. MRT-Productions.

Government of India, M. o. R. (2019) *Indian Railways Track Machine Manual*. Tilgjengelig fra: https://www.ircen.gov.in/ircen/Track_Manuals/IRTMM.pdf.

Grulkowski, S. *et al.* (2013) *Drogi szynowe*. Gdańsk.

Jernbane.net (u.å.) *Om sidenes oppbygging*. Tilgjengelig fra: <https://jernbane.net/bo/subpage.php?s=3&t=16120> (Hentet: 28.08.2022).

Jernbaneverket (2012) *Slik fungerer jernbanen*. Tilgjengelig fra: https://www.banenor.no/contentassets/55a947e1337748beaee3839e8f34f806/slikfungererjernbanen_2012_web_oppsl.pdf (Hentet: 25.08.2022).

Jernbaneverket (2014) *Ballast. Lærebok i jernbaneteknikk*.

Jernbaneverket (2018) *Strømforsyning av lavspenning. Lærebok i jernbaneteknikk. Jernbanekompetanse.no*. Tilgjengelig fra:

https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Str%C3%B8mforsyning_av_lavspentanlegg (Hentet: 25.08.2022).

Li, D. *et al.* (2016) *Railway Geotechnics*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Løhren, A. H. (2011a) *Sporbygging og ballastrensing*. Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU.

Løhren, A. H. (2011b) *Railway superstructure*.

Ministerstwo Transportu i Gospodarki Morskiej. (1988) Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987.

Nåslund, R. (2021) Jernbaneballast 31,5-63,0 mm. Del 1 og del 2. Forelesning.

Nåslund, R. (u.å.) Utdrag av kapittel 1 og 7 Ballasthåndboka *Ballasthåndboka*.

Skjæveland (u.å.) *Kabelkanaler, Skjæveland*. Tilgjengelig fra: <https://www.skjæveland.no/skjæveland/7-kanaler-og-trekkekummer/kabelkanaler/kabelkanaler-skjæveland> (Hentet: 10.09.2022 2022).

Standard Norge (2009) NS-EN 13450:2002+NA:2009. Tilslag for jernbaneballast. (Hentet: 21.11.2022).

Standard Norge (2016) NS-EN 1990:2002+A1+AC+NA. Eurokode - Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner. (Eurokode 0) *Nasjonalt tillegg NA*. (Hentet: 25.01.2023).

Standard Norge (2019) NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2019. Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. (Hentet: 25.01.2023).

Statens vegvesen (2014) Håndbok V221 - Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger.

Statens vegvesen (2022) Håndbok V220 - Geoteknik i veibygging.

Trafikverket (2022) *Standarddokumentation*. Tilgjengelig fra: <https://pwpublik.trafikverket.se/PwBrowser/Workspace/Index>.

Wikander, J. A. (2000-2010) *Jernbanens elektrotekniske anlegg*. Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU.

Wiłun, Z. (2019) *Zarys geotechniki*. 11. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności sp. z o.o.

Planeringsbredder. Kanal i høyde med topp av nærmeste sville.

1:50 (A1)

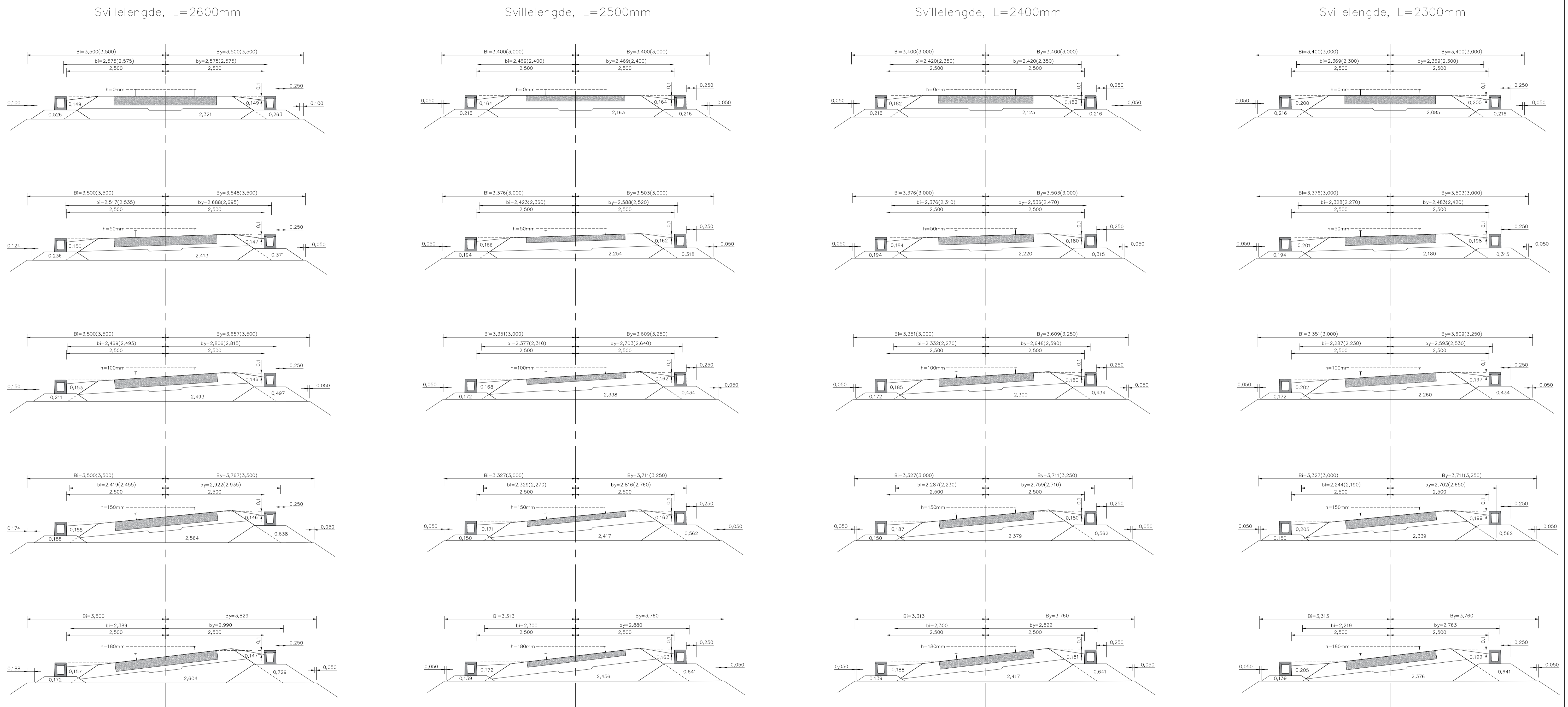
Ballasthøyde – 750mm for 2600mm lang sville, ellers 700mm.

Ballastkant – og fundamentskråning – 1:1,5.

Skinnehøyde – 172mm for 2600mm lang sville, ellers 154mm.

Enkeltspor med 1-løps kanal (32cm). Tall i parentes angir TRVs krav til planeringsbredder.

Vedlegg 1
Side a



A1 – areal av oppfyllinger

A2 – areal av fundamenter

A3 – areal av ballastpukk, inkl.sville

Atot – totalt areal

Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)	Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)	Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)	Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)
0mm	0,297	0,526	2,321	3,144	0mm	0,328	0,432	2,163	2,923	0mm	0,364	0,432	2,125	2,921	0mm	0,400	0,432	2,085	2,917
50mm	0,297	0,607	2,413	3,317	50mm	0,328	0,512	2,254	3,094	50mm	0,364	0,509	2,220	3,093	50mm	0,399	0,509	2,180	3,088
100mm	0,299	0,708	2,493	3,500	100mm	0,330	0,606	2,338	3,274	100mm	0,365	0,606	2,300	3,271	100mm	0,399	0,606	2,260	3,265
150mm	0,301	0,826	2,564	3,691	150mm	0,333	0,712	2,417	3,462	150mm	0,367	0,712	2,379	3,458	150mm	0,404	0,712	2,339	3,455
180mm	0,304	0,901	2,604	3,809	180mm	0,335	0,780	2,456	3,571	180mm	0,369	0,780	2,417	3,566	180mm	0,404	0,780	2,376	3,560

Planeringsbredder. Kanal i høyde med topp av sville i spormidtd.

1:50 (A1)

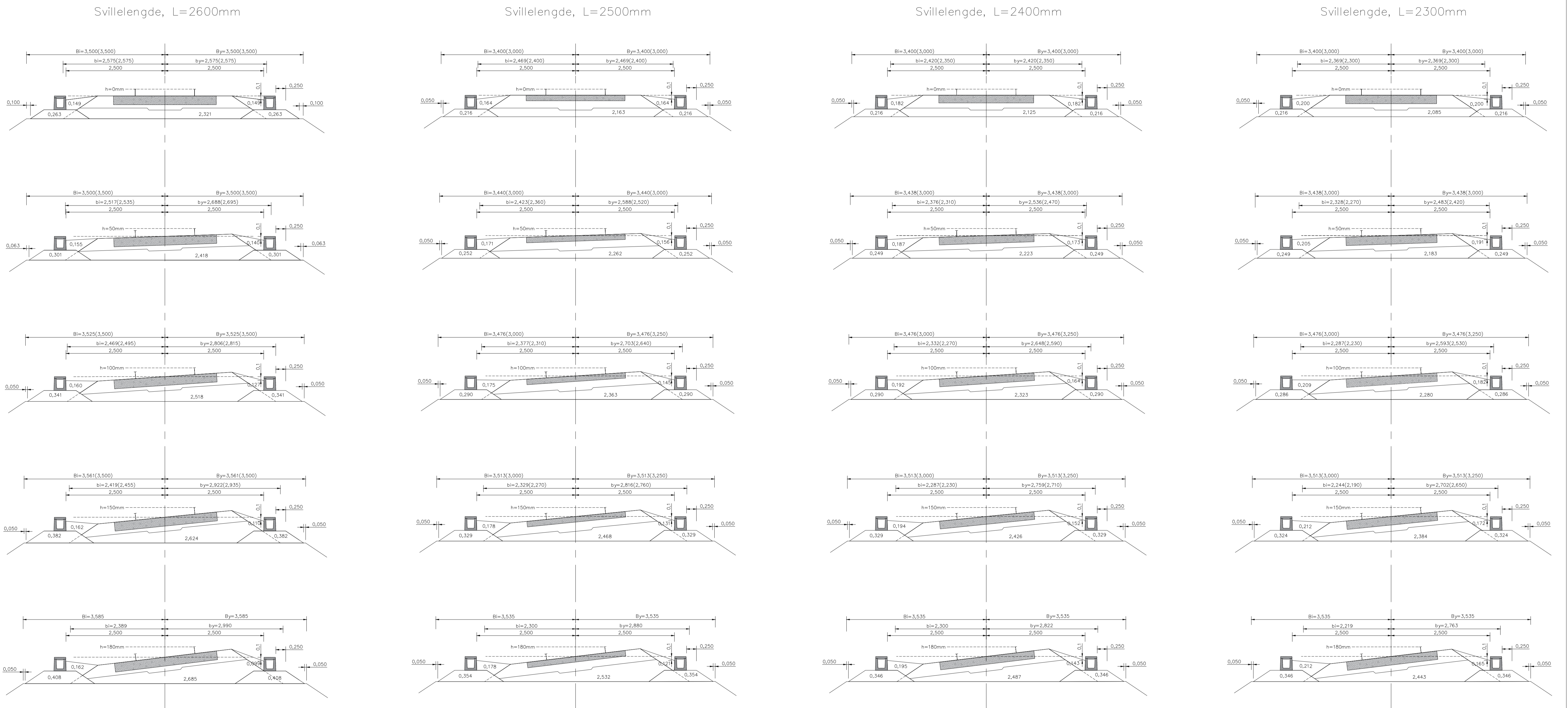
Ballasthøyde – 750mm for 2600mm lang sville, ellers 700mm.

Ballastkant – og fundamentskråning – 1:1,5.

Skinnehøyde – 172mm for 2600mm lang sville, ellers 154mm.

Enkeltspor med 1-løps kanal (32cm). Tall i parentes angir TRVs krav til planeringsbredder.

Vedlegg 1
Side b



A1 – areal av oppfyllinger

A2 – areal av fundamenter

A3 – areal av ballastpukk, inkl.svile

Atot – totalt areal

Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)	Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)	Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)	Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)
0mm	0,297	0,526	2,321	3,144	0mm	0,328	0,432	2,163	2,923	0mm	0,364	0,432	2,125	2,921	0mm	0,400	0,432	2,085	2,917
50mm	0,295	0,602	2,418	3,315	50mm	0,327	0,504	2,262	3,093	50mm	0,360	0,498	2,223	3,081	50mm	0,396	0,498	2,183	3,077
100mm	0,287	0,682	2,518	3,487	100mm	0,320	0,580	2,363	3,263	100mm	0,356	0,580	2,323	3,259	100mm	0,391	0,572	2,280	3,243
150mm	0,272	0,764	2,624	3,660	150mm	0,309	0,658	2,468	3,435	150mm	0,346	0,658	2,426	3,430	150mm	0,384	0,648	2,384	3,416
180mm	0,261	0,816	2,685	3,762	180mm	0,299	0,708	2,532	3,539	180mm	0,338	0,692	2,487	3,517	180mm	0,377	0,692	2,443	3,512

Planeringsbredder. Kanal i høyde med topp av sville under SOK.

1:50 (A1)

Ballasthøyde – 750mm for 2600mm lang sville, ellers 700mm.

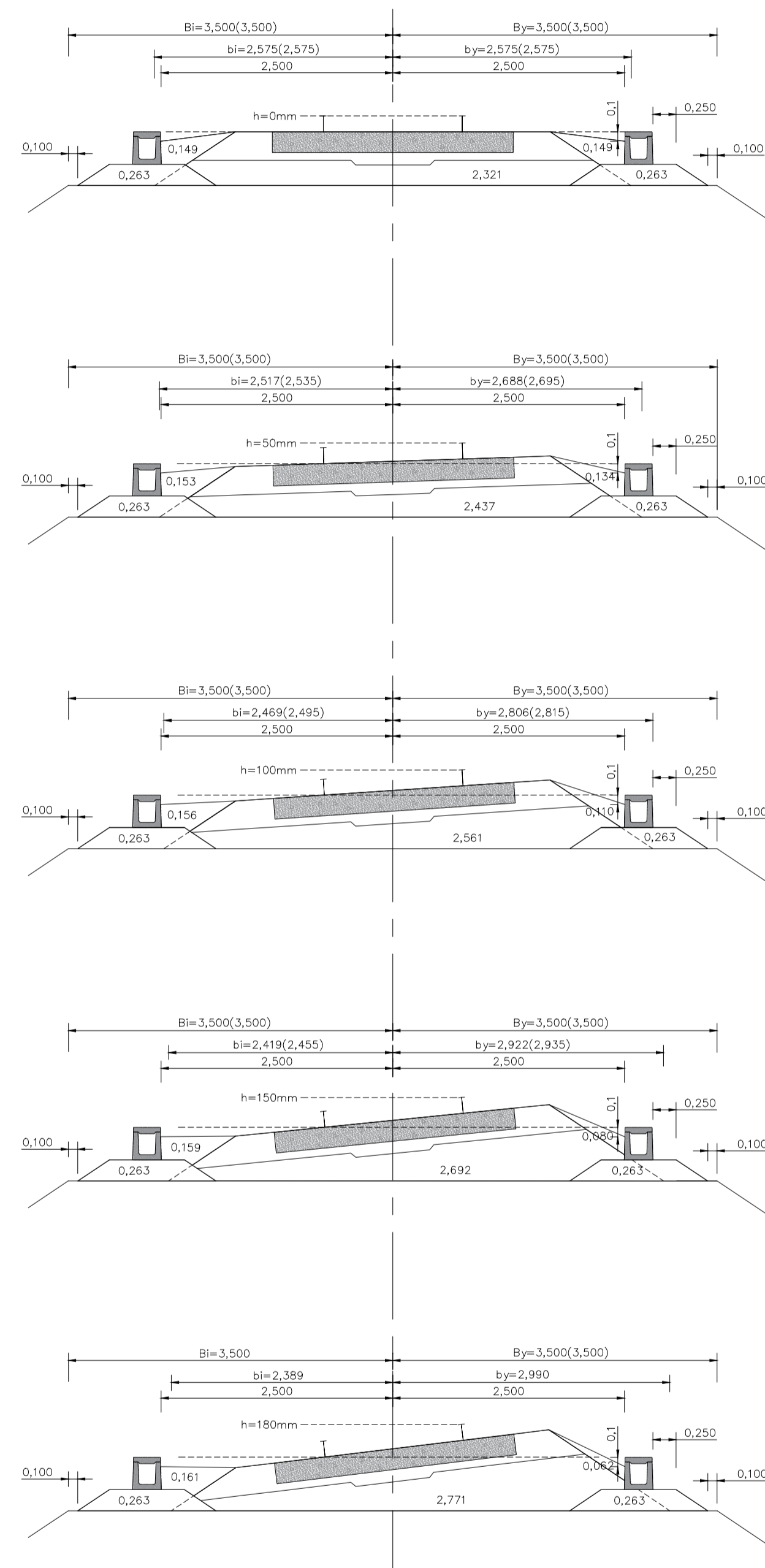
Ballastkant – og fundamentskråning – 1:1,5.

Skinnehøyde – 172mm for 2600mm lang sville, ellers 154mm.

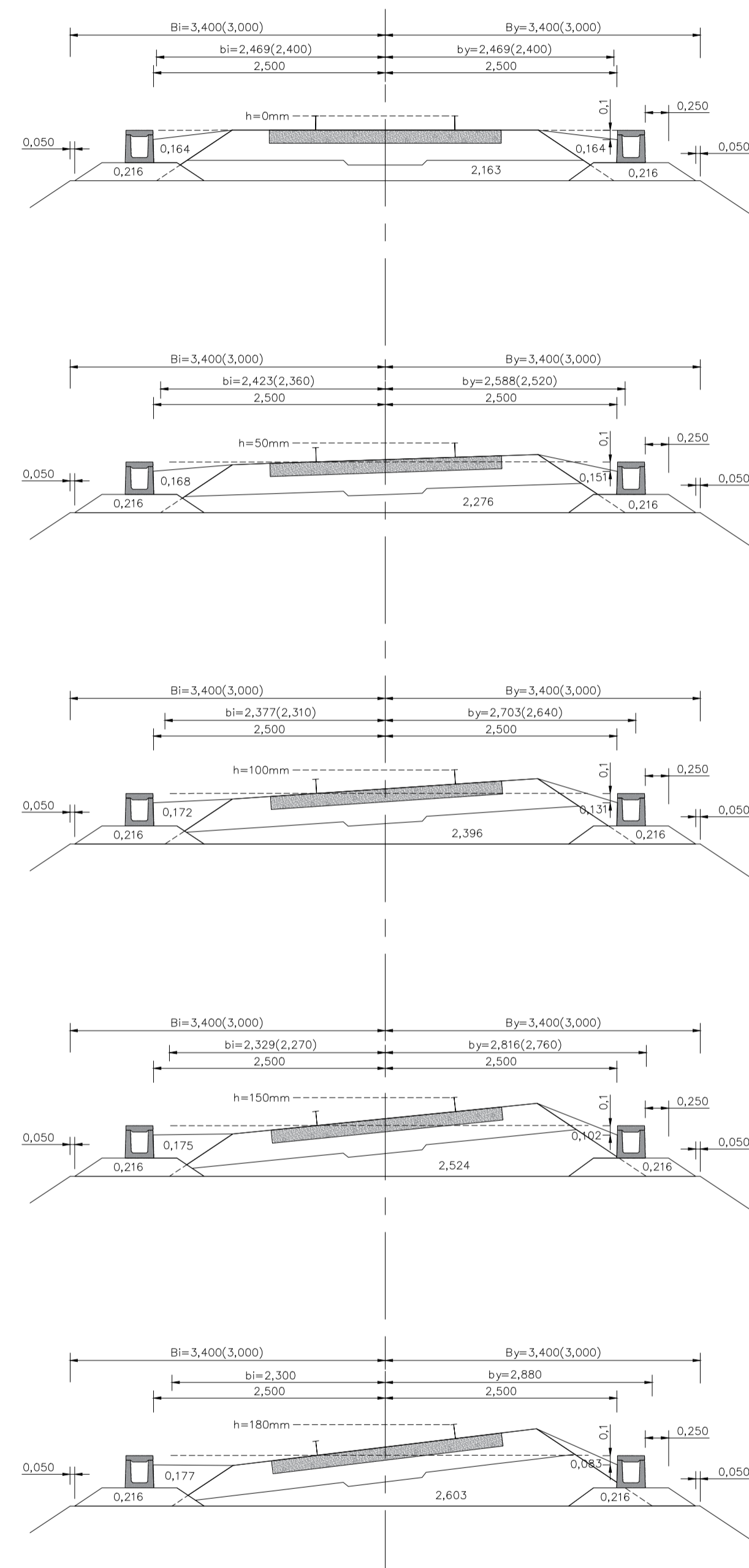
Enkeltspor med 1-løps kanal (32cm). Tall i parentes angir TRVs krav til planeringsbredder.

Vedlegg 1
Side c

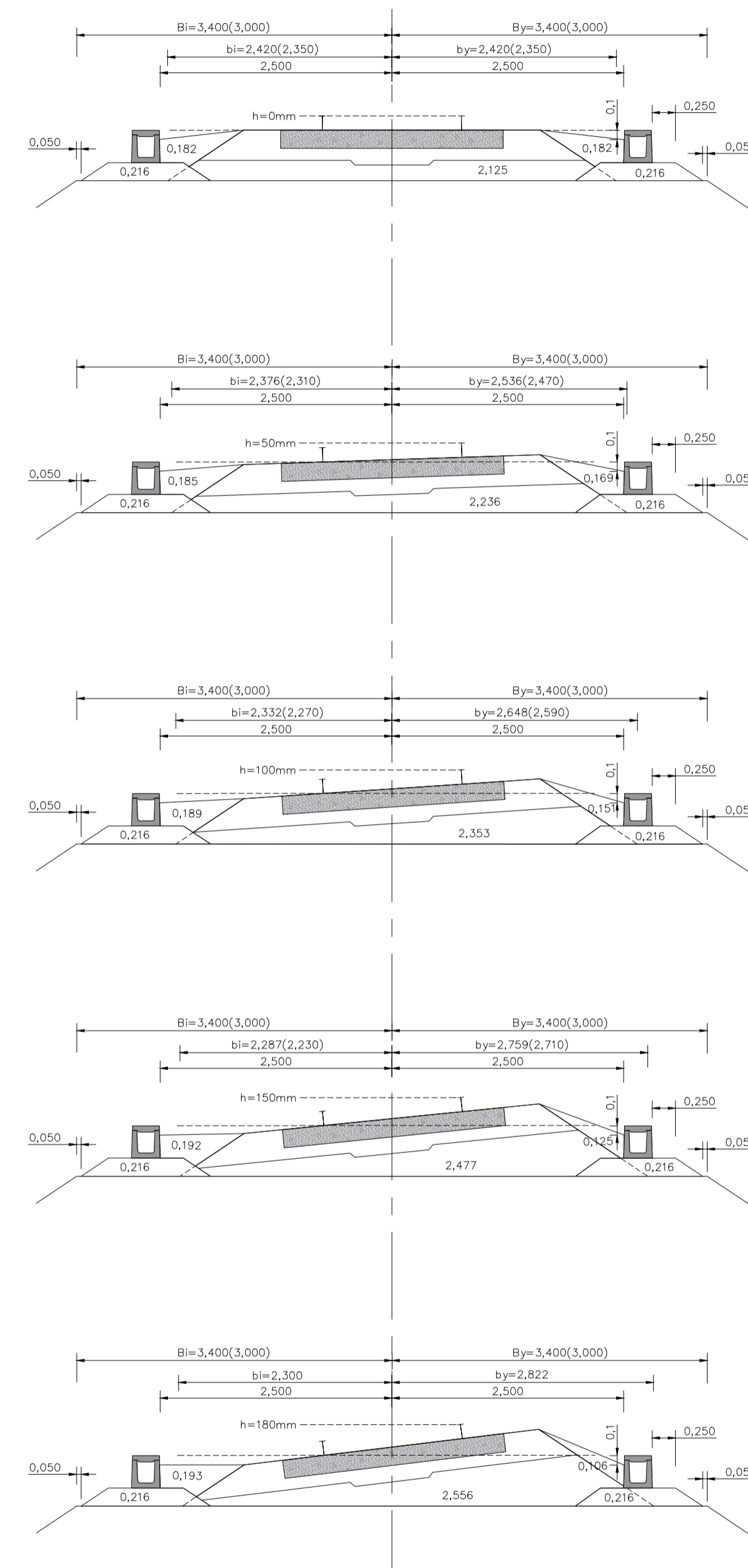
Svillelengde, L=2600mm



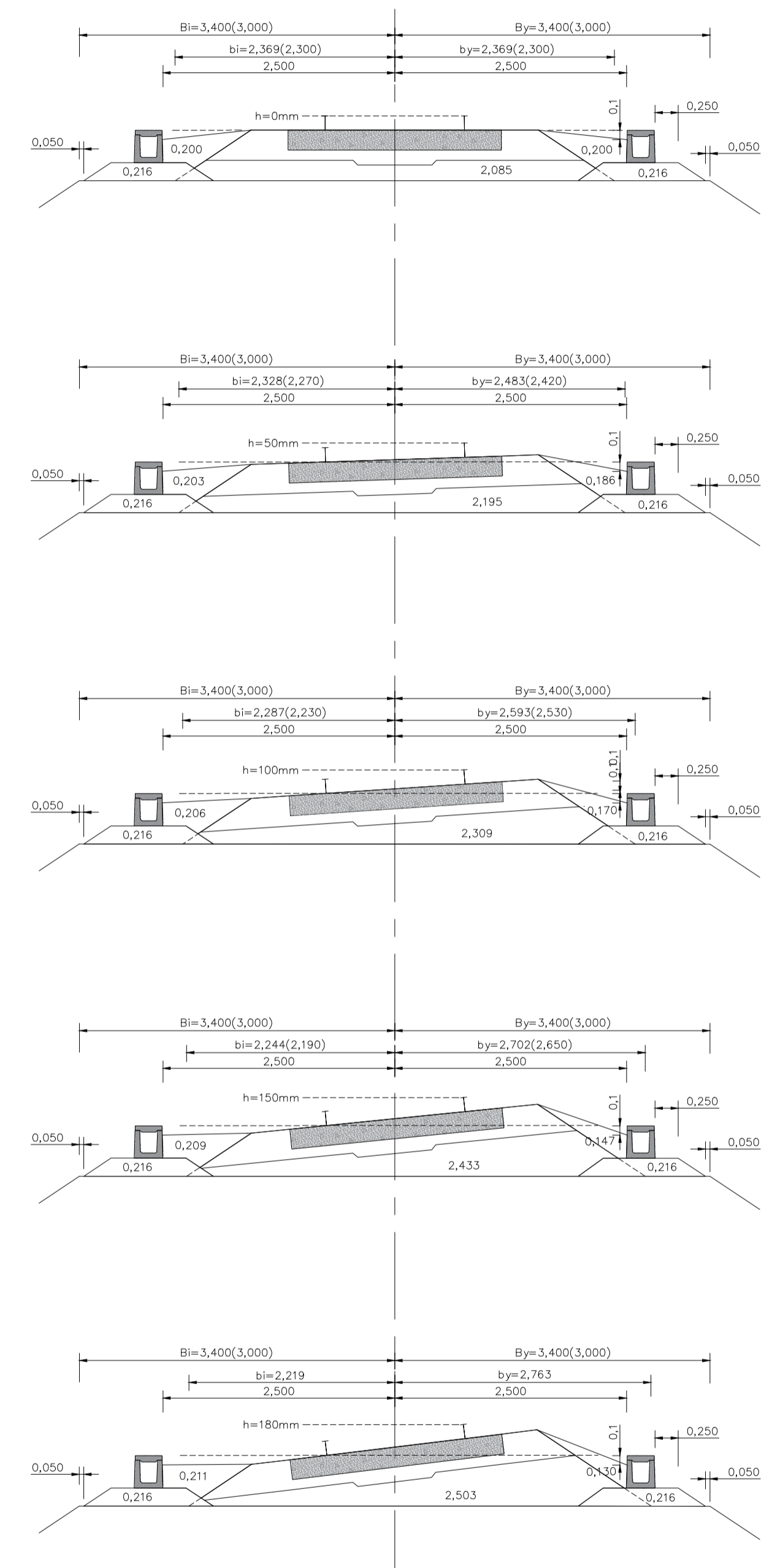
Svillelengde, L=2500mm



Svillelengde, L=2400mm



Svillelengde, L=2300mm



A1 – areal av oppfyllinger

A2 – areal av fundamenter

A3 – areal av ballastpukk, inkl.svill

Atot – totalt areal

Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)	Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)	Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)	Overhøyde	A1(m2)	A2(m2)	A3(m2)	Atot(m2)
0mm	0,297	0,526	2,321	3,144	0mm	0,328	0,432	2,163	2,923	0mm	0,364	0,432	2,125	2,921	0mm	0,400	0,432	2,085	2,917
50mm	0,287	0,526	2,437	3,250	50mm	0,319	0,432	2,276	3,027	50mm	0,354	0,432	2,236	3,022	50mm	0,389	0,432	2,195	3,016
100mm	0,266	0,526	2,561	3,353	100mm	0,303	0,432	2,396	3,131	100mm	0,340	0,432	2,353	3,125	100mm	0,376	0,432	2,309	3,117
150mm	0,239	0,526	2,692	3,457	150mm	0,277	0,432	2,524	3,233	150mm	0,317	0,432	2,477	3,226	150mm	0,356	0,432	2,433	3,221
180mm	0,223	0,526	2,771	3,520	180mm	0,260	0,432	2,603	3,295	180mm	0,299	0,432	2,556	3,287	180mm	0,341	0,432	2,503	3,276

UPPLYSNINGAR

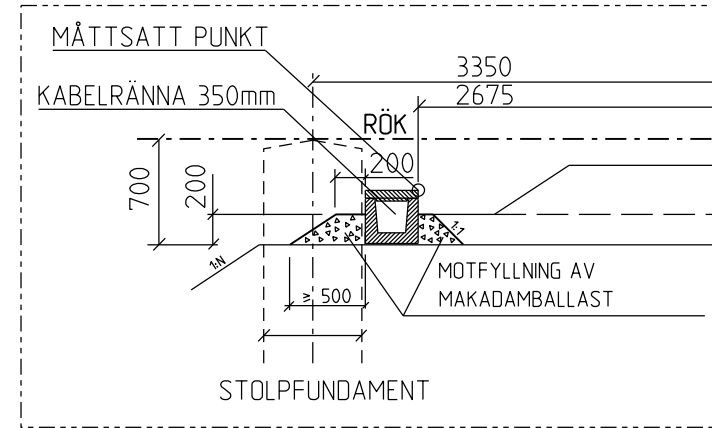
ALLA MÅTT I mm
RÖK = RÄLS ÖVERKANT

ANMÄRKNINGAR

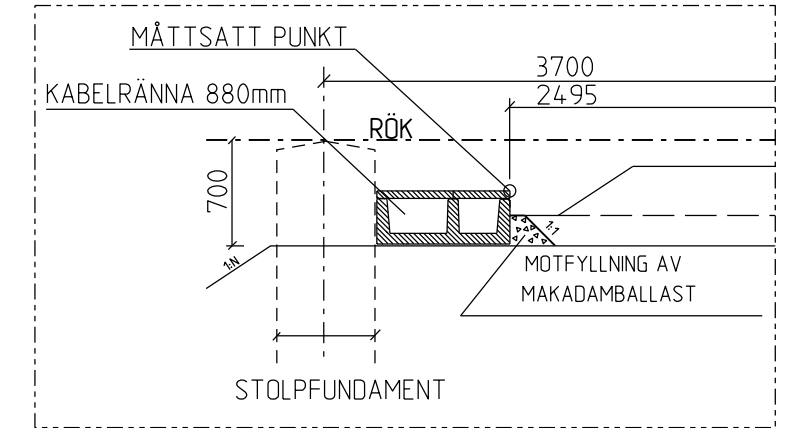
OM INTE ANNAT ANGES SKA SLÄNTLUTNING 1:N VARA 1:2

HÄNVISNINGAR

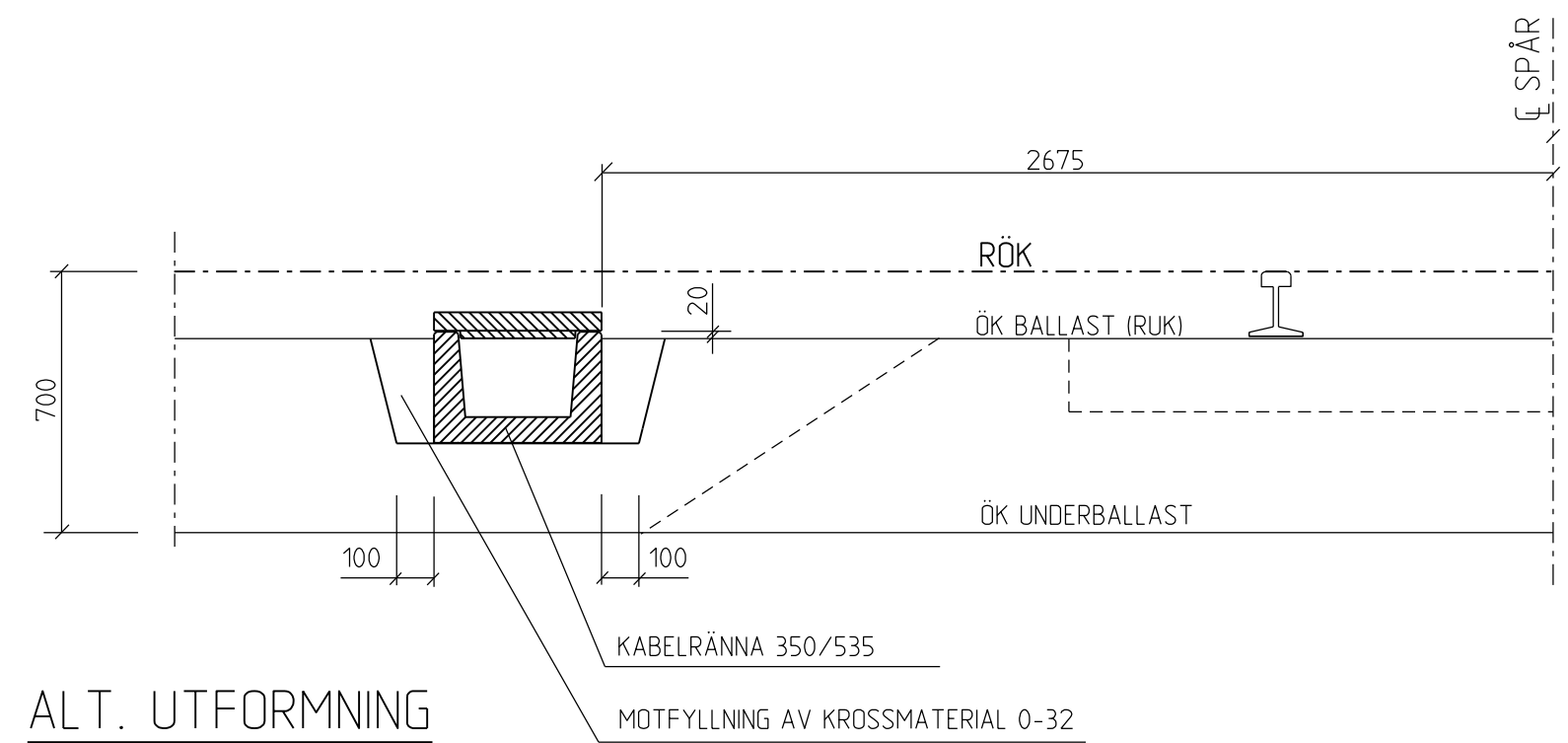
$h = \frac{ha(1,65+0,75)}{1,5}$ dock max 160mm förhöjning av kabelränna
ha = anordnad rälsförhöjning



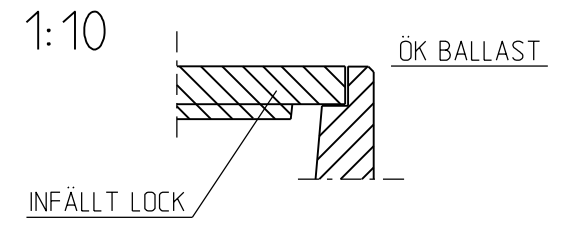
KABELRÄNNA 350mm
1:50



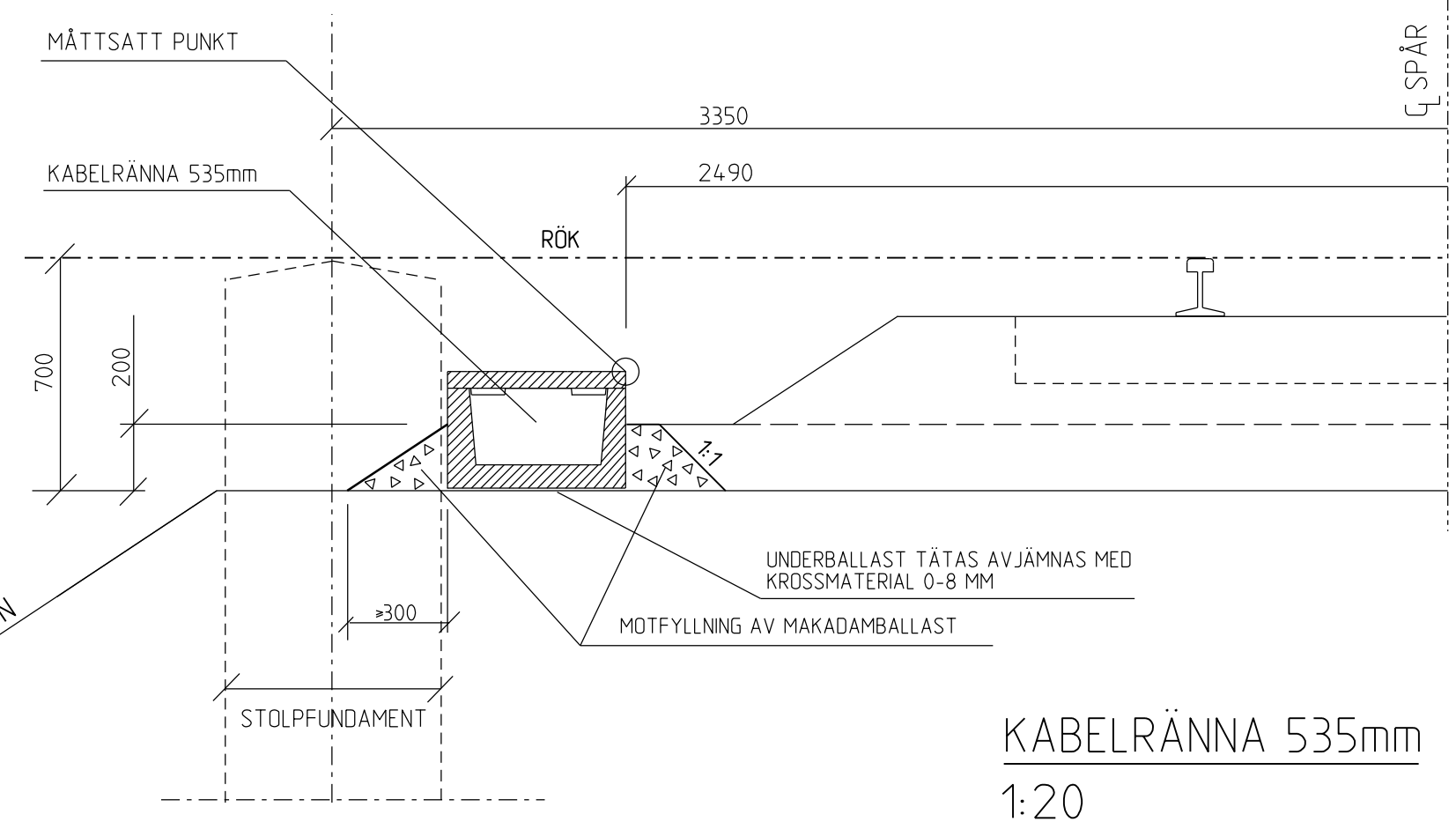
KABELRÄNNA 880mm
1:50



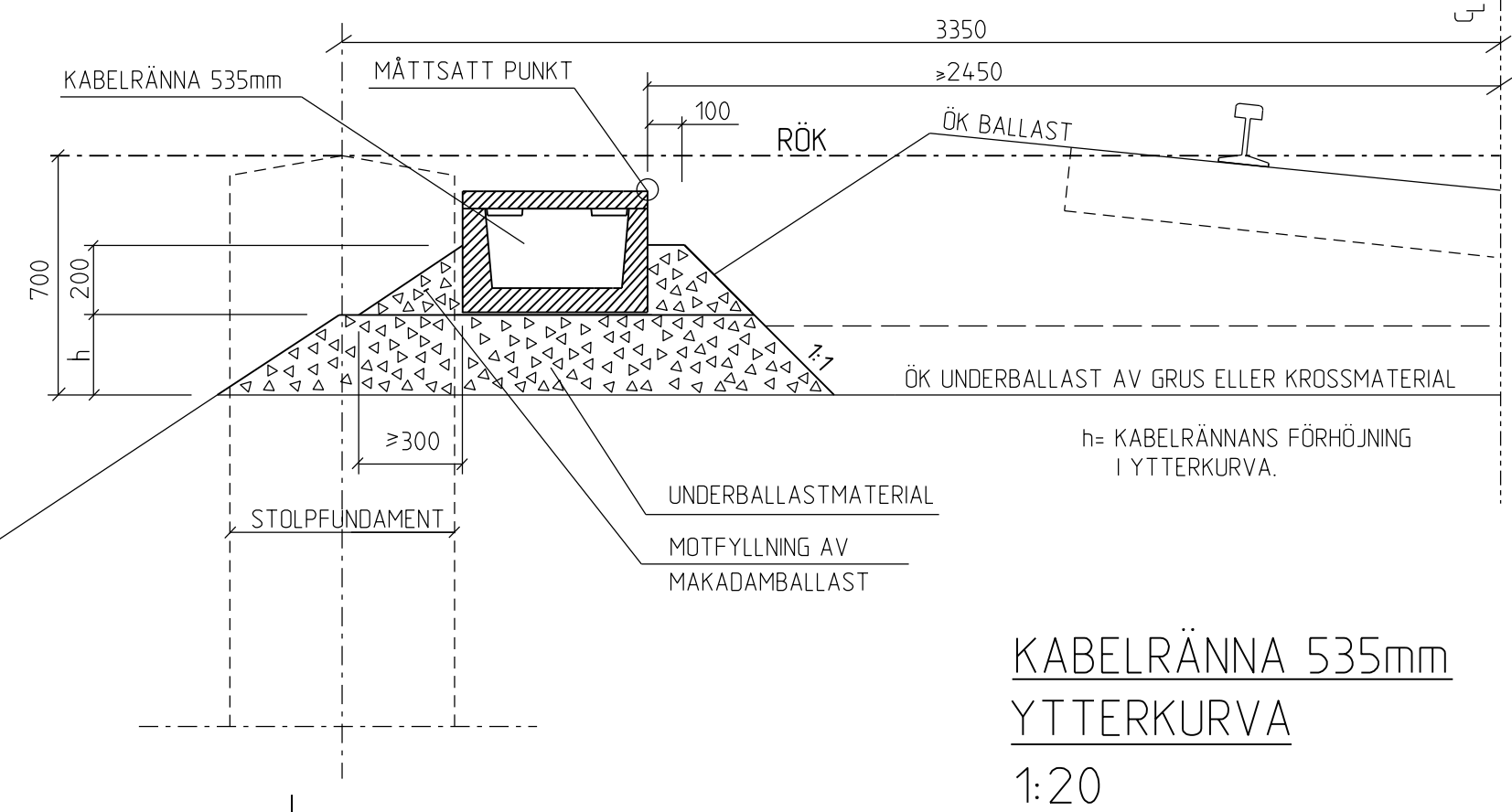
ALT. UTFORMNING



BANGÅRDSSEKTION
1:20



KABELRÄNNA 535mm
1:20



KABELRÄNNA 535mm
YTTERKURVA
1:20

MÅTTABELL		
KABELRÄNNA	MÅTTSATT PUNGT FRÅN SPM	MÅTT KTL-FUNDAMENT
350	2675	3350
535	2490	3350
880	2495	3700

C	BÄDD FÖR KABELRÄNNA, MÅTTABELL, MOTFYLLNING	2018-11-30	SWECO	TRV / BÅ
B	ALLMÄN ÖVERSYN	2010-12-15	VECTURA	TRV / BÅ
A	ALLMÄN	060217	APB / lb	APB / bm
REV	REVIDERINGEN AVSER	DATUM	KONSTRUERAD AV	GRANSKAD AV
		SKEDJE STANDARDRITNING TEKNIKOMRÅDE KANALISATION KM		
		RITNINGSNR PROJEKT		SKALA 1:20, 1:50 BANDEL
KONSTRUERAD AV APS	GRANSKAD AV BRÖBB	FASTSTÄLLD AV CBJ	DATUM 991108	FORMAT A3FF
RITNINGSNR FÖRVALTNING 7-801 611		BLAD	NÄSTA BL	REV C

Denna ritning är Trafikverkets egendom. Allt obehörigt begagnande av ritningen beivras enligt lag.
 TRAFIKVERKET

INTERVJUGUIDE MASTEROPPGAVE

PLASSERING AV KABELKANALER LANGS JERNBANESPOR

BAKGRUNN FOR VALGT TEMA

- Etter min mening, gir Bane NORs tekniske regelverk (TRV) rom for ulik tolkning av noen krav for legging av kabelkanaler langs spor. Disse kravene er markert i bildet nedenfor.
- Utklipp fra TRV:00771 (10.02.2022)

«

Kabelkanalen skal plasseres iht. krav gitt i Felles_elektro/Prosjektering_og_bygging/
Kabellegging_og_kabelkanaler#Kabelfritt_profil.

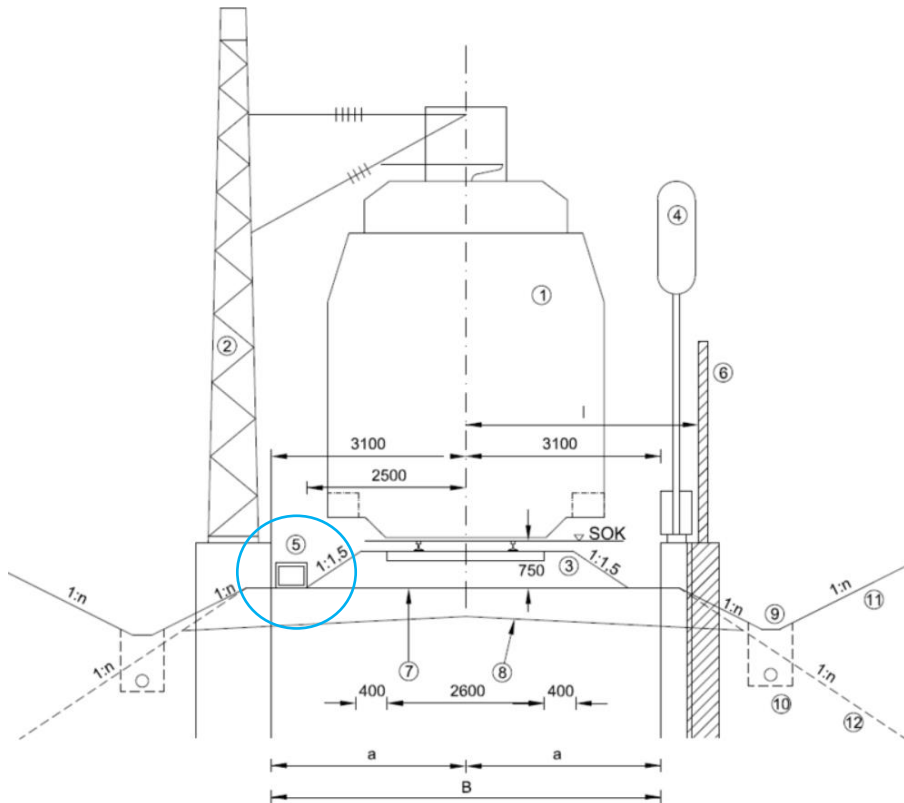
1. Utførelse: Kabelkanalen skal normalt monteres på formasjonsplanet.
2. Utførelse: Når kabelkanalen legges på formasjonsplanet skal den legges oppå formasjonsplanet på et fundament av pukk innenfor fraksjonen 8-20 mm.
3. Utførelse: Fundamentet for kabelkanalen kan legges oppå formasjonsplanet
4. Utførelse: Kabelkanalen bør plasseres innenfor mastefundamenter. Dette medfører at mastefundamenter bør plasseres i tilstrekkelig avstand fra spormidt, slik at framtidige plassbehov for kabelkanal ivaretas.
5. Utførelse: Kabelkanalen skal ha tilstrekkelig støtte på begge sider slik at den ikke forskyver seg ved f.eks. arbeider i ballastlaget. Oppfylling av pukk skal ikke fylles høyere opp enn 50 mm under lokk kabelkanal.
6. Utførelse: Kabelkanalen skal legges slik at setninger i underlaget ikke medfører vertikale forskyvninger mellom elementer.

»

BAKGRUNN FOR VALGT TEMA

1. Utførelse: Kabelkanalen skal normalt monteres på formasjonsplanet.
2. Utførelse: Når kabelkanalen legges på formasjonsplanet skal den legges oppå formasjonsplanet på et fundament av pukk innenfor fraksjonen 8-20 mm.
3. Utførelse: Fundamentet for kabelkanalen kan legges oppå formasjonsplanet

- Hvis man tar for seg de 3 første punktene, hva blir den riktige plasseringen av kabelkanalen?

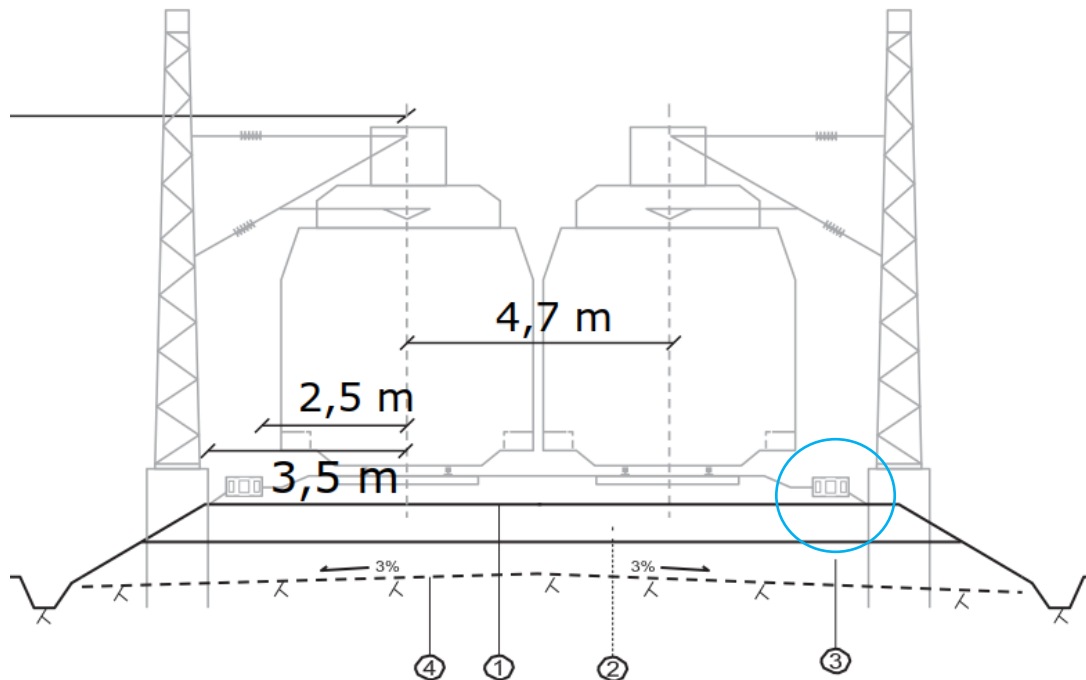


- Standard normalprofil i TRV viser ingen fundament under kabelkanalen.
- Dette gjelder enkelt- og dobbeltspor.

BAKGRUNN FOR VALGT TEMA

1. Utførelse: Kabelkanalen skal normalt monteres på formasjonsplanet.
2. Utførelse: Når kabelkanalen legges på formasjonsplanet skal den legges oppå formasjonsplanet på et fundament av pukk innenfor fraksjonen 8-20 mm.
3. Utførelse: Fundamentet for kabelkanalen kan legges oppå formasjonsplanet

- Hvis man tar for seg de 3 første punktene, hva blir den riktige plasseringen av kabelkanalen?

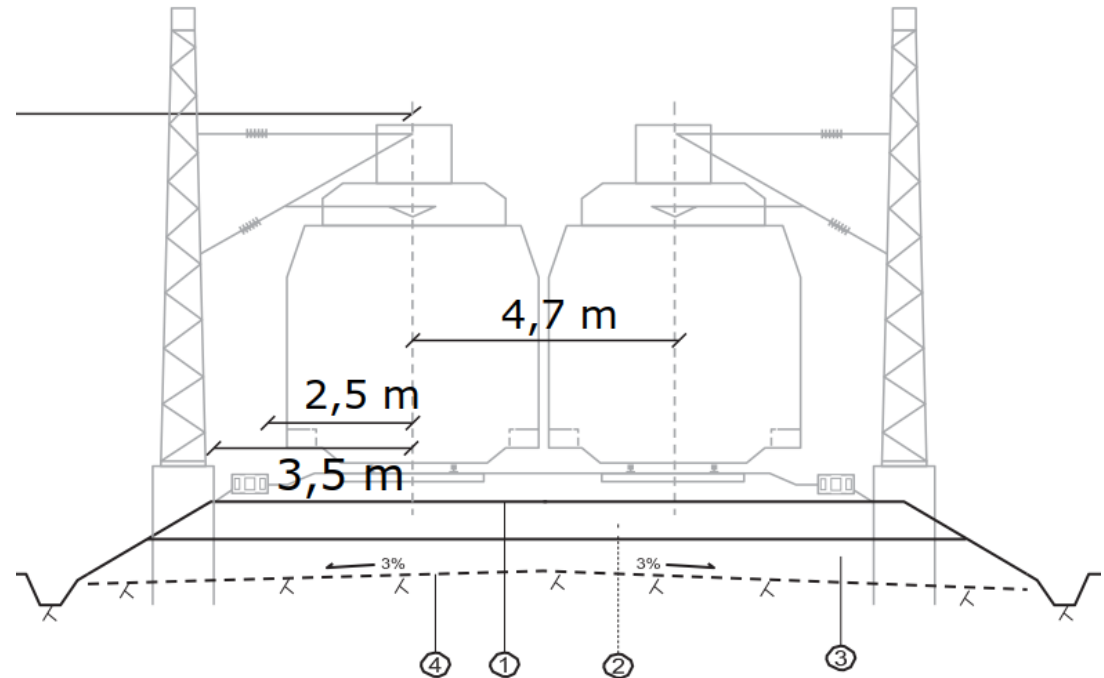
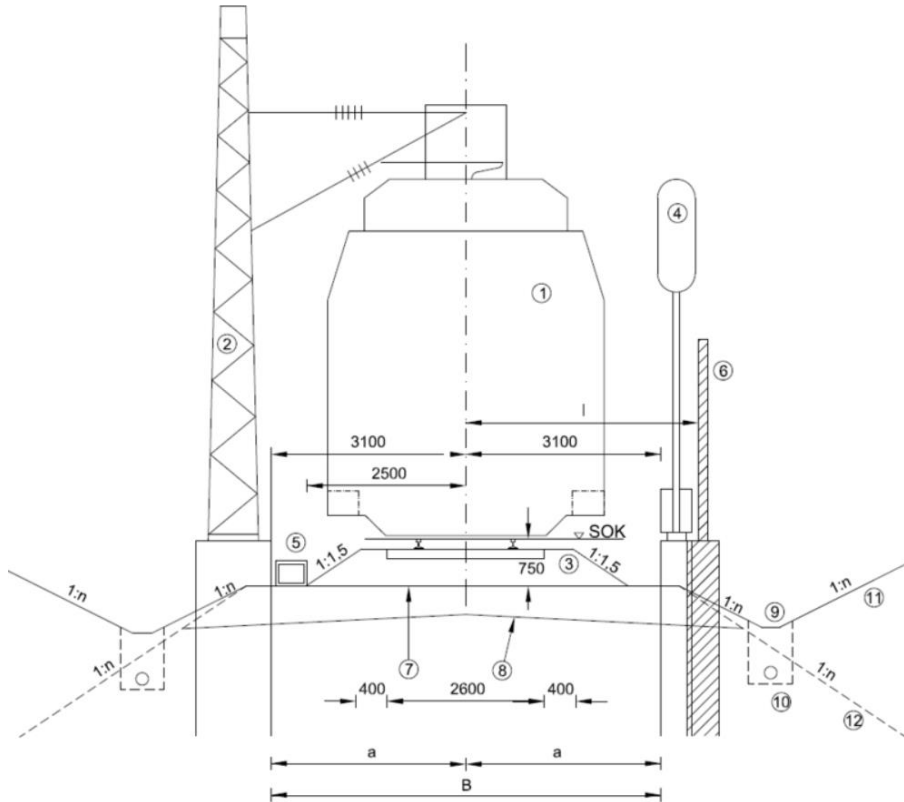


- Teknisk desinbasis for InterCity viser noe fundament, men hva er dimensjoner på fundamentet?

BAKGRUNN FOR VALGT TEMA

5. Utførelse: Kabelkanalen skal ha tilstrekkelig støtte på ø begge sider slik at den ikke forskyver seg ved f.eks. arbeider i ballastlaget. Oppfylling av pukkk skal ikke fylles høyere opp enn 50 mm under lokk kabelkanal.

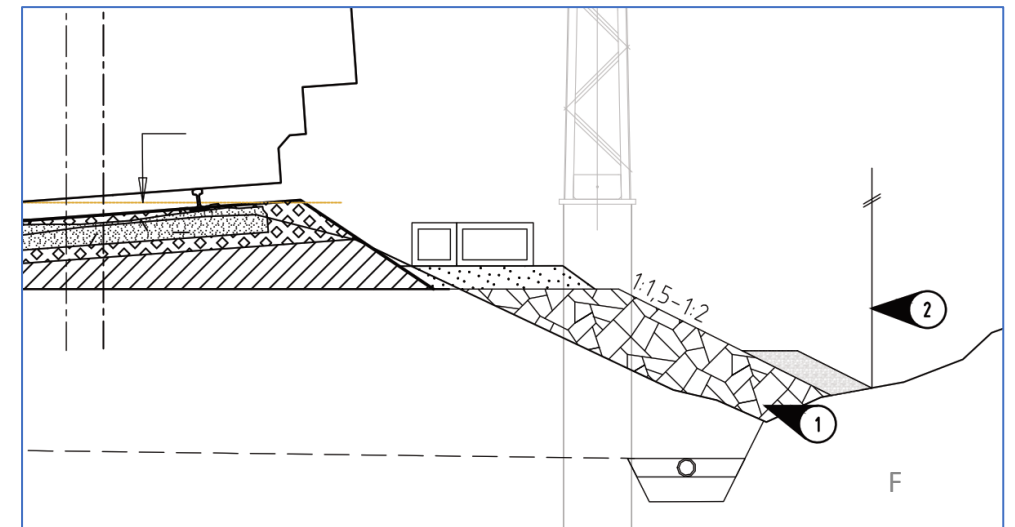
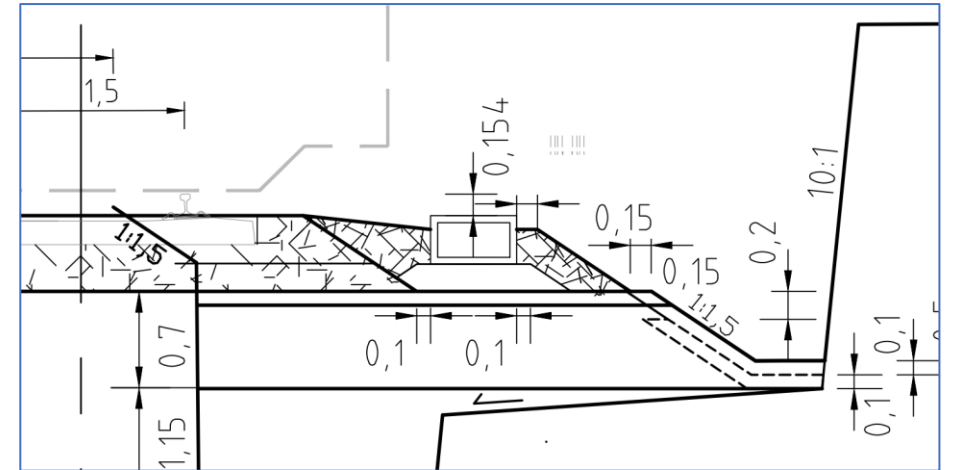
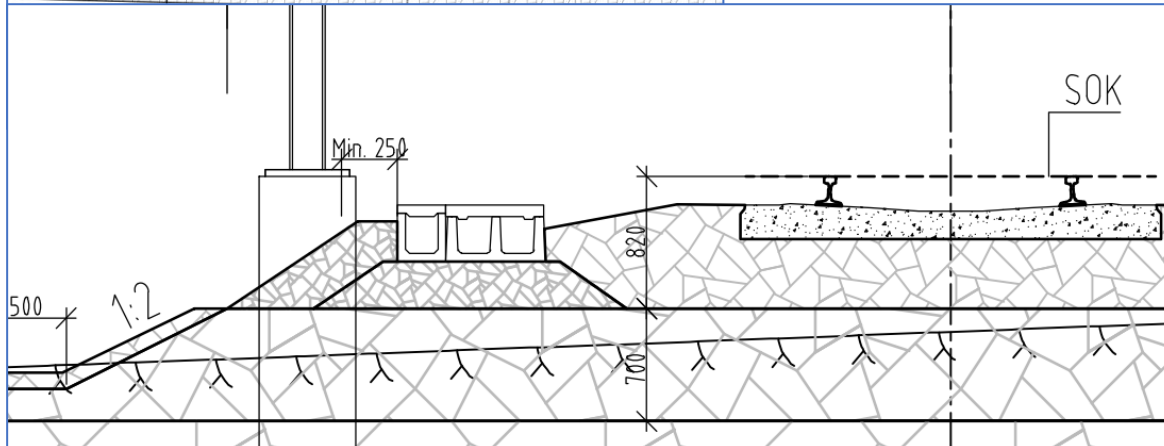
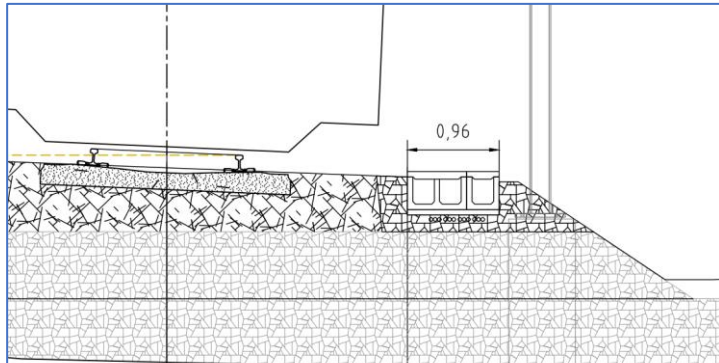
- Punkt 5: Hva menes egentlig med «tilstrekkelig støtte»?



BAKGRUNN FOR VALGT TEMA

5. Utførelse: Kabelkanalen skal ha tilstrekkelig støtte på begge sider slik at den ikke forskyver seg ved f.eks. arbeider i ballastlaget. Oppfylling av pukk skal ikke fylles høyere opp enn 50 mm under lokk kabelkanal.

- Uendelig mange forsøk på å tallfeste formen og størrelsen på fundamentet og oppfyllingen.



BAKGRUNN FOR VALGT TEMA

Hva med andre krav som ikke er tydelig definert og som har betydning for utforming av fundamentet under kabelkanalen og oppfyllingen rundt?

- Hva er optimal høydereferanse for topp kabelkanal ift. sville eller annet ref. punkt? (for spor i dagen)
- Hva er optimal avstand mellom senterspor og kabelkanal i skarpe kurver med utvidet ballastskulder?
- Hva er optimal formasjonsplanbredde mellom kabelkanalen og formasjonsplankanten?
- Er pukkfundamentet i det hele tatt nødvendig?

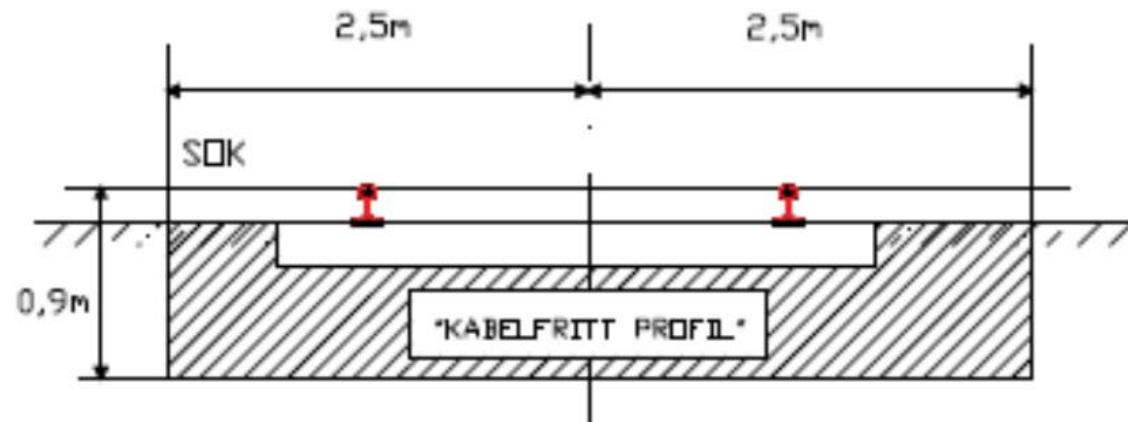
BAKGRUNN FOR VALGT TEMA

- 1. Hvilke konsekvenser for over- og underbygning med tanke på prosjektering, bygging, vedlikehold og kostnad har ulike måter å legge kabelkanaler på?*
- 2. Hvilke andre fordeler og ulemper finnes det ved alternative plasseringer av kabelkanaler, og alternative materialer kabelkanaler er laget av?*

INTERVJU

- Problemstilling 1:

Kabelkanaler legges normalt 2,50 m fra senterspor mtp. kravet om «kabelfritt profil». Hva mener du er opphavet til dette kravet og hva er dine erfaringer med opprettholdelse av dette kravet?



Figur 5.1

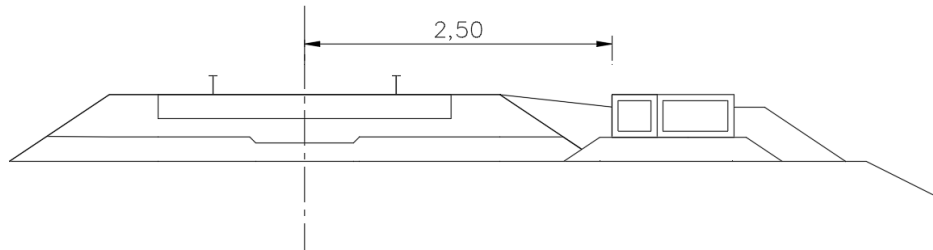
Kabelfritt profil.

INTERVJU

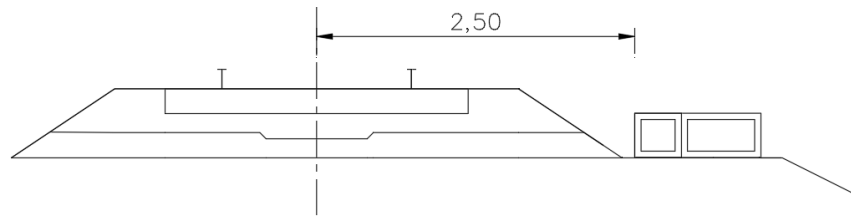
- Problemstilling 2:

Har du erfaring med disse forlegningsmetoder? Hva mener du er fordeler og ulemper her?

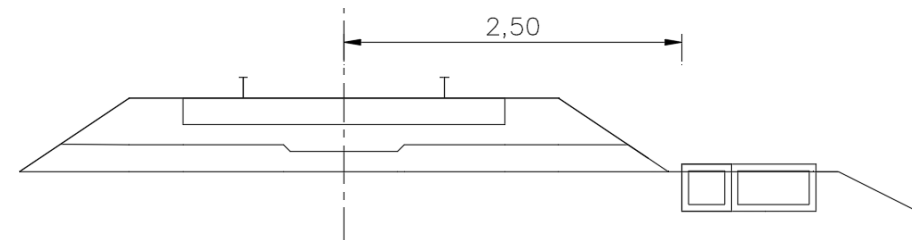
Alt. 1 – Kabelkanal på et pukkfundament



Alt. 2 – Kabelkanal direkte på formasjonsplanet



Alt. 3 – Kabelkanal delvis under formasjonsplanet

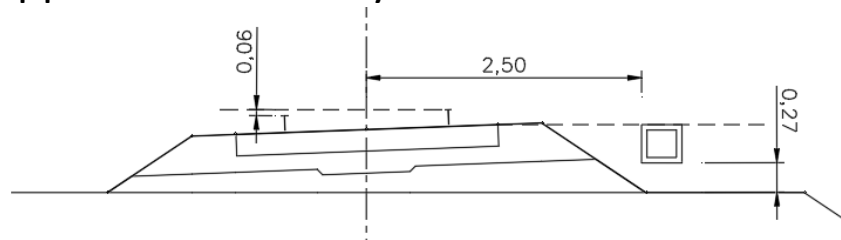


INTERVJU

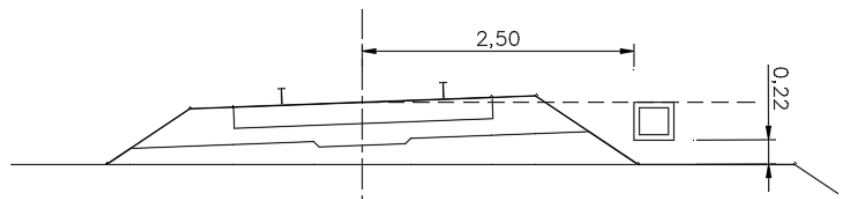
- Problemstilling 3:

Hva mener du er/bør være riktig referansehøyde for topp kabelkanal for spor med overhøyde ift. sville? Hva er fordeler og ulemper med de ulike referansenivåene?

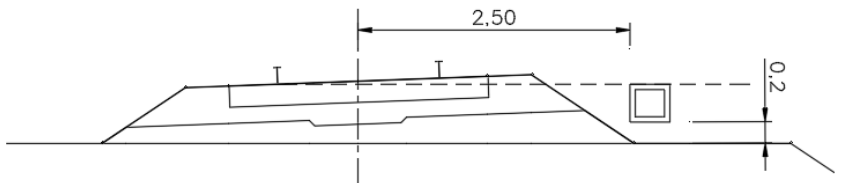
Alt. 1 – Topp kabelkanal i høyde med overkant sville nærmest kanalen?



Alt. 2 – Topp kabelkanal i høyde med overkant sville midt på sporet ?



Alt. 3 – Topp kabelkanal i høyde med overkant sville under SOK?

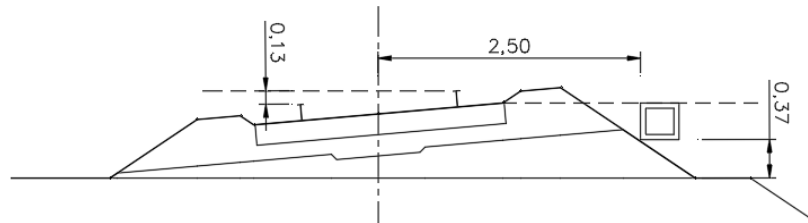


INTERVJU

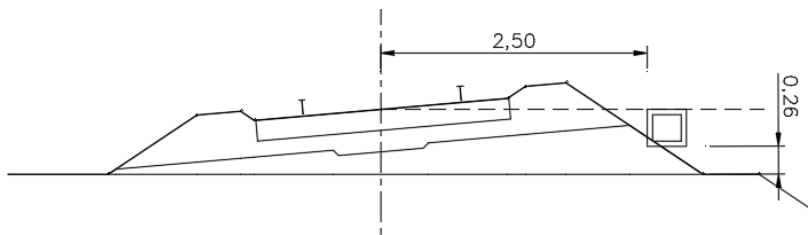
- Problemstilling 4:

I skarpe kurver ($R < 500\text{m}$ for tresviller/ $R < 400\text{m}$ for betongsviller) er det krav om utvidet ballastskulder for å yte større sideforskyvningsmotstand mot solsleng. Hva mener du bør være riktig avstand fra spormidtd til kabelkanalen og riktig referanse høyde nå?

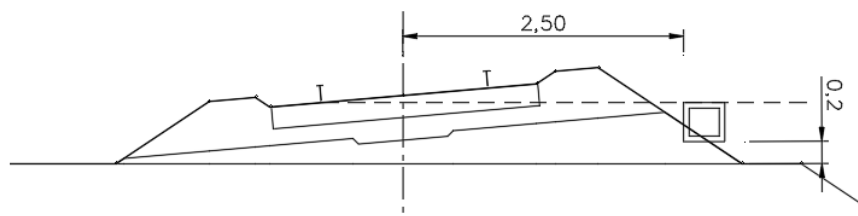
Alt. 1 – Topp kabelkanal i høyde med overkant sville nærmest kanalen?



Alt. 2 – Topp kabelkanal i høyde med overkant sville midt på sporet ?



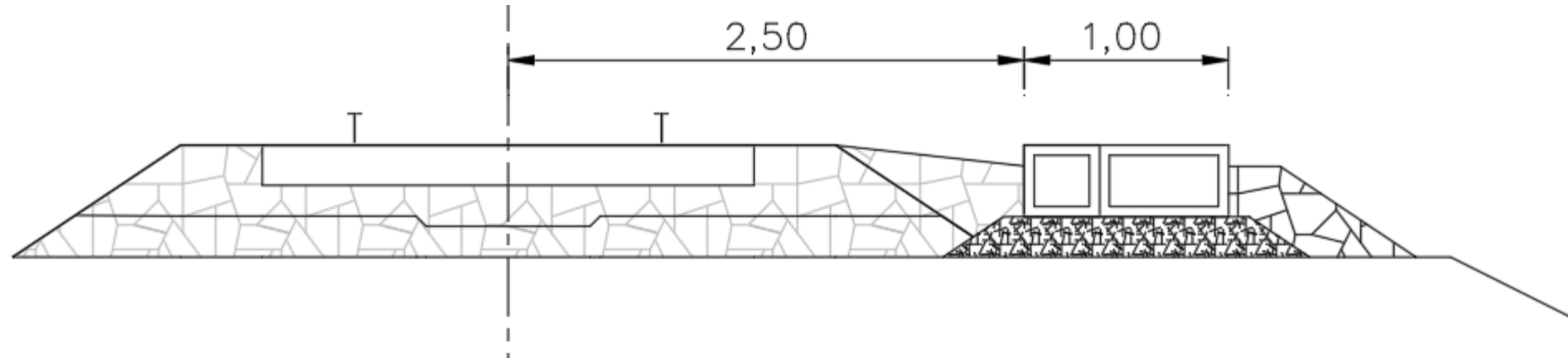
Alt. 3 – Topp kabelkanal i høyde med overkant sville under SOK?



INTERVJU

- Problemstilling 5:

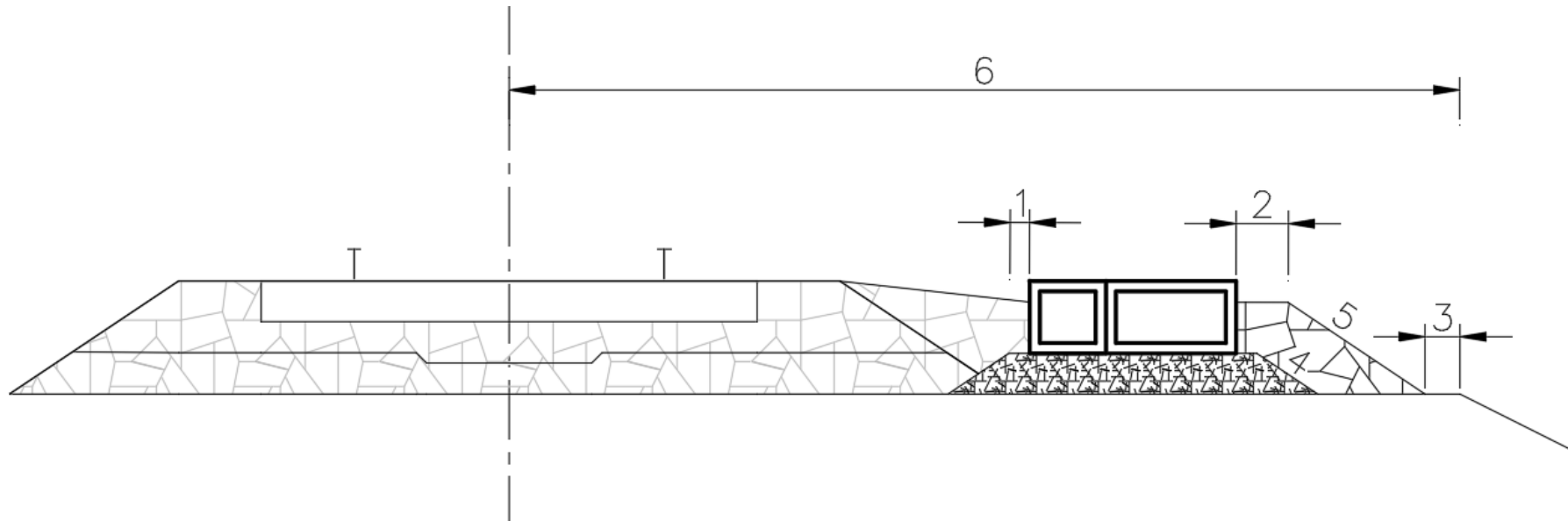
Her introduserer man fundamentet under kanalen og oppfyllingen rundt denne. Hva mener du er funksjonen til disse elementene?



INTERVJU

- Problemstilling 6:

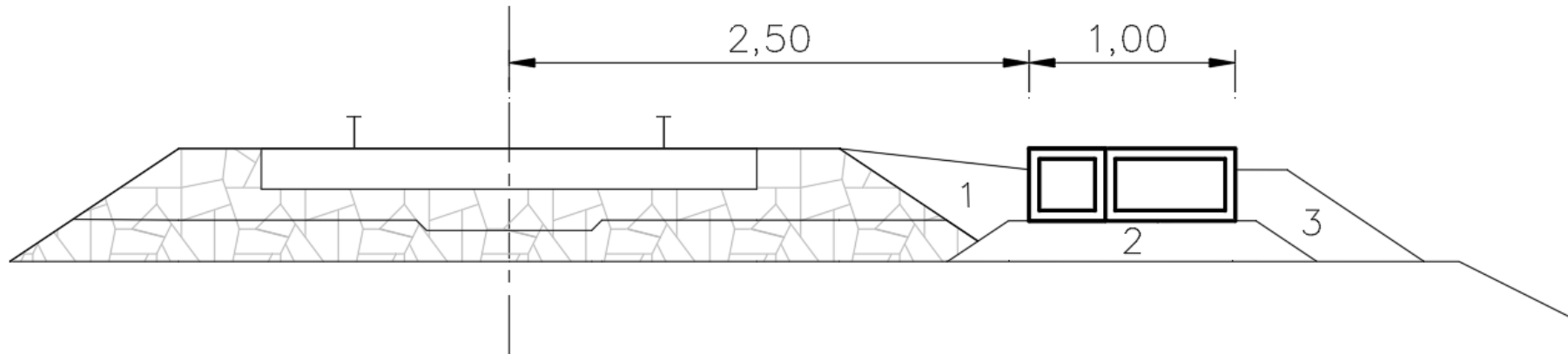
Slik det ble nevnt tidligere er det mange ukjente størrelser for fundamentet og oppfyllingen. Hva mener du er viktig å ta hensyn til ved dimensjonering av disse elementene? Ukjente størrelser er markert med tall.



INTERVJU

- Problemstilling 7:

Hva mener du er riktig materialtype og fraksjon til å bruke i de 3 markerte områdene nedenfor?

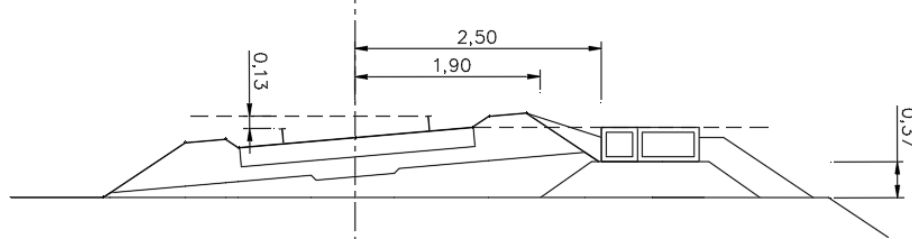


INTERVJU

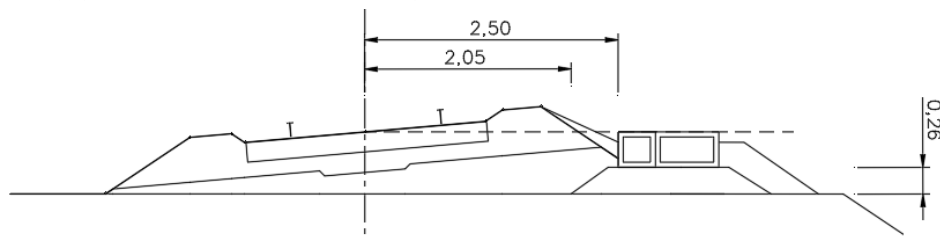
- Problemstilling 8:

Vi går tilbake til problemstilling nr. 4 med skarpe kurver, men denne gangen med fundamentet under kabelkanalen og oppfyllingen rundt denne. Hva syns du om løsningen nå?

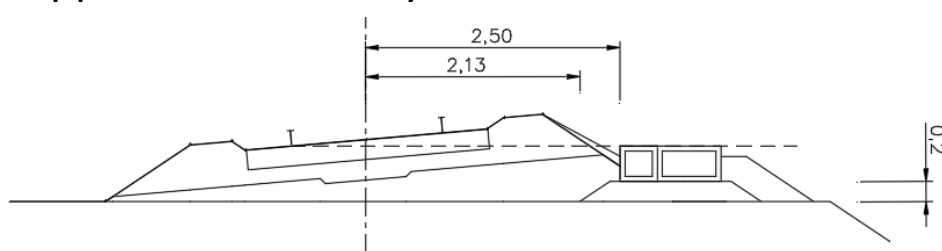
Alt. 1 – Topp kabelkanal i høyde med overkant sville nærmest kanalen?



Alt. 2 – Topp kabelkanal i høyde med overkant sville midt på sporet ?



Alt. 3 – Topp kabelkanal i høyde med overkant sville under SOK?

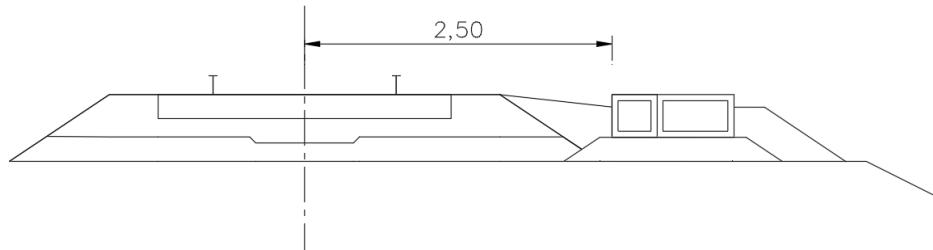


INTERVJU

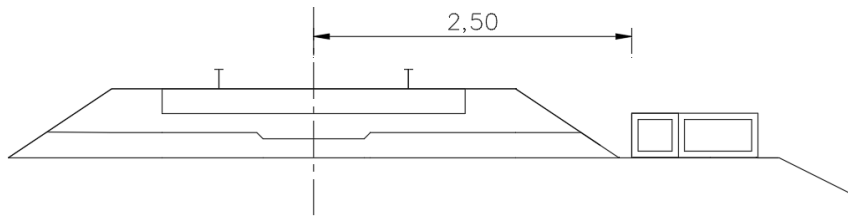
- Problemstilling 9:

Vi går tilbake til problemstilling nr. 2. Hvilket av disse alternativene mener du er vanskeligst å prosjektere og hvorfor?

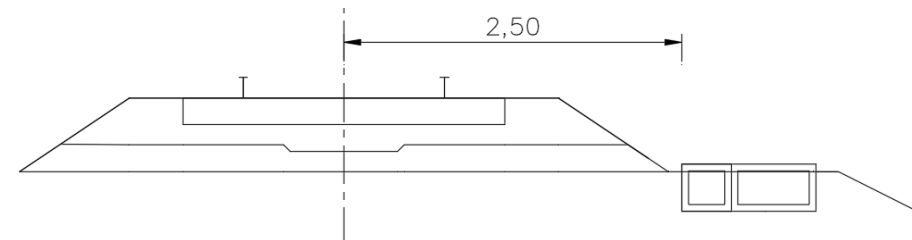
Alt. 1 – Kabelkanal på et pukkfundament



Alt. 2 – Kabelkanal direkte på formasjonsplanet



Alt. 3 – Kabelkanal delvis under formasjonsplanet

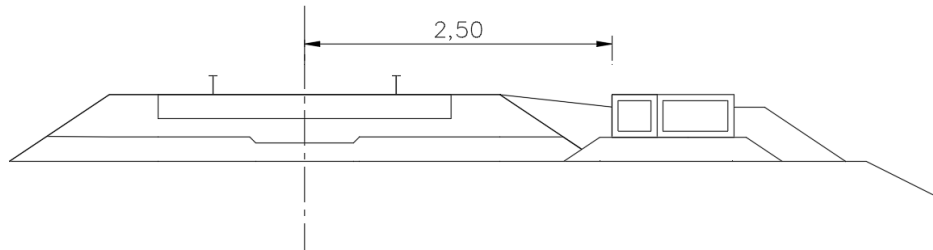


INTERVJU

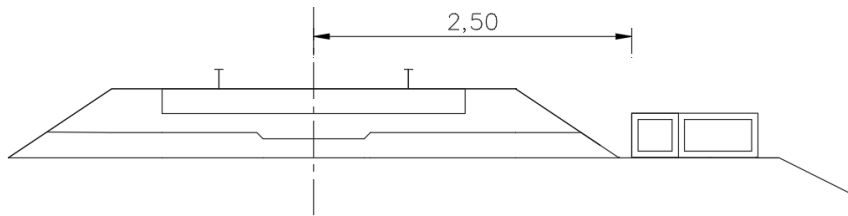
- Problemstilling 10:

Vi går tilbake til problemstilling nr. 2. Hvilket av disse alternativene mener du er vanskeligst å bygge og hvorfor? Hvilket alternativ blir dyrest og hvilket blir billigst?

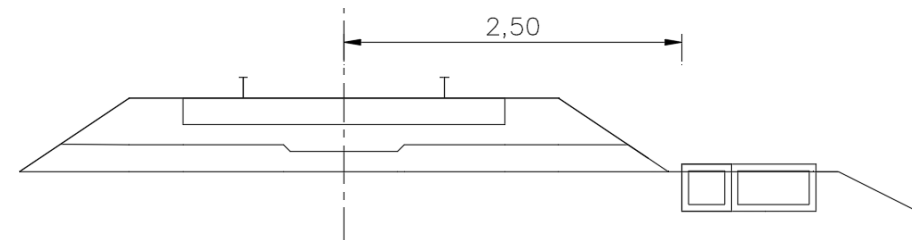
Alt. 1 – Kabelkanal på et pukkfundament



Alt. 2 – Kabelkanal direkte på formasjonsplanet



Alt. 3 – Kabelkanal delvis under formasjonsplanet

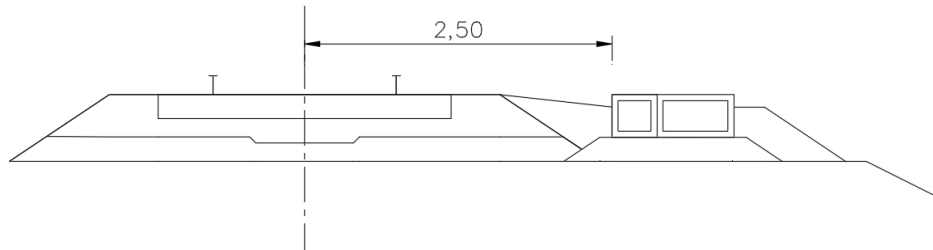


INTERVJU

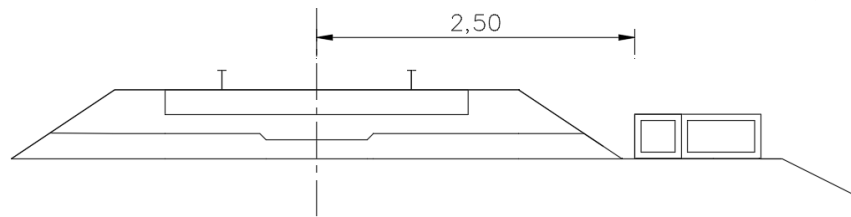
- Problemstilling 11:

Vi går tilbake til problemstilling nr. 2. Hvilket av disse alternativene blir vanskeligst å vedlikeholde og hvorfor? Med vedlikeholdet menes vedlikehold av over- og underbygning, men også vedlikehold av selve kanaler og kabelføringer.

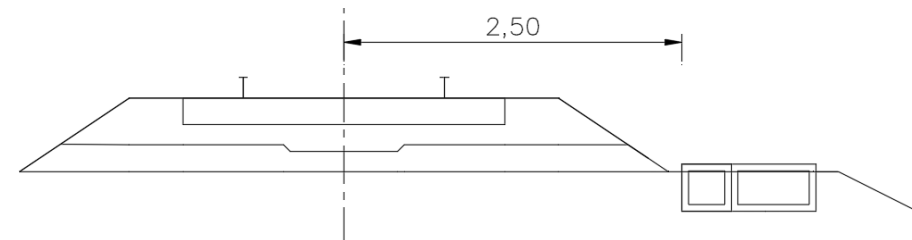
Alt. 1 – Kabelkanal på et pukkfundament



Alt. 2 – Kabelkanal direkte på formasjonsplanet



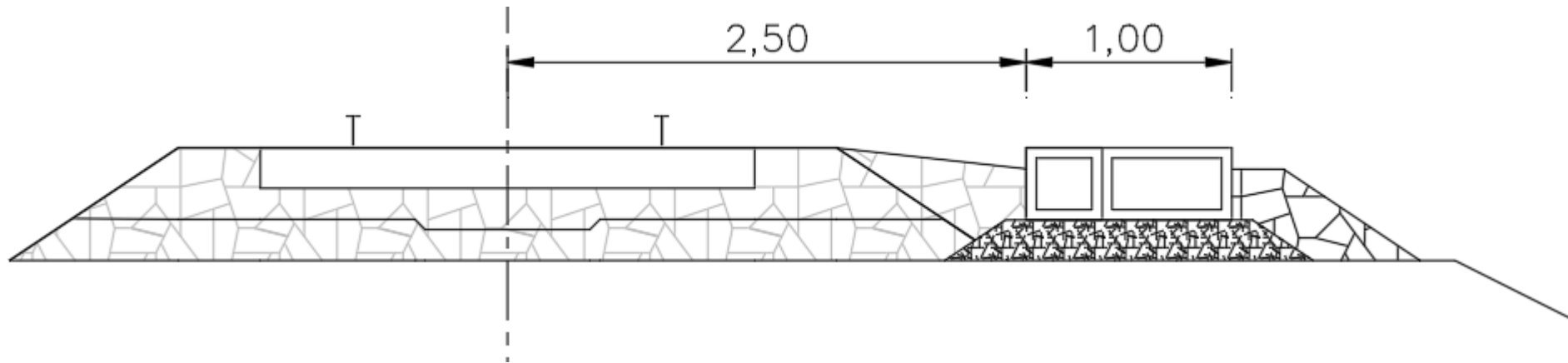
Alt. 3 – Kabelkanal delvis under formasjonsplanet



INTERVJU

- Problemstilling 12:

Med flere kabelkanaler i parallell, fundamentet under og oppfyllingen rundt, blir formasjonsplanbredden fort større enn kravene tilsier (3,5m målt fra senterspor for nye baner), spesielt i yttersving med overhøyde. Kjenner du til alternative løsninger for legging av kabelkanaler langs spor som reduserer behovet for utvidelse av formasjonsplanet utover kravet?



INTERVJU

- Problemstilling 13:

I så fall hva er dine erfaringer/meninger om disse løsningene?

Alt. 1 – Kabelkanaler av plast



Alt. 2 – Kabelkanaler på bru



Alt. 3 – Kabelkanaler av glassfiber



