



Reguleringsplan og teknisk forprosjekt

BYBANEN OG HOVEDSYKKELRUTE
FRA SENTRUM TIL ÅSANE,
MED FORLENGELSE AV FLØYFJELLTUNNELEN

Detaljreguleringsplan

Delstrekning 1, Kaigaten - Sandbrogaten

Planid 65800000

Geoteknisk rapport

Sammendrag og oppsummering

Følgende forhold trekkes frem som viktige oppfølgingspunkter for videre planlegging og detaljprosjektering:

For etablering av kulvert/grøft til ny infrastruktur i bakken, velges uforankret spuntvegg langs Bryggen og inn på Torget. Detaljer omkring løsmasser og deformasjoner avgjør om stivhet må styrkes med f.eks. innstøpt H-bjelke og armering av rørpel. Seksjonsvis utgraving gir risiko for moderate deformasjoner på inntil 20-50 mm for veggtopp.

Generelt velges løsning som ikke gir tilleggsspenning ned i grunnen ved etablering av ny bærekonstruksjon for banen i Sandbrogaten. Det tas da utgangspunkt i at vekten av fjernet masse skal være større eller lik vekten av oppfylt ny masse inkludert vekten av en fullastet bybanevogn. Dette løses med bruk av lette masser som del av bærekonstruksjonen under en sammenhengende betongplate (evt. av lettere betong) som bærer sporet. Den nye bærelagspakken med ca. 40% Glasopor i det ca. 1 m dype nye bærelaget under baneskinnene gir en god løsning, og null tilleggslast på grunnen under banen.

Bruk av lette fyllmasser bør vurderes for flere deler av traséen.

Bergen:2022-06-17

04J	Geoteknisk vurdering	2022-06-17	GJWes	BryOEy	AK	IOV
Versjon	Beskrivelse	Dato	Utarb. av	Fagkontroll	Tverf.kontr.	Godkj. av

Dette dokumentet er utarbeidet av rådgiver som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører rådgiver. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

1 Innledning

Delstrekning 1 (DS1) er bybanesporet gjennom Bergen sentrum som vil utnytte dagens veier for en ny 2-sporet bane for Bybanen. Traseen for Bybanen vil ligge i gater som i dag har relativ høy biltrafikk. Disse gatene prioriteres da for kollektivtrafikk og myke trafikanter. Den endrede utnyttelse gir en annen belastning på en varierende undergrunn, og trafikkeres med utstyr som gir fordringer om jevnhet i banespor. Dette stiller krav til den underliggende grunn.

Dette notatet oppsummerer de viktigste tema knyttet til fundamentering av Bybanen, med spesielt fokus på Sandbrogaten og strekningen langs Bryggen og Torget. Det er der det blir behov for de største direkte eller indirekte tiltak for å kunne etablere en Bybane.

Det dominerende tiltaket langs Bryggen er å bygge en ny og forflyttet trase for dagens to store fellesledninger for overvann og kloakk som ble lagt under dagens veibane allerede på 1920-tallet. I tillegg må det også flyttes en større vannledning på strekningen. Å flytte, samle og øke utnyttelse av rør og kabeltrasé omtales spesielt med hensyn til hvordan en skal finne en løsning som i minst mulig grad påvirker de vernede kulturavsetningene lenger inne under Bryggenområdet og i front av verdensarvstedet.

I Sandbrogaten ligger planlagt Bybanetrasé over svært viktige kulturlag. Massene under bærelaget er i hovedsak identifiserte og definerte bevaringsverdige kulturmasser som ikke må endres pga. økt belastning, omrøring eller endrede grunnvannsforhold.

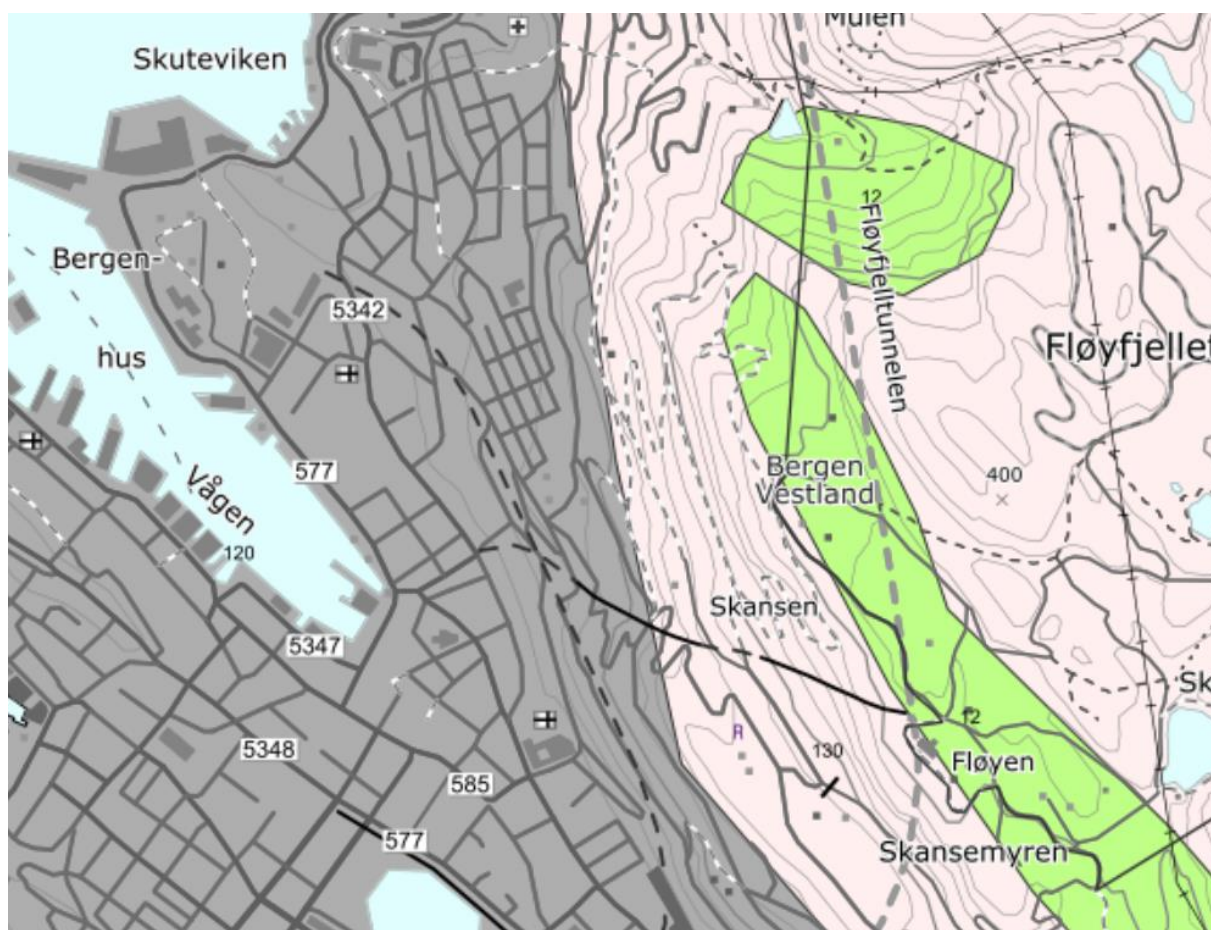
Disse to hovedutfordringer gir et behov for å etablere et geoteknisk datagrunnlag for å håndtere utbyggingen og bybanedriften.

2 Beskrivelse av grunnforhold

2.1 Bakgrunnsinformasjon.

Grunnforholdene i banetraseen over Torget, langs Bryggen og opp Sandbrogaten er i forkant lite undersøkt tidlig i planlegging av Bybaneprojektet. Karakteristikken som dominerer er fyllmasser i geologisk og historisk tidsmålestokk. Det vil si terrengarronding knyttet til byutvikling over nær 1000 år og geologisk siden avsluttet istid.

Grunnen under en del av banetraseens tilgrensende bygg er enkelt vurdert omkring 1900 tallet ved torgutviklingen, noen bygg er fundamentert på peler (av tre) til fjell og noen er basert på såkalt flytende byggkonsept. Oppbygging av vegger og torgsoner er lite dokumentert og er resultat av rundt 100 års anleggsarbeid for sentrumsutvikling. I senere år er ønsket om ombygging og rehabilitering bakgrunn for normalt sterkt avgrensede undersøkelser for nye bygg. Det virker å være begrenset med grunnundersøkelser i forbindelse med tidligere veg- og gateprosjekter i sentrum. Historisk brukserfaring omkring vegger og løsmassekvalitet synes å ha vært styrende. I figur 1 illustreres den ingeniørgeologiske karakteristikken av sentrum og det som er området for delstrekning 1.



Figur 1 Det kvartærgeologiske kart over Bergen sentrum viser karakteristik "Fyllmasser" for området for delstrekning 1 (DS1) i sentrum mellom Smålungeren, Vågen, Skuteviken og Skansen (ref. NGU).

Kunnskap omkring grunnvannsnivået er i relativt stor grad undersøkt de senere 10-årene, bl.a. for å øke grunnlag for løsninger for bevaring av bygg og kulturavsetninger. Her er forhold til grunnvannsstandens endring og setninger med skaderisiko gitt oppmerksomhet knyttet til kjemiske endringer av fyllmateriale med stedvis betydelig innhold av humusmateriale.

Skade mht endring av humusholdige løsmasser gir risiko for svekket fundamentering og tilhørende antatt og registrert betydelig setningsrisiko. Arkeologisk er bevaring av stabile grunnforhold knyttet til ønske om historisk kunnskap som kan hentes ut av løsmasser under og omkring bygningene og ikke sikkert identifiserte variasjoner i fyllmasser og geologiske avsetninger.

Under det planlagte banesporet knyttet til bybaneprojektet kan det oppstå påvirkning som eventuelt skader verdien av løsmassene og som skal tas hensyn til. Slike konsekvenser må det planlegges for å unngå.

2.2 Grunnforholdene langs banetrasé

For å styrke de planlagte løsninger og tiltak, er grunnforholdene inklusive grunnvannsforholdene kartlagt i teknisk forprosjekt. I hovedsak i størst mulig grad knyttet til spesielt vurderte mulige utfordringer og tiltaksrisiko.

Løsmassenes mektighet og type i delstrekningen er i forprosjektet undersøkt enkelt i 21 posisjoner, inkludert grunnvannsstandsmaalinger i 14 av posisjonene, og opptak av representative prøver i 11 posisjoner. Den sydligste del av Delstrekning 1 er kartlagt som del av Delstrekning tunnel (DST). Også de miljøtekniske forhold er søkt identifisert som grunnlag for å varsle nødvendige tiltak for anleggsfasen. Karakteristikken «enkelt undersøkt» er knyttet til vanskeligheten med å etablere en grundig geofaglig undersøkelse for område med betydelig omfang steinholdige fyllmasser langs ønsket banetrasé.

Geologiske kart viser grovt at bergoverflaten i sentrum faller mot Vågen fra begge sider. Det vil si at Bryggen ligger langs et variert dypt parti med skrå bergoverflate fra øst, sør og vest mot Vågen.

Overflaten i dagens terreng varierer fra startområdet ved Lille Lungegårdsvann på kote ca. +3 som stiger nordover, via kote +5 i Småstrandgaten før terrenget synker til knapt kote +1,5 over området Torget. Videre er terrenget meget svakt stigende langs Bryggen til ca. kote +2 nederst i Sandbrogaten, dog med et lavbrekk ned mot kote +1,5 ved Dreggsallmenningen. I Sandbrogaten stiger overflaten på gaten til ca. kote +6 øverst inn mot tunnelpåhugget. Påvist bergoverflate varierer i samme område. Løsmassemektigheten varierer fra i størrelse ca. 8 m nær Lille Lungegårdsvann til 1 m øverst i Småstrandgaten via inntil 9 m over Torget og videre til ca. 4 m i overgang til Bryggen. Deretter er nåværende dybde under gate og fortau relativt jevnt økende til 31 m i nordenden av Bryggen til en variasjon mellom 3 til 11 m i Sandbrogaten.

Bybanetraseen i Kaigaten er noe undersøkt i forbindelse med bybanens byggetrinn 1 og i forbindelse med utredning av alternativ trase i tunnel bak Bryggen. Løsmassene i enden av Kaigaten mot Christies gate har et humusinnhold i størrelse 3 % til 13 % i de øverste antatt yngre 5 – 9 m fyllmasse. Dybden til berg faller sørover mot Lille Lungegårdsvann, fra 1,1 m ca. 40 m opp i Christiesgt til ca. 8-10 m på sørsiden av Kaigaten mot Festplassen. Løsmassene er sannsynligvis utfylte masser mot Lille Lungegårdsvann de siste 100-150 år. Det geoteknisk vurderte relativt høye humusinnhold er i stor grad knyttet til antatt terrengarronding med masser som inneholder både humus og mursteinsblokker.

De hittil gjennomførte løsmasseundersøkelsene for delstrekning 1 viser variasjon under et relativt jevnt grovt og fast topplag på 1-1,5 m tykkelse. Derunder er variasjonene relativt grove. Dvs at stedvis er utfylling fra omkring år 1900 bestående av blandede grove fyllmasser relativt rent for humus.

Inn mot Torget fra sør er tilsynelatende humusinnholdet noe økende. Mektigheten over fjell er jamt økende fra 1 m øverst i Småstrandgaten til nærmere 9 m med mer leirholdige materiale innenfor vegen over Torget. Det er relativt komplisert og krevende å oppnå god og representativ geoteknisk karakterisering av fyllmasser og mulig humusinnhold pga variasjoner.

Faglig er dagens karakteristik grovt definert med i hovedsak varierende god fylling over kulturlag over original forventet geologisk morene.

De gamle fyllmassene øverst på Bryggen forventes å variere i sammensetning, men har øverst en rimelig lav risiko for å inneholde humus og finstoff av betydning. En del av de definerte lag over originale løsmasser under 100 år gammel fylling kan stedvis ha et markert og sannsynlig betydelig humusinnhold. De geotekniske egenskapene til de gamle fyllmassene er ikke enkle å undersøke og karakterisere på grunn av kompleks sammensetning og tilsvarende vanskelige egenskaper med hensyn til prøvetaking. Motstand mot for eksempel penetrering med totalsondering er i store soner betydelig, men gir positive forventninger med hensyn til styrke og stivhet.

Egenskapene i fyllmassene for geotekniske beregninger tolkes relativt forsiktig basert på de utførte totalsonderinger.

Rundt 1920 ble den nye kaifronten bygget utenfor og stedvis relativt nær de i dag definerte verneverdige bygninger langs Vågen. Ytterste del er en gammel klassisk såkalt tørrmur som forventes å fungere godt som mur for i hovedsak promenade og båtfortøyninger. Kaimuren er forventet og antatt bygget på et rensket og planert løsmasseunderlag, sannsynlig en relativt hard løsmasse (morene). Bak den nye kaifronten ble det fylt ut og deponert antatt steinig grusig fyllmateriale. Overgangen til den daværende sjøbunn er fortsatt usikker. Sjøbunnens egenskaper bakover mot gammel kaifront under de nye fyllmassene er usikker. Både i mektighet og innhold i de originale fyllmassene fra det daglige liv over noen hundre år er geoteknisk sannsynlig variert og usikker. Disse antatte geologisk «unge» løsmasser under de 100 år gamle fyllmasser vil pr definisjon karakteriseres som kulturlag.

Egenskapene til de 100 år gamle fyllmasser og de noe eldre kulturmasser er uten gode og sikre geotekniske beregningsparametre.

Løsmassene som påvirker tiltak knyttet til planlagt bybanetrasé varierer og er ikke detaljundersøkt for endelig detaljert prosjektering. Langs Bryggen karakteriseres grovt underlaget for banen som rimelig sterkt og stivt med grusig steinige løsmasser. Innholdet av humus er lavt. I overgangen mellom Torget og Bryggen er det variasjoner i det som pr definisjon kan kalles kulturlag. Presis undersøkelse av parametre i fyllmassene er i beste fall meget komplisert.

I Sandbrogaten er det registrert ca. 1-3 m relativt unge grusige fyllmasser over et variabelt sammensatt kulturlag med 2-6,5 m mektighet. Dybden til berg er relativt liten. Innhold av leire mindre enn lenger sør i traseen. Mengde definert bevaringsverdige kulturlag er relativt stort.

Vannstanden i de totale avsetninger langs Bryggen synes i relativt stor grad å følge tidevannsvariasjoner med svak stigning et stykke innover land. I avstand i størrelse 30 m innenfor kaikanten forventes grunnvannsspeilet å ligge i størrelse inntil ca. 0,4 m over

middelvannsstanden i Vågen. En pågående grunnvannstandsmåling ca. 70 m inn på land fra Vågen ligger jevnt på ca. kote +1 m og viser meget små variasjoner og ingen direkte tilknytning mellom grunnvannsstand og den varierende sjøvannstand.

Generelt er de totale egenskaper i grunnforholdene noe varierende langs denne sentrumsnære del av bybanetraseen. Mest nær Torget på grunn av noen løse/bløtere lag i relativt liten dybde under et ca. 1 meter tykt topplag i vegbanen. Banefundamentering skal best mulig sikre stabile forhold som gir rimelig lite vedlikehold som følge av små setninger. I tillegg skal det prioriterte kulturlaget i spesielt Sandbrogaten søkes sikret fullt ut mot påvirkning fra banefundamenteringen. En anleggsteknisk hovedutfordring er også å velge en omlegging av infrastruktur i bakken langs Bryggen som gir ingen eller liten effekt på kulturavsetningene innenfor, også knyttet til senere reparasjoner/vedlikehold.

Utførte grunnundersøkelser vises i prosjekt rapporten RA-DS1-004_J02, ref. 2.

3 Geotekniske vurderinger for banetrase

3.1 Banefundamentering i Kaigaten

Forlengelse og tilpassing til nåværende spor og holdeplass lengst vest i Kaigaten og opp i Christies gate gir noen geotekniske utfordringer. Varierende løsmassemekthet fra 1m til 10 m med humusinnhold i størrelse 4-10% er normalt utenfor det som karakteriseres som gode grunnforhold med tanke på setninger. Innsamling av erfaringer fra nåværende endestasjon og banespor er viktig. Spesielt for å tilpasse overgang fra det nær 15 år gamle eksisterende sporet og sørover til nytt spor. Uten detaljert innsyn og vurdering av tilstand og utvikling i nåværende spor kan det være utfordrende å få til en jevn overgang. Eksisterende løsning i Kaigaten er i hovedsak basert på betongplate over humusholdige løsmasser med varierende mektighet. Dette kan kreve vektkompensering av nytt banespor, f.eks. med bruk av Glasopor som fyllmasse for å redusere skarp overgang fra etablert til nytt sporfundament. Bredt sporfundament med delvis fyllmasser av Glasopor vi kunne gjøre setningsutvikling jevnere mellom nåværende og nytt banespor. Tilsvarende som ny fundamentering på jevnt avtakende løsmassemekthet mot tilnærmet fundamentering på berg oppover i Christies gate gir en overgang som ønskes prosjektert jevnest mulig.

3.2 Sporfundamentering gjennom sentrum

Bybanesporer ønskes generelt fundamentert med så stabile og vertikalt setningsfrie løsninger som praktisk mulig for å oppnå minst mulig setningsvedlikehold, men også slik at innvirkning på kulturlag under sporet påvirkes i minst mulig grad.

Den ønskede og dimensjonerende geotekniske tilstand er derved en løsning som skal hindre setningsgivende tilleggsbelastning. Dette er et vesentlig tiltak mht de underliggende kulturavsetninger som ønskes beskyttet mot endring. I tillegg ønskes løsninger som ikke påvirker grunnvannstanden.

Den beste løsningen antas å være med et mål om ingen tilleggsbelastning mot kulturlagene. Det vil si en kombinasjon av vedlikeholdsreduksjon og beskyttelse av de arkeologiske avsetninger.

En balansering av ny spenningstilstand fra søndre del av Bryggen og over Torget med hensyn til risiko for setningsvariasjoner påvirkes også av relativt stor og raskt varierende mektighet i løsmassene.

Egenskaper og stivhet for fyllingstrase over Bryggen er ikke godt dokumentert, men forholdene er antatt relativt gode.

I hovedtrekk deles fundamenteringen inn i 4 hovedområder. Overganger imellom sonene kan fordele noen spesielle vurderinger av å velge passende løsninger, f.eks. gjennom Slottsgaten og overgangen fra Bryggen og Torget.

Banesporet vil fundamenteres på, og i tilnærmet tilsvarende høyde som nåværende gateløp, fra Kaigaten opp mot Småstrandgaten over Torget, Bryggen og opp Sandbrogaten. Underlaget for banesporet er i utgangspunktet rimelig godt frem til og med Bryggen fordi det her har vært forhåndsbelastning fra store trafikkmengder over mange tiår. Opp Sandbrogaten forventes løsmassene å gi mer følsomhet på grunn av viktige kulturavsetninger. Forhåndsbelastningen fra trafikk er mindre i Sandbrogaten, men gaten har vært en viktig busstrasé og inneholder i dag større VA-anlegg.



Figur 2 Flyfotoet viser grovt den planlagte grøftetrase for infrastruktur langs bryggen utenfor vei og nær kaifront. Bybanesporet vil plasseres på innsiden av kulverten nær den ytre del av nåværende kjørebane

Fordi vi ikke har et godt nok grunnlag for å beregne setningsrisiko i humus og kulturlag vil nytteverdien av et vektkompensert banespor gi fordeler og sikkerhet mht setningsskader. Den søndre del av Bryggen med trasé nær den gamle kaifronten vil ha stor nytte av vektkompensert banespor. Tilsvarende kan denne løsningen være aktuelt også over Torget bl.a. pga. de varierende egenskaper i fyllmasser og variert fjelldybde.

Et banespor over relativt stor bredde gir dyp spenningsspredning, men kan prosjekteres med relativt lavt eller ubetydelig spenningstillegg, sammenlignet med hjultrykk med liten bredde og større lastintensitet fra tunge kjøretøy. Overslagsmessig er spenningsspredningen i geotekniske modeller ca. 3 ganger fundamentbredden, enten det er bussdekk eller banesporbredde.

Banesporet er generelt forutsatt fundamentert på et utskiftet masselag med god kvalitet og liten egenvekt. Høy kvalitet på bærelag og god komprimering forventes å gi rimelig jevne

fundamenteringsløsninger. I spesielt Sandbrogaten og kartlagte varierende forhold mot Torget, vil beregnet tilleggslast fra Bybanen søkes eliminert ved masseutskifting under banen med hjelp av det meget lette og sterke fyllmateriale Glasopor. I Kaigaten er 1 meter masseutskifting med vanlig forsterkningslag av pukk, grus og bærende betongplate hovedløsningen.

Konsekvensen av tilleggsspenninger i dybden under banesporet vil gi risiko for økt deformasjon spesielt i underliggende kulturavsetninger. Det vil si at uten vektkompensering vil det kunne oppstå tilleggssetninger som blant annet kan gi risiko for ujevnt banespor og risiko for uønsket, tidsavhengig setningsutvikling som må håndteres med driftsstopp.

For kulturlag i banesporet vil økt komprimering av massene under sporet være uheldig også for det overordnede ønsket om å sikre og opprettholde kulturlaget sine nåværende egenskaper under sporet.

Tidligere skisseløsninger og antydning om eventuelt å pelefundamentere det nye banesporet på deler av strekningen, ville gitt en prinsipiell skade på kulturlaget selv om det ble begrenset til slanke stålpeler (f.eks. 70 mm diameter) boret til fjell. Det i stor grad ønskede prinsippet om ikke å endre spenningstilstanden i undergrunnen er nå mer anvendt også for veger i Norge. I de siste årene i utfordrende oppgradering av veger er det økt bruk av lette fyllmasser. Det lette «kunstige» materialet kalt Glasopor (smeltet og utstøpt kornig glass med stort porevolum) er anvendt i både veg og banekonstruksjoner, f.eks. fyllingsarbeid i Bybaneprojektet i Bergen (BT4) og i Riksveg 3 ved Alvdal.

Vi har pr i dag ikke detaljert nok informasjon til å kunne beregne stabilitet for kaimurene. Gamle tegninger viser imidlertid en stabil selvbærende konstruksjon uten støtte mot bakfyll i den nåværende ytre kaifrontkonstruksjonen. En avsperrert bruk av kaien vil være nødvendig ved redusert motfylling i byggefase.

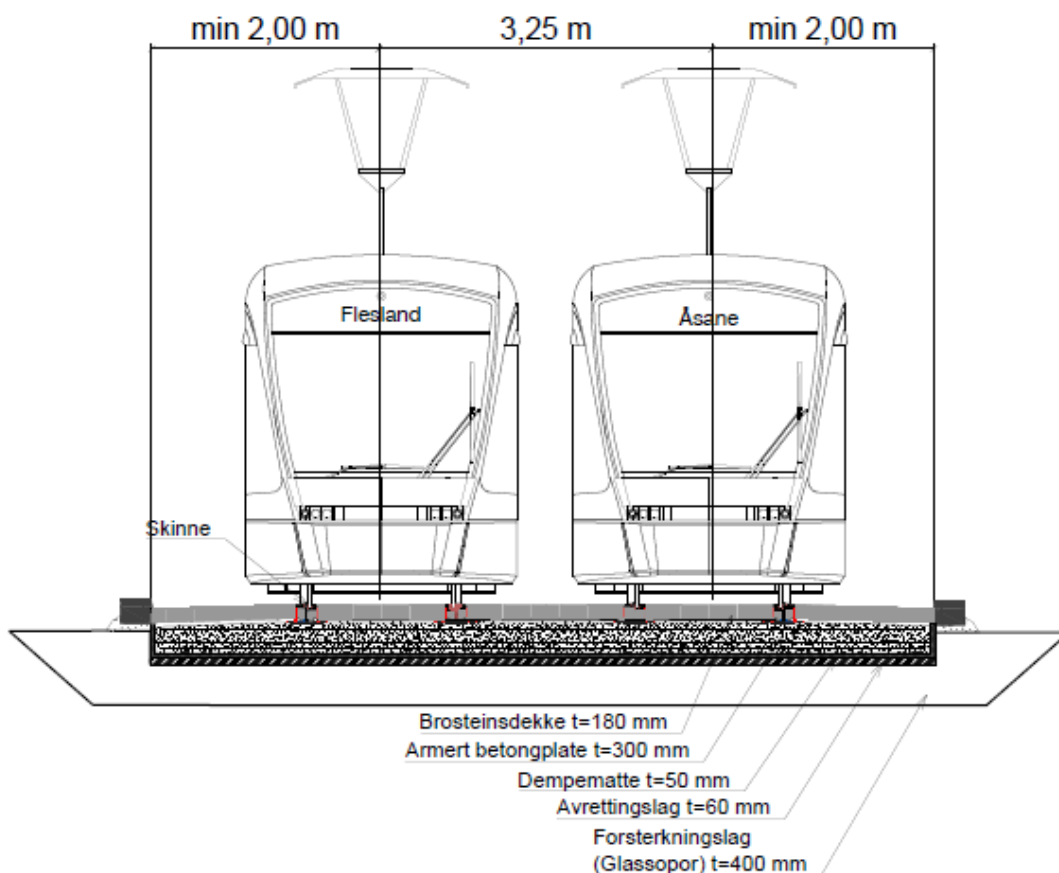
3.3 Banefundamentering i Sandbrogaten

Hovedkonseptet er å velge en løsning som ikke gir setningsgivende banekonstruksjon.

Nåværende øvre del av løsmassene antas å ha egenvekt 18-19 kN/m³. I en masseutskifting med å delvis erstatte nåværende masser med Glasopor med komprimert romvekt inntil 3,0 kN/m³ gir kapasitet for å ta med et øvre topplag i sporet med romvekt mellom 19,5 kN/m³ (avrettingslag grus) og 25,0 kN/m³ (armert betong) og tilleggslast fra fullastede bybanevogner. Betongdekket med stor bredde vil fordele trykket ned i underlaget over et stort areal. En slik mulig god balanse med hensyn til jordspenning fra egenvekt i topplaget og tillegg fra lastede bybanevogner vil beregningsmessig ikke gi tilleggskomprimering av undergrunnen. Det vil motvirke setninger av selve banesporet.

Glasopor dokumenteres av produsenten med meget gode geotekniske egenskaper, og styrke nær som i pukk. Et nytt bærelag med rundt 1 m mektighet, herav i størrelse 40-45 cm Glasopor, gir som resultat ingen større setninger enn det som i dag skjer i undergrunnen i den aktuelle sportrase pga naturlig kryp i kulturlaget.

Den aktuelle løsning er illustrert i figur 3 og vist i tabell 1.



Figur 3 Prinsippkisse for oppbygging av banetrase med Glasopor ned mot undergrunnen og under betongplaten for banespor. Platefundamentet sin bredde kan velges for å påvirke løsningen for å oppnå lave midlere tilleggslast på undergrunnen.

I tabell 1 vises en overslagsberegning for nytt spor i Sandbrogaten med eksempel på lagoppbygging. Iterasjon omkring tykkelse Glasoporlag vil gi gunstig null tilleggsspenning i en total lagpakke nær 1,0 m.

Slike løsninger gir noen utfordringer i selve byggefasen og noen krav til god overgang og løsning mot oppgraderte ledningstraseer langs banen.

Eksempelet i tabell 1 er med betong med normal vekt i dekkekonstruksjonen. Den kan varieres ved f.eks. å velge lettere tilslag i betong som gir mulig romvekt helt ned til $20,0 \text{ kN/m}^3$ i stedet for 25 kN/m^3 . Noe økt mengde Glasopor gir også enklere tilstand.

Rimelig opprettholdt tilførsel av overvann mot undergrunnen under banesporet vurderes mht infiltrasjon i eller rundt fundamentflaten og lite endret grunnvannsspeil i trasesonen.

Tabell 1. Vektkompensert banefundamentering, eksempel beregning med markert nytte å bruke lett betong i elementoppbyggingen. Forhold mellom mengde Glasopor og brutto høyde justeres for å gi 0 tilleggslast med gitte fundamentdimensjoner.

Element	tykkelse (m)	kN/m ³	kN/m ²
Brosteinsdekke:	0,1	27,0	2,7
Betong:	0,4	25,0	10,0
Dempematte:	0,03	10	0,3
Glasopor:	0,4	3,0	1,2
Avretting grus:	0,06	19,0	1,1
Sum ny oppbygging	0,99		15,3
Fratrekk eks veg	-0,89	18,5	-16,5
Asfalt	-0,1	26,0	-2,6
Sum etter utgraving	-0,99		-19,1
Sum avlastning etter ombygging			-0,37
Last full vogn (70 tonn)	70		
Areal plate (42x3,975)	167		
Areal brutto plate (42 x 3,975+ 0,30)	179,55		
Tilleggspenning banelast uk plate			0,39
Sum last inkludert full Bybanevogn med fundament			0,02

I nordenden av Sandbrogaten stiger berget opp raskt mot Nye Sandviksveien og delstrekning 2 (DS2). Her ligger påhugg for banetunnelen fram til planlagt Sandvikskirken stasjon i fjell. Tunnelpåhugget inkluderer en tunnelportal og bygg for likeretter i overgangen mellom DS1 og DS2. Selve tunnelen starter i relativt steil og tilnærmer løsmassefri skråning opp mot Nye Sandviksveg men med relativt liten bergoverdekning for tunnel.

Geoteknisk vurdert gir det en tydelig og relativt skarp overgang fra banespor på løsmasse og videre trase på berg. Den nye tunnelen skal passere tvers over en tunnel på et sidespor for jernbanen.

Utfordringene i overgang og videreføring av banetraseen inn mot tunneltraseen er i alt vesentlig ingeniørgeologi omkring tunnelløsning, men også hvordan grunnvannsspeilet i berget kan kontrolleres best mulig vha injeksjon i berget rundt tunnelprofilet for å sikre mot at tunnelen blir en for sterk dreneringskanal innover under boligsonene. Sikring for minst mulig påvirkning av grunnvannet i løsmassene utover dagens drenering / innlekkasje mot jernbanetunnelen er en viktig målsetting. Stor lekkasje og evt. endring av grunnvannsspeilet i løsmassene over tunnelen ville kunnet påvirke fundamenteringsunderlaget betydelig og gitt setninger for de av bygårdene innover langs tunneltraséen i DS1/DS2 som ikke er fundamentert direkte på berg. Ved tetting av fjellet kan dette unngås. Endringer i

grunnvannstilsiget fra fjellet vil også kunne gi negative konsekvenser for kulturlagene i Sandbrogaten.

Tunnelportalen og likeretterbygget må søkes fundamentert på fjell. Utgravd grunnareal bør søkes rimelig avgrenset og en viktig avgrensing er å unngå sporløft i forhold til nåværende veg for å unngå påvirkning av grunnvannsspeil og setninger av kulturmassene i Sandbrogaten.



Figur 4 Skisse over påhugg til DS2 inn under Nye Sandviksveien.

4 Geotekniske vurderinger for infrastruktur i grunnen

4.1 Trasé over Torget

Betydelig del av inngrep fra Småstrandgaten og Strandkaaien over Torget og langs Bryggen knyttes til fornyelse og samling av rør og kabler i en kulvert mellom kaifronten og banesporet. Flere steder bør det vurderes løsninger med spuntavstivede utgravinger for å sikre minst mulig påvirkning av omgivelsene med bygninger og torg. Oppgraderingene i kulvert planlegges for bl.a. å lette framtidig vedlikehold og muligheter for å supplere med rør og kabler.

Trasé og dybde for utgravinger kan gi noen utfordringer med hensyn til sikring av nærliggende kjørefelt, bygg og aktivitetsområder, og forutsetter stedvis klar byggeprossavstiving i byggefasen. Det forutsettes anleggsarbeid uten tørrlegging av grøft/grop. Permanent spunt er ikke aktuelt ved Torget der hvor nedgravd betongkulvert er planlagt.

Tosidig spuntavgrenset grøft kan etableres av hensyn til tilgrensende bygg og arealutnyttelse. Her kan ordinær spunt aktualiseres og vurderes med hensyn til akseptable rystelser. Valg av tett eller åpen rørsputt styres av risiko for å unngå kraftig utvasking gjennom spuntlinja av stedvis påvist finstoff de øvre 3-4 m. Men fortsatt må det vurderes om valg av rørsputt er nødvendig for å unngå ramming og tilhørende risiko for ugunstige rystelser mot de mest nærliggende bygninger.

4.2 Trasé over Bryggen

Inngrep for omlegging av kommunen sin gamle rørtrase langs Bryggen gir betydelige utgravinger. Her planlegges spuntavstivet grop for å gi avgrensede anleggsvirkning på nærliggende veier og bygg.

Bybanesporet over Bryggen er planlagt i en ønsket trasé nær nåværende veg. Det ligger 2 store sentrale VA-ledninger under banetraseen som rundt 100 år gamle. Det planlegges derfor en ny rørtrase mellom planlagt banespor og nåværende kaikonstruksjon. Underkant nye rør er skissert plassert i dybde mellom 3,0 og 4,0 m under det framtidige fortausarealet langs kaifronten. Rør skal ha fall nordover. Det er foreslått å bruke spuntvegg mot banetraseen. Dette tar mindre plass sammenlignet med en vanlig graveskråning. Varig installasjon av spunt sikrer mot forstyrning av bybanen hvis behov for vedlikehold oppstår. De nåværende avløpsrør anbefales å bli liggende for å unngå graving. Rørene må fylles opp for å unngå framtidig mulig sammenbrudd.

Med nåværende kunnskaper om fyllingsmassene som grøften skal etableres i, og tilsvarende massene innover mot den gamle kaikonstruksjon, etableres det en grøfteavstiving best vha spuntvegg. Rørtrase langs Torget/Bryggen er illustrert i figur 5.

Utfordringene omkring spuntvegg er

- Å sikre akseptable og små rystelser under installasjon av spuntelement
- Å dimensjonere for små deformasjoner i spuntveggenes bakenforliggende løsmasser / fylling når grøft er åpen i byggefase, men spesielt hvis seinere åpning

I tillegg er det ønskelig å ha mest mulig positiv kontroll av grunnvannsspeilet i området innenfor spuntvegg som omfatter kulturmasser. Det vil si med minst mulig påvirkning av grunnvannsspeilet fra sjøen og inn mot og under kulturbyggene og minst mulig innstrømming av saltvann ved flo sjø.



Figur 5: Illustrasjon av det aktuelle omfang spuntavstivet grøft. Med hensyn til grunnvannskontroll er strekningen foran den høyest fokuserte verdensarvsonen viktigst. På Torget kan andre formål mht avgrensing av kulvert mot annet bruk prioriteres, inklusive bygninger. Nærhet til trafikkåre kan påvirke nødvendig størrelse på rørsputnåler.

Mulige bivirkninger som påvirker valg av om spuntløsning som kan gi en vanntett konstruksjon er:

- Fare for at forankret spunt med skrå forankringsnåler kan gi en ugunstig virkning i de antatte kulturmasser?
 - Dette krever i tilfelle meget omfattende grunnundersøkelser av sonen bak spuntveggen.
- Vil spunt gi positive virkning på grunnvannsspeilet?
 - En tett spuntvegg reduserer lekkasjen og holder grunnvannet tilbake. Topp spuntvegg eller ventiler i spuntvegg regulerer maksimal grunnvannsstand.

- Er det godt nok kjennskap til stivhet i fyllmassene?
 - Prøvetaking er komplisert. Representativ stivhet er komplisert, men bør søkes i detaljprosjekteringen.
- Vil spunt redusere saltinntrengningen fra sjøen til kulturlagene?
 - En tett spuntvegg reduserer strømning inn og ut av saltvann. Det kan heve grunnvannstanden noe. Springflo vil etter løsningsforslag flomme over spunt og inn i løsmassene å gi et økt saltinnhold som over noe tid vil vaskes ut igjen.
- Vil spuntvegg øke strømning mye i massene dypere enn spuntdybden?
 - Strømning under spissen på spuntvegg til 10-14 m blir mindre enn utveksling i dag. Normalt er løsmasser i slik dybde godt stabile mot strømkrefter og også så langt antatt relativt tette.

For å unngå rystelser under installasjon foreslås byggegrop etablert med alternativet rørspunt. Slik løsning er en installasjon med nedboring / nedsenking av rør med borkrone i forkant på rørspliss. Borkrona har noen mm større dimensjon enn røret. Konseptet for nedboring gir røret med «vinger» ingen rotasjon, men bare en vertikal nedsenking av røret. Røret har «vinger» når veggens ønskes kontinuerlig og tett, dvs. en kontinuerlig kontaktskjøt, jfr. figur 5. Konseptet rørspunt gir en kontinuerlig stålkonstruksjon med dimensjonerte fester mellom hvert element. Selve skjøten kan vha fett gjøres meget tett. Overordnet gir det god mulighet for tett vegg med tilnærmet tette koblinger som hindrer gjennomstrømning av grunnvann. Spuntveggen gir en kontinuerlig rimelig tett konstruksjon i traséretning ned til dybde spunt. Det øker strømvengen for grunnvannet da grunnvannet må strømme inn og ut under spunten.

Veggen kan etableres som en overordnet åpen løsning ved å installere rørene uten «vinger», eller med valgt åpen avstand imellom rørene for å sikre vanntransport i grunnen tvers av vegg. Forutsatt at løsmassene ikke domineres av finstoff, f.eks. leire eller løs sand.



Figur 6 Skjøting mellom rørene i rørsputtvegg.

I utgangspunktet beregnes og velges rørveggen rammet til dybde som sikrer veggen å ha geoteknisk stabilitet uten bakforankring. Slik valgt veggdybde vil bidra til å dempe vannstrømrespons og redusere vannutveksling mellom de 2 sidene av veggen som funksjon av flo og fjære. Spuntdybden kan økes for i større grad kunne påvirke strømmingen under spuntspissen. Valg av relativt stor spuntdimensjon (rørdiameter) vil gi tilfredsstillende løsning som ikke krever boring av skrå forankringsstag innover til f.eks. berg under innenfor liggende kulturlag. Evt. ønske om noe redusert rørdiameter kan løses ved å øke styrke og stivhet i rørene vha innstøpt stålkjerne/H-bjelke og/eller armering.

Fyllmaterialet fra ca. 1920 på Bryggen er tolket som relativt grovt og vurderes godt og enkelt å gi gode grave- og fundamenteringsforhold i den aktuelle dybde for rørkulverten. Utgravingen etableres som grøft inntil 4,0 m netto dybde under nåværende veg med spuntavstiving mot nåværende kjørebane og ny bybane. Mot ytterkant forutsettes relativt fri graveskråning mot innerkant kaimuren. Grøften forutsettes å stå kontinuerlig oppfylt med vann opp til den varierende grunnvannsstand med vannstand sannsynlig lik sjøvannstanden. Korn sammensetningen i fyllmassene styrer permeabilitet og vanngjennomstrømning i dag og med installert spunt. Med rimelig innsats er godt plasserte piezometere for å måle grunnvannsstanden f.eks. hver halvtime, et bidrag for å estimere permeabiliteten.

En uavstivet (uforankret) rørsputtvegg er hittil beregnet med dybde mellom 10 og 14 m under gateplan. Med tydelig effekt på redusert strømning forbi spuntveggen. Beregnings eksempel i FEM modell er vist i figur 6 med sterkt forstørret forskyvning.

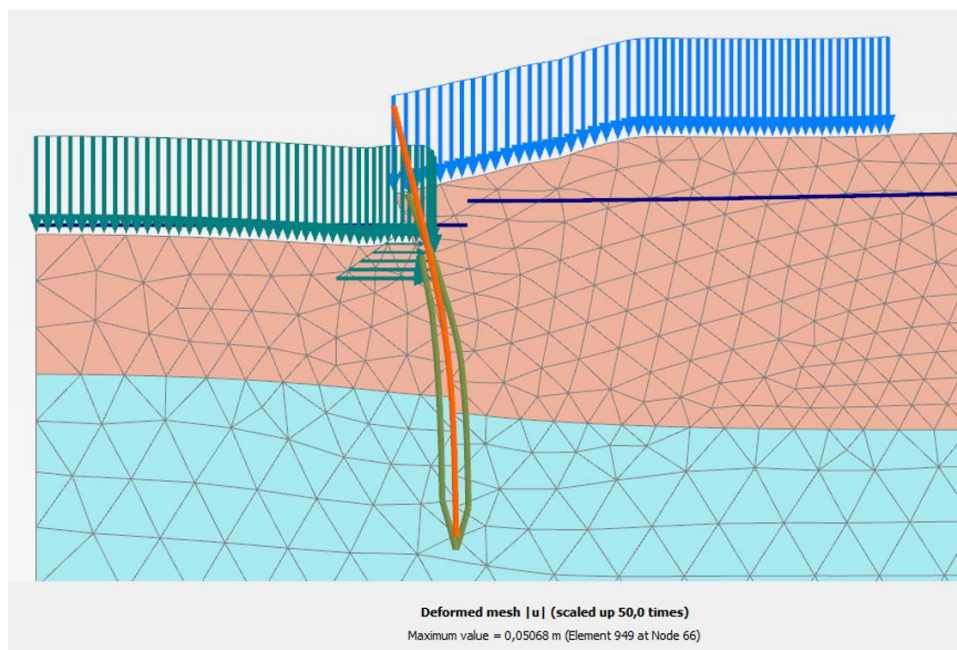
De utførte beregningene viser at spuntdimensjon RD270x10 (270 mm diameter) er tilstrekkelig for en forankret konstruksjon, mens valg av «svevespunt» uten forankring krever at rørdimensjonen økes til RD400x10 (400 mm diameter).

Det er i forprosjektet kun kontrollberegnet for et snitt i Bryggen-området med størst dybde til fjell. Grunnforholdene mht laggrenser vil variere betydelig langs traseen. Lengst sørøst vil for eksempel bunnen av spunten trolig måtte bores inn i berg. Dette er gunstig og enklere også mht stabiliteten til stålkonstruksjonen.

For deler av spunten, for eksempel ved Rundetårnet, skal spunten sikre konstruksjonen i byggefasen. Det kan her være behov for å avstive med stag av hensyn til setninger på baksiden av spunten. Om spunten i dette området skal stå permanent er ikke avklart.

Et ønske om å avgrense sonen for stabilisert høyde av grunnvannsstanden kan gi deler av veggen på Bryggen løsnung med permeabel vegg. Dvs. noe avstand mellom rør uten «vinger» i spuntvegg. Dissene sonene er aktuelle lengst nord og sør. En 3D-simulering av grunnvannet med strømning bak variert spunttetthet er ikke gjennomført.

Deformasjonen horisontalt av spuntveggen blir beregningsmessig større uten forankring. Med konservativt valgt (lav) stivhet i løsmassene bak spunten vil den beregnede deformasjon sannsynligvis bli større enn reelt. En sannsynlig høyere, men ikke dokumentert jordstivhet (og tetthet) vil kunne gi relativt mindre deformasjoner inn mot byggegropen. Små deformasjoner i byggefasen vil prinsipielt gi en liten risiko for vedlikehold av veg og preparering for øvre del av banetraséen. Fordelen med å velge uavstivet spuntvegg er først og fremst å unngå å montere de relativt kompliserte, steile forankringsstagene. Forankringsstag med helning 45° ville gitt sannsynlig injisert forankring i berg foran den gamle indre kaifronten i det forventet mest følsomme kulturområdet på Bryggen.



Figur 7 Illustrasjon av beregning av uavstivet spunt (orange strek) med sterkt overdrevet illustrert deformasjon i vannfylt grop mot belastet terreng og grove antakelser om varierte løsmasser.

En sammenskjøttet uforankret rørsput gir i størrelse 50 mm beregnet horisontal forskyvning av topp vegg basert på antatt konservative lave jordparametere. Mindre forskyvning kan oppnås ved betongfylt og armert kjerne og innstøpt f.eks. H-bjelke.

Dersom man tillater avgrenset eller redusert vannstrøm i jorda som følge av tidevann, kan en spuntvegg som ikke er kontinuerlig og tett velges. F.eks. med 400 mm spuntvegg uten skjøtelåser som monteres med 2-300 mm mellom hver spuntstål. Slike valg påvirker ståldimensjonen, avstand mellom hver spuntstål, spuntdybde og evt. behov for horisontal forankring av veggen. Spuntveggene vi uansett ha en sammenbindende horisontal avstiving på innsiden av spuntveggen.

Topp av permanent spuntvegg i høyt nivå for minimering av grunnvannsstrøm må tilpasses fremtidig gatenivå for å unngå at spunt påvirkes av belastningen fra trafikk. Dvs. den permanente spunt gir, ved meget høy sjø, innlekking over spunten til området innenfor spuntvegg. Løsninger for raskt å drenere ut grunnvann fra en flom hendelse er mulig med f.eks. en «ventil» for hver 10 meter frontlinje.

For å ha sikrest mulig løsning mht god spuntstivhet og redusert total vannutstrømning mot vannfylt grøft vurderes seksjonsvis lengde for grøfteutgraving i størrelse 15 m og tilbakefylling av rimelig permeable gode fyllmasser før neste gravefase. Det gjør at man kan opprettholde rimelig strømning av grunnvann ut av og inn mot kulturlagområdet.

5 Supplerende grunnundersøkelser

De utførte grunnundersøkelser hadde som mål å gi grunnlag for konseptvalg omkring ny rørkulvert og fundamentering av bybanen som gir minst mulig belastning av hhv grunnvannsstand i bevaringsområde og kulturlag under banespor.

En tredje fase av grunnundersøkelse er planlagt i forprosjektet for i større grad

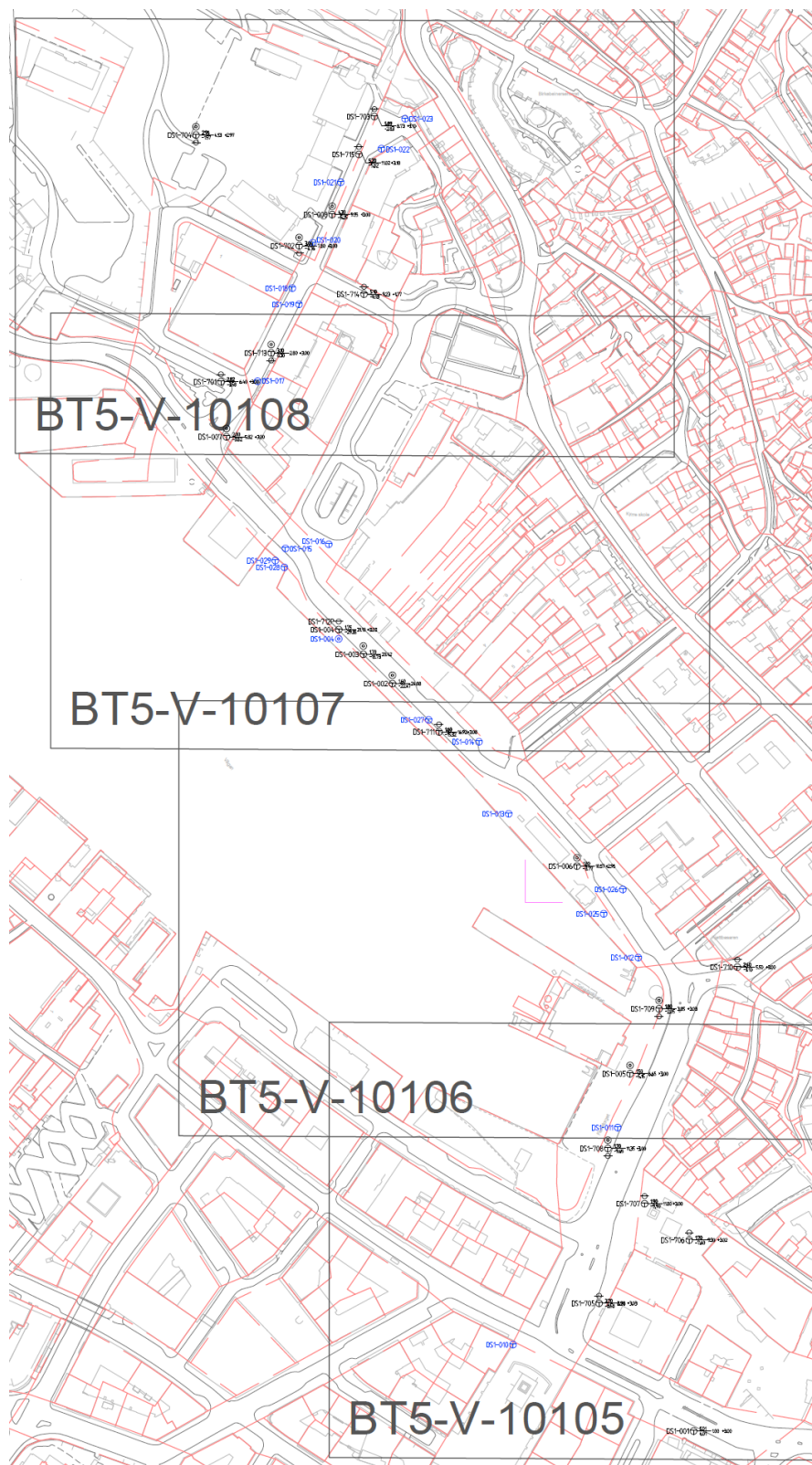
- Å oppnå rimelig jevn undersøkelse av undergrunn langs banesporet vha standard totalsondring og stedvis prøvetaking for jevnere oversikt over dybde til fjell og bedre kartlegging av varierende fyllmasser over originale geologiske avsetninger (antatt leirig morene)
- Grunnvannstandsinstrumentering i større omfang for bedre å etablere et grunnlag for å vurdere strømning innover Bryggen og følge grunnvannets forhold til tidevannsvariasjonene
- En tettere undersøkelse langs Sandbrogaten for å styrke tolket overkant av kulturlag og grunnvannsspeil
- En miljøkontroll av de øvre 2-5 m løsmasser samordnes med grunnundersøkelsene

For Bryggen vil dette styrke grunnlaget for å vurdere permeabilitet i fyllmassene og om kulturlaget har betydning for vurdering av grunnvannsstrøm under spissen av spuntvegg.

For overgang mellom gammelt spor i Kaigaten til nytt spor mot og opp Christies gate vil nåværende sporkonstruksjon og setningserfaringer bli et viktig kriterium for nytt spor og utvidet holdeplass.

I figur 8 illustreres utførte grunnboringer (svart) og foreslåtte supplerende undersøkelser (blått). Grunnvannstandsmålere på spesielt Bryggen er en del av dette og mulighet for geoteknisk prøvetaking vurderes etter sonderingene. Miljøforholdene undersøkes i 6 nye posisjoner.

For bedre vurderinger av lagdeling mellom fyllmasser, original grunn og kulturlag ønskes undersøkt av Riksantikvaren i 16 av de geoteknisk foreslåtte 18 posisjoner samt 5 grunnvannsbrønner.



Figur 8 Grunnboringer planlagt av geoteknikk, hydrogeologi og miljøteknologi for delstrekning DS1. Blå markerer nå planlagte suppleringer.

6 Anbefalt løsning

6.1 Oppsummert anbefaling

For å etablere grøft for infrastruktur anbefales uforankret spuntvegg langs Bryggen og inn på Torget. Detaljer omkring løsmasser og deformasjoner avgjør om stivhet skal styrkes med f.eks. innstøpt H-bjelke og armering. Seksjonsvis utgraving på f.eks. 12-15 m lengde sikrer å redusere drenering av området innenfor grøft mot bebyggelsen ved midlertidig pumping for kobling av rør. Korte grøfteseksjoner kan også bidra til å redusere horisontal deformasjon av spunttopp til mindre enn maksimalt beregnet 50 mm.

Hvorvidt spuntveggen bør være tett eller åpen kan vurderes senere. I utgangspunktet er det lagt opp til en tett løsning foran Bryggengårdene, for å bremse tilførsel av nedbrytende sulfater fra tidevannet. Spuntveggen vil imidlertid stå som åpen rørvegg langs resten av Bryggen, og bidra til å opprettholde dagens gjennomstrømming i massene. Dette vil være det mest gunstige ved Finnegården, og den øvrige bebyggelse med kjellere.

Generelt velges løsninger som ikke gir tilleggsspenning som konsekvens av ny bærekonstruksjon for banesporet i Sandbrogaten. Det løses godt med bruk av det lette bearbejdede materialet Glasopor løsmasse som del av bærekonstruksjon ved oppfylling i nyetablert spor under betong i ca. 1 m dyp grøft. Den nye bærelagspakken med i størrelse 40 % Glasopor i det nær 1 m dype nye bærelaget under baneskinnene gir en god løsning.

Kompensert vekt kan være gunstig og sikkert i den øvrige DS1 traséen og i hvert fall i overgangen fra Bryggen og inn på Torget og mellom Kaigaten og Christies gate.

6.2 Videre arbeid - registrerte problemstillinger

Den planlagte supplerende grunnundersøkelsen vil støtte det skisserte beslutningsgrunnlaget for valg av spunt og bærelagsberegninger. Suppleringene er planlagt å utgjøre 40 % av den totale grunnundersøkelse i ca. 40 posisjoner i traseen. Det fokuseres spesielt på lagdelinger og grunnvannsnivå og stedvis mer detaljert karakteristikkk vha prøver.

For endelig prosjektering og vurderinger av setningsrisiko for sporet kan mer detaljert undersøkelse og vurdering av stivhet i leirige avsetninger og humusholdige masser bli nyttig for endelig valg mht omfang masseutskifting med vektkompensering i Kaigaten og over Torget.

7 Referanser

- 7.1 Nilmar Janbu, «Grunnlag i geoteknikk», Tapir, 1974
- 7.2 5187619 Bybanen BT5 Geoteknisk datarapport RA-DS1-004_J02
- 7.3 SSAB, RD pile wall - Design and installation manual, 2019.
- 7.4 NGU “Kart på nett”, med kartene “Løsmasser og Marin grense” og “NADAG”. [Kart på nett | Norges geologiske undersøkelse \(ngu.no\)](#)
- 7.5 5187619 Bybanen BT5 Geotekniske vurderinger, spunt over Bryggen NO-Ds1-031