

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 1 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5



Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 2 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

1	Revisjons-/Endringslogg	3
2	Innledning	4
2.1	Referanser	5
2.2	Forkortelser	5
3	Avgrensninger og premisser	6
3.1	Områdeavgrensning – Kaigaten – Sandbrogaten	6
3.2	Premisser	6
3.3	Risikovurdering	7
4	Dimensjonerende faktorer – Bybanesystemet	8
4.1	Dimensjonerende faktorer - Variobahn	8
5	Vurdering – Alternative løsninger	9
5.1	Retrofit – Variobahn modul 6	9
5.1.1	Vurdering – Risiko.....	10
5.2	Retrofit – Variobahn – Komponentdistribusjon	11
5.2.1	Vurdering – Risiko.....	12
5.3	Nytt vognmateriell.....	13
5.3.1	Vurdering – Risiko.....	13
6	Kapasitetsanalyse – System/Infrastruktur	14
6.1.1	Vurdering	14
7	Økonomi – Livssyklus kostnader.....	15
8	Vurderinger og anbefalinger	16

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 3 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

1 Revisjons-/Endringslogg

Utgave #	Beskrivelse	Sign	Dato
1.0	Første utgave av dokumentet	SD	06.02.2020
2.0	Tydliggjøring og presiseringer	SD	11.02.2020

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 4 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

2 Innledning

Dette notat er en del av Bybanen AS sin leveranse til Bergen kommune i forbindelse med regulering av Bybanen byggetrinn 5 fra Bergen sentrum til Åsane.

Notatet omhandler vurderinger knyttet til batteri- og/eller kondensatorløsninger for fremføring av sporvogn på strekningen fra holdeplass i Kaigaten, over bryggen, og videre til holdeplass i Sandbrogaten. Dette som alternativ til konvensjonelt kontaktledningsanlegg på aktuell strekning.

Det har som underlag for notatet blitt utført dynamiske simuleringer knyttet til effekt- og energiforbruk for aktuell strekning.

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 5 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

2.1 Referanser

Ref #	Dokument		
	Nummer	Revisjon/ Dato	Navn
1.		05.02.2019	Bybanen - Teknisk regelverk for prosjektering og bygging
2.		25.06.2019	Alternativ energi – Torget-Bryggen – Bybanen BT-5
3.		09.01.2020	DS 1 – Gjeldende trasé Pr 0-750 (foreløpig)
4.		09.01.2020	DS 1 – Gjeldende trasé Pr 750- 1500 (foreløpig)
5.	DR_01_20190319	03.06.2019	Bybanen til Åsane, Driftsopplegg
6.	PE_1200279_veh icle description rev.03	30.07.2014	Description of the 7 module-vehicle for Bergen (Variobahn)
7.	PE_1200290- AE.4006- 4_Gewicht 7- Teiler_rev03	13.11.2014	Vehicle Weight Variobahn Bergen 7-T

2.2 Forkortelser

BT	Byggetrinn
LIC	Lithium Ion Capacitor
LTO	Lithium Titanate Batteries (O – Oxide)

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 6 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

3 Avgrensninger og premisser

3.1 Områdeavgrensning – Kaigaten – Sandbrogaten

Aktuell strekning som i dette notatet evalueres for batteri- og/eller kondensatorløsninger er fra holdeplass i Kaigaten, via Torget og bryggen og videre til holdeplass i Sandbrogaten. Trasé med kurvatur og hastighetsprofil er gitt av [3] og [4].

3.2 Premisser

I vurderingene legges det til grunn følgende premisser:

- Bybane traséen til Åsane er ferdig regulert i desember 2022.
- Tidligste tidspunkt for idriftsettelse av trasé til Åsane er juni 2030.
- Bybanen sin vognpark for personbefordring må kunne fremføres på hele Bybanen sitt linjenett.
- Eksisterende strømforsynings- og kontaktledningsanlegg (investeringer i BT-1 – BT-4) utnyttes/gjenbrukes.

Premissene betinger en løsning der vogner må kunne operere både på eksisterende kontaktledning- og strømforsyningsanlegg og på eventuell kontaktledningsfri delstrekning.

Tidspunkt fra ferdig regulert trasé (desember 2022) til idriftsettelse av ny trasé (juni 2030) gir 7,5 år for å realisere aktuell applikasjon med vognmateriell for kontaktledningsfri fremføring over aktuell strekning i henhold til definerte tilgjengelighetskrav [1].

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 7 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

3.3 Risikovurdering

I arbeidet vurderes risiko knyttet til å realisere applikasjonen på følgende alternative måter:

- Retrofit av eksisterende vognmateriell innenfor definert profil (Variobahn modul 6)
- Retrofit av eksisterende vognmateriell (Variobahn) uten begrensinger gitt av dagens komponenter og komponentdistribusjon/taklayout.
- Nytt vognmateriell

Med risiko i denne kontekst menes sannsynlighet og konsekvens forbundet med å realisere aktuell applikasjon innenfor tidsrammen av 7,5 år, fra ferdigstillelse av reguleringsarbeid i desember 2022 til åpning av linjen til Åsane i juni 2030. Konsekvensen av å ikke kunne gjennomføre rutetrafikk over aktuell strekning grunnet valg av ikke realiserbar løsning defineres som alvorlig/uakseptabel. Det er i arbeidet gjort en vurdering av sannsynlighet for at de ulike alternativene vil la seg implementere og dette vil danne grunnlag for aktuell risiko forbundet med løsningen.

Aktuell batteri- og/eller kondensatorløsning er ikke ansett kvalifisert for nordiske forhold. Det legges til grunn for alle alternative løsninger at det gjennomføres et kvalifikasjons- og testprogram som tiltak for å imøtekomme tilgjengelighets- og pålitelighetskrav [1] i forbindelse med en eventuell innfasing og igangkjøring av ny trasé og vognmateriell. På den måten vil man kunne redusere de negative konsekvensene ved innføring av ny teknologi og flere teknologielementer.

Et eventuelt program for innfasing av batteriløsninger må som et minimum inneholde følgende elementer:

- Engineering/prosjektering
- Ombygging/modifikasjon
- Teknologi- og systemkvalifikasjon
- Godkjenninger
- Test og verifikasjon i henhold til tilgjengelighetskrav
- Serieleveranse
- Innfasing og idriftsettelse (juni 2030)

I løpet av en 7,5 års periode fra slutføring av reguleringsarbeid i desember 2022 til åpning av traséen til Åsane i juni 2030 er det rimelig å anta at det generelle kvalifikasjonsnivået for aktuelle batteri- og/eller kondensatorløsning vil bli ytterligere hevet.

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 8 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

4 Dimensjonerende faktorer – Bybanesystemet

Dimensjonerende faktorer for bybanesystemet (infrastruktur og vogn) er:

- Maksimal aksellast for Bybanen spor – 120kN¹ [1].
- Maksimal aksellast for Variobahn – 12 tonn [6].
- Maksimal vognhøyde inkludert komponenter på taket (eksklusiv strømvogter) – 3,6 meter [1].

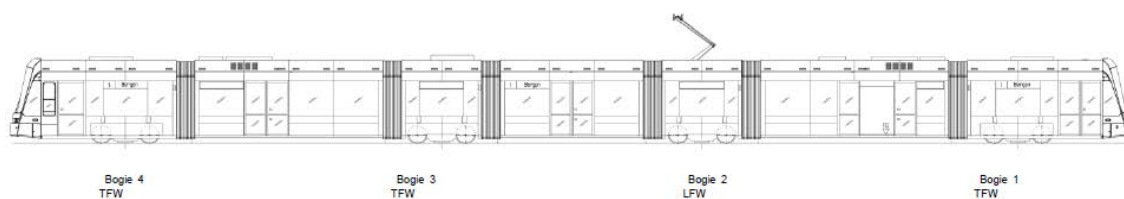
En maksimal aksellast på 12 tonn samt maks vognhøyde på 3,6 meter videreføres som et premiss for nåværende og fremtidige systemer inkludert løsninger for kontaktledningsfri fremføring.

4.1 Dimensjonerende faktorer - Variobahn

Bybanen sine vogner (Variobahn) består av syv moduler med fire bogie. Hver bogie har ved full last (maks antall passasjerer + marginer) aksellaster [7] gjengitt i Tabell 1.

Bogie nr	Aksel nr	Aksel last (tonn)
1	1	10,320
1	2	10,320
2	1	10,883
2	2	10,883
3	1	11,922
3	2	11,922
4	1	10,199
4	2	10,199

Tabell 1: Aksellast - Full vogn



Figur 1: Bybanen - Variobahn

Vognen har en maksimal høyde på 3,39 meter. Det er traksjon på bogie 1, 3 og 4. Bogie 2 er en løpebogie. Traksjonselektronikken (3.stk konvertere) er plassert på taket av modul med tilhørende traksjonsbogie.

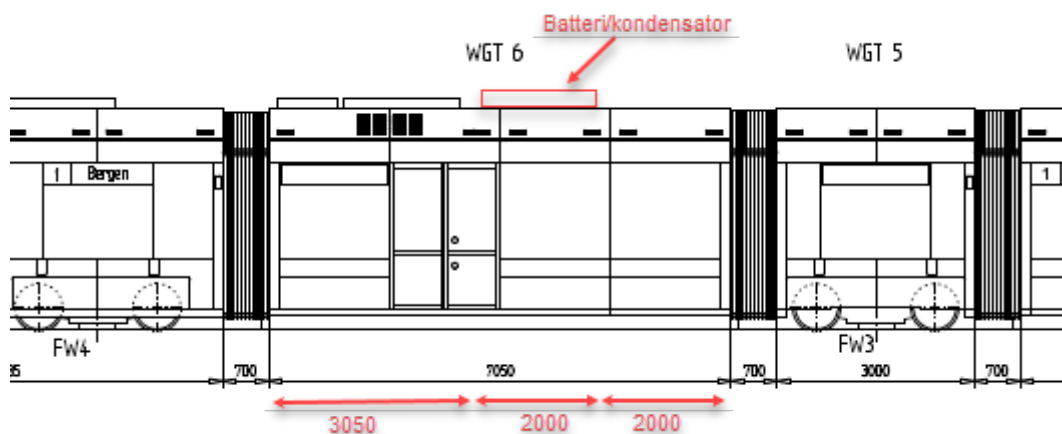
¹ 1kg = 9,8066 N. 120 kN = 1,223 tonn

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 9 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

5 Vurdering – Alternative løsninger

5.1 Retrofit – Variobahn modul 6

Retrofit løsning med batteri- og/eller kondensator teknologi montert på Variobahn modul 6 er omhandlet i notatet «Alternativ energi – Torget-Bryggen – Bybanen BT-5» [2]. Det aktuelle notat omhandler strekningen Torget-Sandbrogaten.



Figur 1: Batteri-/kondensator lokasjon - Modul 6



Figur 2: Bilde av mulig batteri-/kondensator lokasjon - Modul 6

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 10 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

Dynamiske simuleringer av strekningen Kaigaten-Sandbrogaten ved bruk av LTO teknologi viser utfordringer knyttet til akselerasjon og vognfremføring i trasé med stigning. Utfordringen er i stor grad knyttet til motorenes virkningsgrad som er lav ved lave turtall. Dette medfører vesentlige tap ved oppstart, akselerasjon og fremføring i lave hastigheter.

Dynamiske simuleringer viser at et LTO-batteri på 15kWh (300kg) plassert på modul 6 (Figur 1 og Figur 2) ikke har nok effekt til å kunne sette vognen i bevegelse ved null stigning. Dvs at vognen ikke vil kunne bli satt i bevegelse hverken fra Kaigaten- eller fra Torget holdeplass.

Fra Kaigaten holdeplass er det en stigning på 48 ‰ i retning Torget. Simuleringer viser at et startforløp fra Kaigaten holdeplass vil trenge en effekt på 300 kW (peak) for å akselerere til en hastighet på 8 km/h før hastigheten vil falle til omtrent 4 km/h. For å oppnå den aktuelle hastighetsprofil trengs det et batteri på 40kWh. Dette tilsvarer et batteri på ca 700 kg, dvs 400kg mer en tilgjengelig vekt for modul 6.

Dynamiske simuleringer av vognfremføring fra Kaigaten til Sandbrogaten viser et netto energibehov på 12,5kWh. Behovet er beregnet med redusert ytelse både i forhold til hastighetsprofil og auxiliary forsyning (kjøling/varme, internforbrukere). «Alternativ energi – Torget-Bryggen – Bybanen BT-5» [2] viser at en løsning basert på en 300kg LIC kondensatorløsning vil gi 2-4 kWh, dvs vesentlig under behovet på 12,5kWh for fremføring på strekningen Kaigaten-Sandbrogaten.

5.1.1 Vurdering – Risiko

Sannsynligheten for at et systemdesign (infrastruktur/vogner) basert på LTO og/eller LIC teknologi lokalisert på modul 6 ikke lar seg realisere vurderes som høy. Konsekvensen av å ikke kunne gjennomføre rutetrafikk over aktuell strekning er uakseptabel.

Risiko for at et systemdesign (infrastruktur/vogner) basert på LTO og/eller LIC teknologi lokalisert på modul 6 ikke skal la seg realisere vurderes som høy. Teknologigapet i dagens LTO teknologi (effektthet) vurderes til å være for stort i forhold til å oppnå nødvendig effekt for fremføring på strekningen Kaigaten - Sandbrogaten og Torget – Sandbrogaten.

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 11 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

5.2 Retrofit – Variobahn – Komponentdistribusjon

Variobahn har et kompakt design der vognens vekt (86,6 tonn) fordeler seg over 8 aksler. Det er i opprinnelig design vektlagt god vedlikeholdbarhet ved at delsystemer er lett tilgjengelig for personell som skal utføre preventivt- og korrektivt vedlikehold. Den gode vedlikeholdbarheten sikrer god tilgjengelighet, punktlighet og regularitet. Figur 3 viser komponentdistribusjon på taket av Variobahn. Figur 4 viser tilgjengelighet til delsystem (vekselretter) på Variobahn.



Figur 3: Komponentdistribusjon på taket av Variobahn



Figur 4: Tilgjengelighet til delsystem

I videre vurderinger er det lagt til grunn at det vil være oppnåelig å tilrettelegge for batterimoduler på minimum 700 kg ved å bytte ut eksisterende komponenter plassert på taket og/eller distribuere komponenter på en mer kompakt måte.

Simuleringer indikerer at man ved et LTO-design vil kunne oppnå en fremføring på strekningen Kaigaten - Sandbrogaten på 5 minutter med et tilhørende energibehov på 12,5 kWh. Det er da lagt til grunn et batteri på 40kWh/300kW/700kg. Man vil

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 12 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

med en slik løsning oppnå en robusthet ved at man kan fremføre vogn over den aktuelle strekningen flere ganger uten å måtte lade batteriene (avvikshåndtering). Fremføring på strekningen Sandbrogaten - Kaigaten er estimert til 4,5 minutter med et energibehov på 9 kWh.

Det er i prosjektering [5] lagt til grunn en reisetid fra Kaigaten til Sandbrogaten på 4 minutter. Videre detaljprosjektering vil kunne avdekke om økt batterikapasitet, endret hastighetsprofil og/eller ytterligere redusert auxiliary-effekt vil kunne redusere kjøretiden til 4 minutter.

5.2.1 Vurdering – Risiko

Sannsynligheten for at et systemdesign (infrastruktur/vogner) basert på LTO-teknologi og modifisert/endret komponentdistribusjon ikke skal la seg implementere vurderes som lav. Konsekvensen av å ikke kunne gjennomføre rutetraffic over aktuell strekning er uakseptabel.

Risiko for at et aktuelt systemdesign (infrastruktur/vogner) ikke lar seg realisere med redusert ytelse² vurderes som lav.

Risiko for at et aktuelt systemdesign (infrastruktur/vogner) ikke lar seg realisere uten begrenset ytelse vurderes som medium.

Det presiseres at aktuell teknologi ikke er ansett kvalifisert for nordiske forhold. Det legges til grunn at det må gjennomføres et kvalifikasjons- og testprogram som tiltak for å sikre oppnåelse av definerte tilgjengelighets- og pålitelighetskrav (ref kapittel 3.3).

² Med redusert ytelse menes begrensnig i akselerasjons- og hastighetsprofil og/eller redusert auxiliary forsyning (kjøling/varme og internforbrukere).

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 13 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

5.3 Nytt vognmateriell

Det finnes flere referanseprosjekter som underbygger at aktuell applikasjon vil kunne la seg realisere ved anskaffelse av nytt vognmateriell. Dette er ytterligere underbygget i vurderingene i dette notat (Kapitel 5.2).

5.3.1 Vurdering – Risiko

Sannsynligheten for at et systemdesign (infrastruktur/vogner) basert på LTO-teknologi på nye vogner ikke vil la seg realisere vurderes som lav. Konsekvensen av å ikke kunne gjennomføre rutetrafikk over aktuell strekning er uakseptabel.

Risiko for at aktuelt systemdesign (infrastruktur/vogner) med nye vogner ikke lar seg realisere vurderes som lav.

Det presiseres at aktuell teknologi ikke er ansett kvalifisert for nordiske forhold. Det legges til grunn at det må gjennomføres et kvalifikasjons- og testprogram som tiltak for å sikre oppnåelse av definerte tilgjengelighets- og pålitelighetskrav (ref kapittel 3.3).

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 14 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

6 Kapasitetsanalyse – System/Infrastruktur

Analysen og simuleringer viser at en løsning basert på LTO teknologi med reduserte ytelser (ref Kapittel 5) vil ha et energibehov på 12,5 kWh ved fremføring på strekningen Kaigaten – Sandbrogaten og 9 kWh på strekningen Sandbrogaten-Kaigaten.

En LTO-batteriløsning på 40kWh vil ha en lade karakteristik begrenset til 120kW (160A @ 750V) RMS. Effekttillegget vurderes som signifikant i forhold til kapasitet i strømforsyningsanlegget. De bør dermed gjøres en vurdering knyttet til å redusere maksimal ladestrøm for en eventuell LTO-batteriapplikasjon. Behovet for en eventuell begrensning av ladestrøm må sees i sammenheng med andre forbrukere (frekvens/kjøretid).

Det bør søkes å oppnå energibalanse ved at man ved fremføring på kontaktledningsanlegget tilfører minimum den energien til batteriet som kreves for å gjennomføre fremføring over den kontaktledningsfrie strekningen.

Estimert kjøretid fra Sandbrogaten til NHH er 7 minutter [5]. Med en antatt vendetid på 3 minutter gir dette 17 minutter med tilføring av energi fra strømforsyning/kontaktledningsnett. Energibalanse ved fremføring over strekningen Sandbrogaten - Kaigaten krever tilførsel av 9kWh. Dette gir et kontinuerlig ladebehov på 32kW (43 A @ 750V) over 17 minutter. Dette vurderes som ikke signifikant i forhold til strømforsyningsanlegget.

6.1.1 Vurdering

Kapasitetsanalyser av strømforsyningsanlegget indikerer at det ikke er behov for regulering (område/areal) for hurtiglading av batteri på holdeplassene i Kaigaten, på Torget og i Sandbrogaten for en applikasjon med begrenset ytelse.

For å oppnå energibalanse og sikre tilstrekkelig effekt i en applikasjon uten vesentlig begrenset ytelse så vil videre prosjektering måtte avklare om kraftforsyningen på enkelte strekninger med kontaktledningsanlegg må forsterkes.

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 15 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

7 Økonomi – Livssyklus kostnader

Det er ikke funnet referanser fra banesystemer som har gjort vesentlige ombygginger (ref kapittel 5.2) av vogner for å tilpasse systemet til batteri- og/eller kondensatordrift. Investeringskostnadene for en slik løsning er dermed ukjent.

En batteriløsning vil gi endrede forutsetninger for vedlikehold (preventivt/korrektivt). Nye- og flere teknologielementer vil gi en redusert pålitelighet og tilgjengelighet. Behovet for mer intensivt vedlikehold øker.

De nye elementene vil ha negativ påvirkning på punktlighet og regularitet. Dette kan i noen grad kompenseres med økt vedlikehold (preventivt/korrektivt) og eventuell anskaffelse av mer materiell (investering i flere vogner og reservedeler).

Dersom aktuell applikasjon skal realiseres ved anskaffelse av nye vogner så vil et salg av eksisterende vognpark være aktuelt. Eksisterende vognparks karakteristiske egenskaper vil ha betydning vognenes markedsverdi. Vognens bredde (2,65 meter), vognens dynamiske egenskaper (multiartikulasjonsvogn) og vognens høye aksellast (12 tonn) gjør at markedet for vognparken er begrenset.

Bybanen AS	Alternativ energi Kaigaten-Sandbrogaten Bybanen BT-5	Side: 16 / 16
Dokumentansvarlig: Stein Dvergsnes	Dato: 11.02.2020	Utgave: 2.0

8 Vurderinger og anbefalinger

Vurderingene i dette notatet underbygger at en applikasjon basert på batterifremdrift på strekningen Kaigaten-Sandbrogaten teoretisk sett skal la seg implementere. Ytelsene og realiserbarheten knyttet til en slik løsning er forbundet med usikkerhet. Det må understrekes at den tekniske løsningen som er aktuell for kontaktledningsfri drift mellom Kaigaten og Sandbrogaten foreløpig ikke vurderes som kvalifisert for nordiske forhold, ref. avsnitt 3.3.

Leverandør av vognmateriell har tidligere ikke gitt mulighetsrom for ombygginger utover det aktuelle området på modul 6 som er vurdert som ikke realiserbart. Vi er ikke kjent med at større ombygginger lik den som er vurdert i dette notatet er gjort i andre tilsvarende bybanesystemer, og investerings- og driftskostnader forbundet med en større ombygging er ukjent.

En reduksjon i pålitelighet og tilgjengelighet i systemet innebærer i praksis økt sannsynlighet for at vognmateriellet feiler, med full stans i trafikken som mulig konsekvens. Etter åpning av byggetrinn 5 til Åsane vil systemet være spesielt sårbart ved eventuelle vognfeil som oppstår i sentrum da sentrumsstrekningen vil kunne inngå i både nordgående, vestgående og sørgående linjer, og en stopp her vil dermed medføre konsekvenser for hele Bybanesystemet. Det bør derfor søkes løsninger som gir lavest mulig risiko knyttet til full stopp i dette systemet.

De mulige negative konsekvensene knyttet til usikkerhet i løsning, redusert pålitelighet, tilgjengelighet, punktlighet og regularitet, både ved større ombygging av eksisterende vognpark og ved eventuell anskaffelse av nye vogner, gjør at det anbefales at strekningen Kaigaten-Sandbrogaten reguleres for et enkelt kontaktledningsanlegg.