Pilotprosjekt elektrisk vei

Sluttrapport



Innhold

Sammendrag 4
Summary (English) 6
Sentrale begreper og definisjoner 9
1. Introduksjon 10
1.1. Bakgrunn og formål 10
1.2. Prosjektvarighet og økonomiske rammer 11
2. Induktiv lading 12
2.1. Prinsipper for induktiv energioverføring 12
2.2. Utbredelse 14
2.3. Sentrale aktører 16
2.4. Tekniske utfordringer 17
2.5. Muligheter for videre teknologiutvikling 18
3. Organisering og forarbeider 19
3.1. Organisering 19
3.2. Faser og aktiviteter 20
3.2.1. Teknologianskaffelse 20
3.2.2. Bussmateriell 21
3.2.3. Prosjektering 23
3.2.4. Utbygging 23
3.2.5. Testing 24
3.2.6. Drift 27
4. Utbygging og drift 29
4.1. Infrastruktur for dynamisk trådløs lading 29
4.2. Infrastruktur for statisk trådløs lading 41
5. Resultater og analyser 45
5.1. Vintertesting 45
5.2. Måling av ladeeffekt og virkningsgrad 47
5.3. Statisk lading og virkningsgrad som funksjon av posisjon 48
5.4. Innvirkning fra bakkeklaring på virkningsgrad 50
5.5. Ytelse og virkningsgrad ved dynamisk lading 51
5.6. Måling av magnetfelt 54
5.7. Oppvarming av fremmedlegemer på veibanen 58
5.7.1. Overkjørt aluminiumsboks 58
5.7.2. Magnetisk objekt med stor termisk masse 60
5.7.3. Magnetisk objekt med lav termisk masse kombinert med brennbart materiale 61
5.7.4. Test med deteksjonssystem for oppvarming av fremmedlegemer 63
5.8. Operasjonelle erfaringer 63
6. Mulige bruksområder for el-vei i Trondheim 64
6.1. Konsept 1 – Optimalisert for AtBs behov 66

6.1.1. Beskrivelse 66
6.2. Konsept 2 – Etablering koordinert med planlagte veiprosjekter 68
6.2.1. Beskrivelse 68
6.3. Konsept 3 – Statisk lading på sentrale punkter 70
6.3.1. Beskrivelse 70
6.4. Sensitivitetsanalyse 72
6.4.1. Kostnader 72
6.4.2. «Worst case» energiforbruk 73
7. Læringspunkter 75
7.1. Prosjektgjennomføring 75
7.1.1. Prosjektorganisering 75
7.1.2. Tidsplan 76
7.1.3. Anskaffelse 76
7.1.4. Prosjektering 77
7.1.5. Utbygging 77
7.1.6. Drift 78
7.2. Ladeteknologi 81
7.3. Bussmateriell 83
8. Konklusjoner og anbefalinger 84
8.1. Overordnet vurdering av teknologien 84
8.2. Vurdering av oppnåelse av prosjektmål 85
8.2.1. Teknisk funksjonalitet og stabilitet 86
8.2.2. Funksjon i kaldt og fuktig klima 86
8.2.3. Sikkerhet 86
8.2.4. Kunnskapsspredning 86
8.2.5. Praktisk bruk 86
8.2.6. Praktisk gjennomførbarhet 86
8.2.7. Bussintegrasjon 87
8.2.8. Standardisering og interoperabilitet 87
8.2.9. Modell for eierskap og drift 87
8.2.10. Økonomi ved storskala bruk 87
8.2.11. Langsiktig holdbarhet 87
8.3. Muligheter, usikkerheter og risikoer 88
8.3.1. Muligheter 88
8.3.2. Usikkerheter og risikoer 89
8.3.3. Kostnader og lønnsomhet 90
8.3.4. Modell for utbygging, eierskap og drift 90
8.4. Anbefaling om veien videre 92
9. Vedlegg 94
9.1. SLD installasjon for dynamisk trådløs lading 94
9.2. Oversiktstegning installasjon for dynamisk trådløs lading 95
9.3. Tegning av kabelgrøfter 96

9.4. Tegning av oppbygning av vei 97
9.5. Tegning av veiprofil med plassering av ladesegmenter 98
9.6. 99
9.7. Måleresultater fra delkapittel 5.3 99
9.8. Metodebakgrunn for kapittel 6 100
9.8.1. Filter for ruter per hverdag 100
9.8.2. Mapping av holdeplasser 100
9.8.3. Energimodell – SINTEF SME2C 100
9.8.4. Kjøretøydefinisjoner 101
9.8.5. Levelisert kostnad (LC) 101
9.8.6. Forutsetninger og parametere 102

Sammendrag

Trådløs lading er teknisk gjennomførbart og robust: Piloten oppnådde over 99 % oppetid og viste stabil drift under ordinære norske vær- og vinterforhold. Det ble ikke påvist større HMS-utfordringer.

Fullskala innføring krever god samhandling og planlegging: Utbygging i vei bør fortrinnsvis samordnes med veifornyelse for å redusere kostnader, risiko og trafikale konsekvenser. Statisk trådløs lading på holdeplasser og i depot er raskere og enklere å etablere.

Trådløs lading er et reelt alternativ – men må vurderes mot andre løsninger: Videre beslutninger bør baseres på blant annet livsløpskostnader, mulig organisering og hvilken merverdi trådløs lading gir sammenlignet med andre utslippsfrie teknologier.

Motivasjon og formål

Trøndelag fylkeskommune (Trfk) har mål om at Trøndelag skal være klimanøytralt innen 2030. Samferdsel har historisk stått for om lag 85 % av utslippene fra fylkeskommunens egen virksomhet, og elektrifisering av kollektivtransporten er derfor et sentralt klimatiltak. Fra den nye kontraktsperioden for buss i Stor-Trondheim i 2029 skal nye bybusser være utslippsfrie.

En særlig utfordring er elektrifisering av metrobusslinjene M1, M2 og M3. Disse utgjør ryggraden i kollektivtilbudet i Trondheim og står for rundt 40 % av bussreisene. Linjene kjøres med 24 meter lange busser med høy kapasitet, men også høyt energiforbruk. Dersom elektrifiseringen krever flere busser, større batterier eller lengre ladeopphold, kan klima- og driftsgevinster bli redusert gjennom økte materiell- og sjåførkostnader eller lavere passasjerkapasitet.

I 2022 vurderte Trfk og AtB flere løsninger for utslippsfri metrobussdrift – blant annet nye ladeteknologier, bedre batterier og hydrogen- eller biogassdrift. Trådløs lading ble vurdert som teknisk lovende, men med betydelig usikkerhet knyttet til funksjon under norske forhold, teknologimodenhet og kostnader. Trfk og AtB tok derfor initiativ til et pilotprosjekt for å etablere og teste trådløs lading av buss i Trondheim.

Prosjektet har hatt to hovedmål:

- Å gi Trfk og AtB grunnlag for å vurdere trådløs lading i storskala kollektivtransport i Trondheim fra 2029.
- Å spre kunnskap og interesse for teknologien blant bussoperatører, bussprodusenter, offentlige myndigheter og andre mulige brukere.

Gjennomførte aktiviteter

Prosjektet ble gjennomført fra 2023 til 2026 med støtte fra Miljøpakken og ENOVA. Trfk var prosjekteier, mens AtB ledet arbeidet. Bussoperatører, teknologi- og bussleverandører, entreprenør og forskningsmiljøer deltok i gjennomføringen.

Det ble anskaffet, prosjektert og bygget infrastruktur for både dynamisk og statisk trådløs lading på Sandmoen. Den dynamiske installasjonen i Kvenildstrøa består av 52 ladesegmenter i veibanen, styringsenhet, omformer og kabling. I tillegg ble det etablert en statisk ladeplass med en nyere generasjon ladesegmenter med mindre installasjonsdybde.

To 13 meter lange elektriske busser ble utstyrt med tre mottakerplater hver. Integrasjonen ble gjennomført i samarbeid mellom bussleverandør og teknologileverandør og testet ved fabrikken før godkjenning og idriftsettelse i Norge. En tidligere pilotbuss fra Sverige ble leid inn for å muliggjøre vintertesting før de nye bussene var tilgjengelige.

Prosjektet gjennomførte blant annet:

- testing av dynamisk og statisk ladeeffekt og virkningsgrad
- vintertesting under varierende temperatur-, snø- og føreforhold
- måling av elektromagnetiske felt og testing av elektromagnetisk kompatibilitet
- testing av oppvarming av magnetiske fremmedobjekter
- testing av stabilitet ved avvikende kjøremønstre

- utvikling og utprøving av et førerstøttesystem
- testing i ordinær rutetrafikk

Som del av testingen kjørte bussene til sammen nær 90 000 kilometer i ordinær rutetrafikk.

Resultater

Erfaringene viser at trådløs ladeinfrastruktur kan etableres med kjent utstyr, kompetanse og arbeidsmetoder fra veibygging og tyngre veivedlikehold. Samordning med planlagt veifornyelse eller andre veiprosjekter kan derfor gi betydelige besparelser. Statisk lading, for eksempel på holdeplasser eller reguleringsplasser, ble vist å være realistisk å etablere på én dag per ladeplass.

Teknologien kan integreres i ordinære busser. Dette krever imidlertid tett samarbeid mellom bussprodusenten, teknologileverandøren, operatøren og oppdragsgiveren.

Ladeinfrastrukturen hadde over 99 % oppetid gjennom pilotperioden. Testene viste ingen vesentlig negativ påvirkning fra kjørehastighet, temperatur eller vanlige vinterforhold. Snø og is i veibanen kan likevel redusere ladeeffekten noe, primært fordi det blir vanskeligere å plassere kjøretøyet riktig i veibanen. Prosjektet utviklet og demonstrerte et førerstøttesystem som kan gjøre det lettere å plassere bussen riktig. Godt vintervedlikehold og tydelig veimerking vil også være viktig for å oppnå best mulig drift. Veibanen viser ingen tegn på økt fysisk slitasje etter mer enn 100 000 passeringer av dobbeltleddete metrobusser (24 meter, 25,5 tonn egenvekt).

Testene har ikke avdekket sikkerhetsforhold som hindrer bruk av teknologien i bymiljø og kollektivtransport. Målingene av elektromagnetiske felt og elektromagnetisk kompatibilitet lå godt innenfor relevante krav og grenseverdier. Håndtering av magnetiske fremmedobjekter i ladefeltet krever likevel oppmerksomhet, særlig ved statisk lading der ladesegmenter kan være aktive over lengre tid. Deteksjonssystemer i infrastrukturen og varmedeteksjon på bussene reduserer risikoen, men temaet bør inngå i ROS-analysen ved framtidige etableringer.

Læringspunkter

Piloten omfattet en kort ladestrekning og få kjøretøy. Resultatene dokumenterer derfor først og fremst teknisk funksjon og praktisk gjennomførbarhet. De gir ikke sikre svar om kostnadseffektivitet, levetid eller hensiktsmessig organisering i full skala.

Prosjektet har vist at tett og tidlig samarbeid mellom veieier, kollektivmyndighet, operatør, bussprodusent og teknologileverandør er avgjørende for suksess. Integrasjon av ladeutstyr bør gjennomføres hos bussprodusenten som del av den ordinære produksjonen.

For større utbygginger er gode grunnlagsdata om veien og infrastrukturen under bakken nødvendig. Prosjektering, informasjonsdeling, referansepunkter og kvalitetskontroll må formaliseres i større grad ved en fullskala utbygging enn i et avgrenset pilotprosjekt. Dynamisk ladeinfrastruktur bør så langt som mulig etableres samtidig med planlagt veifornyelse eller andre veiprosjekter. Det kan redusere kostnader, risiko og trafikale konsekvenser.

Anbefalinger

Trådløs lading bør inngå som et mulig virkemiddel i elektrifiseringen av busstilbudet i Trondheim. Resultatene gir ikke grunnlag for teknologispesifikke krav i kommende konkurranser, men viser at teknologien er moden nok til å vurderes på lik linje med andre elektrifiseringsalternativer ut fra funksjon, kostnad, risiko og gjennomførbarhet.

Videre arbeid bør særlig omfatte:

- beregning av investeringskostnader og livsløpskostnader ved større utbygginger
- avklaring av eierskap, finansiering og ansvar for drift og vedlikehold
- vurdering av muligheter for sambruk med andre brukergrupper
- videre dialog med teknologileverandører, bussprodusenter og operatører

Hovedkonklusjonen er at trådløs lading har kommet langt nok til å være et relevant og troverdig alternativ for elektrifisering av bussdriften i Trondheim. Teknologien bør derfor holdes åpen som et strategisk handlingsrom og tas i bruk der den gir tydelig merverdi sammenlignet med andre utslippsfrie alternativer.

Summary (English)

Wireless charging is technically feasible and robust: The pilot achieved more than 99% uptime and demonstrated stable operation under normal Norwegian weather and winter conditions. No major health, safety and environmental (HSE) issues were identified.

Full-scale implementation requires effective coordination and planning: Installation of charging infrastructure in the road should preferably be coordinated with new road construction or road renewal projects to reduce costs, risks, and traffic disruption. Stationary wireless charging at bus stops and depots is quicker and easier to install.

The technology is a viable option—but it must be assessed against other solutions: Further decisions should be based on factors such as life-cycle costs, potential organisational models, and the added value that wireless charging offers compared with other zero-emission technologies.

Motivation and purpose

Trøndelag County Authority (Trfk) aims for Trøndelag to be climate-neutral by 2030. Transport has historically accounted for approximately 85% of emissions from the County Authority's own operations. Electrifying public transport is therefore a key climate measure. When the new bus contracts for Greater Trondheim take effect in 2029, all new city buses must be zero-emission vehicles.

A particular challenge is the electrification of the M1, M2 and M3 Metrobus routes. These routes form the backbone of Trondheim's public transport network and account for around 40% of all bus journeys. They are operated with high-capacity, 24-metre buses that also consume substantial amounts of energy. If electrification requires more buses, larger batteries or longer charging stops, the climate and operational benefits may be reduced. This could result from higher vehicle and driver costs or lower passenger capacity.

In 2022, Trfk and AtB assessed several solutions for zero-emission Metrobus operations. These included new charging technologies, improved batteries and operation using hydrogen or biogas. Wireless charging was considered technically promising, but there was considerable uncertainty about its performance under Norwegian conditions, its technological maturity, and its costs. Trfk and AtB therefore initiated a pilot project to establish and test wireless bus charging in Trondheim.

The project had two main objectives:

- To provide Trfk and AtB with a basis for assessing wireless charging for large-scale public transport operations in Trondheim from 2029.
- To increase awareness of and interest in the technology among bus operators, bus manufacturers, public authorities, and other potential users.

Activities completed

The project was carried out from 2023 to 2026 with funding from Miljøpakken and Enova. Trfk was the project owner, while AtB led the work. Bus operators, technology providers, bus suppliers, the contractor, and research institutions participated in the implementation.

Infrastructure for both dynamic and stationary wireless charging was procured, designed, and built at the main bus depot in Sandmoen. The dynamic installation on the public road leading to the bus depot consists of 52 charging segments embedded in the road, as well as a control unit, a power converter and cabling. A stationary charging site was also established using a newer generation of charging segments that require a shallower installation depth.

Two 13-metre electric buses were each fitted with three receiver plates. The system was integrated through collaboration between the bus supplier and the technology provider. It was tested at the factory before being approved and commissioned in Norway. A bus previously used in a Swedish pilot project was leased to enable winter testing before the new buses became available.

The project included:

- testing of charging power and efficiency for dynamic and stationary charging

- winter testing under varying temperature, snow, and road surface conditions
- measurement of electromagnetic fields and testing of electromagnetic compatibility
- testing of heat generated in magnetic foreign objects
- stability testing under non-standard driving patterns
- development and testing of a driver assistance system
- testing in scheduled passenger service

As part of the testing, the buses covered a combined distance of nearly 90 000 kilometres in scheduled passenger service.

Results

Experience from the project shows that wireless charging infrastructure can be established using familiar equipment, expertise and working methods from road construction and road maintenance. Coordinating the installation with planned road renewal or other road projects could therefore generate substantial savings. The project also demonstrated that stationary charging, for example at bus stops or bus layover areas, can realistically be installed in one day per charging site.

The technology can be integrated into standard buses. However, this requires close cooperation between the bus manufacturer, the technology provider, the operator, and the contracting authority.

The technology operated reliably throughout the pilot period, with an uptime of more than 99%. The tests found no significant adverse effects from driving speed, temperature, or normal winter conditions. However, snow and ice on the road may reduce charging performance to some extent, primarily because they make it more difficult to position the vehicle correctly over the charging segments. The project developed and demonstrated a driver assistance system that can help drivers position the bus correctly. Effective winter maintenance and clearly visible road markings will also be important for achieving the best possible operational performance. The road shows no signs of increased physical wear after more than 100,000 passages by bi-articulated Metrobus vehicles (24 metres, 25.5 tonnes kerb weight).

The tests did not identify any safety issues that would prevent the technology from being used in urban environments or public transport operations. Measurements of electromagnetic fields and electromagnetic compatibility were well within the relevant requirements and limit values. However, magnetic foreign objects in the charging field require attention, particularly during stationary charging, when charging segments may remain active for longer periods. Detection systems in the infrastructure and heat detection systems on the buses were tested to reduce the risk. Nevertheless, the issue should be addressed in the risk and vulnerability analysis for future installations.

Lessons learned

The pilot involved a short charging section and a small number of vehicles. The results therefore primarily demonstrate the technical functionality and practical feasibility of the solution. They do not provide conclusive answers about cost-effectiveness, service life, or the most appropriate organisational model for full-scale implementation.

The project has shown that close cooperation from an early stage between the road owner, public transport authority, operator, bus manufacturer, and technology provider is essential to success. The charging equipment should be integrated at the bus manufacturer’s facility as part of the standard production process.

Large-scale installations require accurate baseline data about the road and the infrastructure beneath it. Design processes, information sharing, reference points, and quality control will need to be formalised to a greater extent for full-scale implementation than for a limited pilot project. Wherever possible, dynamic charging infrastructure should be installed in conjunction with planned road renewal or other road projects. This can reduce costs, risks, and disruption to traffic.

Recommendations

Wireless charging should be considered as a potential measure in the electrification of Trondheim’s bus network. The results do not provide a basis for specifying this technology in future tenders. However, they show that the technology is sufficiently mature to be assessed on the same basis as other electrification options based on functionality, cost, risk, and feasibility.

Further work should focus on:

- calculating investment and life-cycle costs for larger installations
- clarifying ownership, financing and responsibility for operation and maintenance

- assessing opportunities for shared use with other user groups
- continuing dialogue with technology providers, bus manufacturers, and operators

The main conclusion is that wireless charging has matured sufficiently to be considered a relevant and credible option for electrifying bus operations in Trondheim. The technology should therefore remain available as a strategic option and be implemented where it offers clear added value compared with other zero-emission alternatives.

Sentrale begreper og definisjoner

Begrep	Definisjon/ forklaring
Trådløs lading	Overføring av elektrisk energi fra ladeinfrastruktur til kjøretøy uten fysisk kabel eller kontakt. I rapporten brukes begrepet særlig om induktiv lading av busser.
Dynamisk trådløs lading	Trådløs lading mens kjøretøyet er i bevegelse. Ladesegmenter i veibanen aktiveres når bussen passerer over dem.
Statisk trådløs lading	Trådløs lading mens kjøretøyet står stille, for eksempel på depot, holdeplass, terminal eller reguleringsplass.
Elektrisk vei / el-vei	Veiinfrastruktur som gjør det mulig å tilføre energi til kjøretøy under kjøring eller opphold, for eksempel gjennom trådløs lading fra veibanen.
Ladesegment	Del av ladeinfrastrukturen i veibanen som inneholder komponenter for å overføre energi trådløst til kjøretøyet. Flere segmenter kan ligge etter hverandre langs en strekning.
Mottakerplate / mottakerspole	Komponent montert under bussen som tar imot energi fra ladesegmentene i veien. Antall mottakere påvirker hvor høy ladeeffekt bussen kan motta.
Ladeeffekt	Hvor raskt energi overføres til bussen, vanligvis målt i kilowatt (kW). Høyere effekt betyr at mer energi kan overføres på kortere tid.
Virkningsgrad	Forholdet mellom energien som mottas av bussen og energien som leveres til ladesystemet. Høy virkningsgrad betyr lite energitap.
State of Charge (SoC)	Batteriets ladenivå, vanligvis angitt i prosent.
Opportunity charging/ endepunktlading	Lading i naturlige opphold i driften, for eksempel ved holdeplass, endestopp eller reguleringspause, uten at kjøretøyet tas særskilt ut av rute.
Nattlading	Lading av bussene mens de står parkert over natten, vanligvis på depot.
Interoperabilitet	Egenskapen at kjøretøy og ladeinfrastruktur fra ulike leverandører kan fungere sammen gjennom felles tekniske standarder.
Kneling	Funksjon der bussen senkes, vanligvis ved holdeplass. I prosjektet ble dette brukt til å redusere avstanden mellom mottakerplate og veibane under lading.
Geofence-sone	Virtuelt geografisk område som kan utløse en automatisk funksjon når kjøretøyet kommer inn i sonen, for eksempel automatisk senkning av bussen.

1. Introduksjon

1.1. Bakgrunn og formål

Trøndelag fylkeskommune (Trfk) har som mål at Trøndelag skal bli klimanøytralt innen 2030. For å klare dette er reduksjon av energiforbruk og utslippsfrie energibærere blitt en viktig del av alle anbud og nye anskaffelser. 85 % av utslippene fra Trfks egen virksomhet kommer historisk fra samferdselstilbudet. Gjennom elektrifisering av ferje- og bussdrift har disse utslippene gradvis blitt lavere siden 2019. For å redusere dette ytterligere er det nødvendig å gjøre større deler av bussparken utslippsfri.

Ny anbudsperiode for buss i Stor-Trondheim starter 2029. Fra 2025 stiller nullutslippsforskriften krav om at nye bybusser skal være utslippsfrie[1]. I praksis vil det si at alle busser som inngår i anbudet med oppstart 2029 vil måtte kjøres på elektrisitet, biogass eller hydrogen. AtBs analyser viser at batterielektrisk framdrift med stor sannsynlighet vil være det rimeligste alternativet for utslippsfri drift av bybuss hvis det er teknisk gjennomførbart.

Utfordringen for batterielektrisk framdrift er at kjørelengden til batterielektriske busser fortsatt er noe begrenset og at det å kompensere for kjørelengde med større batterier kan gi utfordringer med høye aksellaster. Dette kan føre til at det blir behov for mer bussmateriell for å kompensere for kjørelengde og begrensninger i nyttelast. Hvis en overgang til elektrisk fremdrift medfører behov for å ha flere busser i drift spises innsparingen i drivstoffkostnader fort opp av økte bussmateriell- og sjåførkostnader. I praksis betyr dette at elektriske busser må kunne gå inn i tilnærmet samme driftsmønster som busser med forbrenningsmotor (uten rekkeviddebegrensninger), og at lading må kunne gjennomføres i naturlige pauser (natt, reguleringstid, mellom morgen- og ettermiddagsrush m.fl.).

AtB har identifisert metrobusslinjene M1 og M2 som de mest krevende linjene å elektrifisere i Stor-Trondheim. Sammen med metrobusslinje M3 utgjør disse ryggraden i kollektivtilbudet i Trondheim og står for rundt 40 % av alle bussreiser. Siden 2019 har metrobusslinjene blitt kjørt med dobbelleddete 24 meter lange busser. 24 meter bussene har svært høy passasjerkapasitet, men bussene er samtidig store og tunge. Retning Kattem/Lund skal bussene opp Okstadbakken med nesten 120 høydemeter, og i tillegg er det krav om hastighet på over 50 km/t på E6. Metrobusslinjene er lange - over 20 km hver vei - og bussene kjører lange dager med opptil 9 rundturer per dag. I sum gir dette et svært høyt energiforbruk.

Høsten 2022 gjennomførte Trfk og AtB en analyse av muligheter og utfordringer ved elektrifisering og utslippsreduksjon med spesielt fokus på metrobusslinje M1 og M2. Analysen hadde til hovedmål å gi prioriteringer for videre arbeid slik at AtB i god tid før 2029 ville ha tilstrekkelig kunnskap til å gi gode anbefalinger om teknologivalg og hvis nødvendig ha tid til å sette i gang forberedende aktiviteter. Teknologiene og løsningene som ble vurdert er presentert i Tabell 1.

Tabell 1 – Vurdering av mulige løsninger for utslippsfri drift av metrobuss i Trondheim

Teknologi	**Vurdering**
Trådløs lading	Mest sannsynlig gjennomførbart, men vanskelig å vurdere grunnet begrenset kompetanse og store usikkerheter knyttet til teknologimodenhet, kostnadsnivå og leverandørsituasjon. Det ble anbefalt å gjennomføre et pilotprosjekt for å verifisere teknologien og bygge opp kunnskap til å kunne gjøre sikrere vurderinger.
Nattlading kombinert med endepunktlading	Usikker gjennomførbarhet fra 2029. Avhengig av teknologiutvikling. Høy sannsynlighet for å gi en betydelig økning av bussantall eller reduksjon av passasjerkapasitet.
Nattlading kombinert med endepunktlading og lenger opphold på endestopp	Mest sannsynlig gjennomførbart, men med stor risiko for redusert punktlighet, redusert passasjerkapasitet eller økning av bussantall.
Nattlading kombinert med endepunktlading med høyere ladeeffekt	Mest sannsynlig være gjennomførbart, men med store usikkerheter knyttet til teknologitilgjengelighet (spesielt bussmateriell), kostnader og infrastrukturbehov. Det ble anbefalt å følge teknologiutviklingen innenfor høyeffekt lading tett videre.

[1] Forskrift om energi- og miljøkrav ved offentlig anskaffelse av kjøretøy til veitransport - Lovdata

Nattlading med ny batteriteknologi	Lite sannsynlig løsning fra 2029 på grunn av at alternativet er basert på teknologiframskrivinger med høy usikkerhet. Utfordrende mht. nettkapasitet i depot.
Nattlading kombinert med endepunktlading med ny batteriteknologi	Mer sannsynlig enn med nattlading alene, men fortsatt med høy usikkerhet grunnet teknologiframskrivinger.
Nattlading kombinert med batteribytte (battery swap)	Ikke gjennomførbart fra 2029 på grunn av fravær av leverandører i bussmarkedet.
Hydrogen som primær energibærer	Mest sannsynlig gjennomførbart, men med stor risiko for høye kostnader og stor kompleksitet på grunn av mangel på lokal hydrogenproduksjon, fylleinfrastruktur og kompetanse hos operatører og verksteder. Det ble anbefalt å jobbe med nettverksbygging opp mot andre transportaktører for å vurdere muligheter for samarbeid om oppbygging og etablering av produksjon, infrastruktur og kompetanse.
Hydrogen som rekkeviddeforlenger for batteri	Mest sannsynlig gjennomførbart, men med risiko for høye kostnader og stor kompleksitet. Vil kreve mindre volum av hydrogen og mest sannsynlig også enklere infrastruktur enn med hydrogen som primær energibærer, men utfordringer med kostnader og kompetanse gjenstår.
Biogass	Gjennomførbart, men mest sannsynlig dyrere enn elektrifisering. Løsningen gir også lokale utslipp av NOx og PM10 mm. Ble anbefalt tatt med videre som en mulig løsning hvis fullelektrifisering ikke er praktisk gjennomførbart.
Redusert busstørrelse fra 24 meter til 18 meter	Mulig grep for å lette energiutfordringene, men ikke en selvstendig løsning uten reduksjon av passasjerkapasitet eller økning av bussantall.

Som oppfølging av anbefalingen for trådløs lading, tok Trfk og AtB initiativ til opprettelsen av et pilotprosjekt for å etablere og teste trådløs lading av buss i rutedrift i Trondheim. Pilotprosjektet – omtalt som pilotprosjekt elektrisk vei – har hatt to hovedmål:

- Å gjøre Trfk og AtB i stand til å vurdere om trådløs lading er et alternativ for storskala bruk i kollektivtransport i Trondheim fra 2029.
- Å spre kunnskap og interesse for teknologien blant bussoperatører, bussprodusenter, offentlige myndigheter, andre mulige brukere m.fl.

Resultater og funn fra pilotprosjektet gjennomgås og oppsummeres i denne sluttrapporten.

Selv om hovedanvendelsen i pilotprosjektet har vært buss, har det vært et viktig mål å også vurdere potensiale og muligheter for andre brukere – både i Trondheim og globalt. Førstnevnte vil kunne gi viktige bidrag til brukstiden – og gjennom det kostnadseffektiviteten – til infrastrukturen og slik være en viktig del av vurderingen av lønnsomhet. Sistnevnte vil kunne gi viktig informasjon om soliditet hos leverandører og utsikter til skalering og kostnadsreduksjoner.

1.2. Prosjektvarighet og økonomiske rammer

Prosjektet løp over tre år med start i Q1 2023 og avslutning i Q3 2026.

Før prosjektstart - vinteren 2022-2023 - ble det jobbet med detaljering av prosjektbeskrivelse og sikring av finansiering. Med bakgrunn i hovedmålene for prosjektet måtte framdriftsplanen legges opp slik at prosjektet rakk å levere resultater tidsnok til utlysningen av konkurransen om nye busskontrakter i Stor-Trondheim med oppstart 2029. Det vil si at resultater og anbefalinger måtte foreligge senest Q1 2026. Videre var det et viktig mål for prosjektet å få testet teknologien gjennom en hel vinter, og fortrinnsvis å ha mulighet til å gjennomføre testing i to vintre i tilfelle den første vinteren var unormalt mild, tørr eller det skulle dukke opp andre problemer. En tredje binding i prosjektet var at selve byggeperioden – for å kunne gjennomføres med minst mulig driftsmessige forstyrrelser for bussoperatør – måtte legges innenfor sommerruteperioden fra slutten av juni til starten av august. Antatt leveringstid på el-vei teknologien var

ett år. Når sikker finansiering kom på plass i Q1 2023 betydde det at prosjektet hadde tre måneder til gjennomføring av teknologianskaffelsen. Den overordnede framdriftsplanen for prosjektet er gjengitt i Tabell 2.

Pilotprosjekt elektrisk vei har vært finansiert av Miljøpakken med inntil 20 millioner kroner og ENOVA med inntil 6,4 millioner kroner.

Tabell 2 – Overordnet framdriftsplan

	2023				2024				2025				2026			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Teknologianskaffelse																
Prosjektering og levering																
Bygging og testing																
Pilotering																
Evaluering og rapportering																

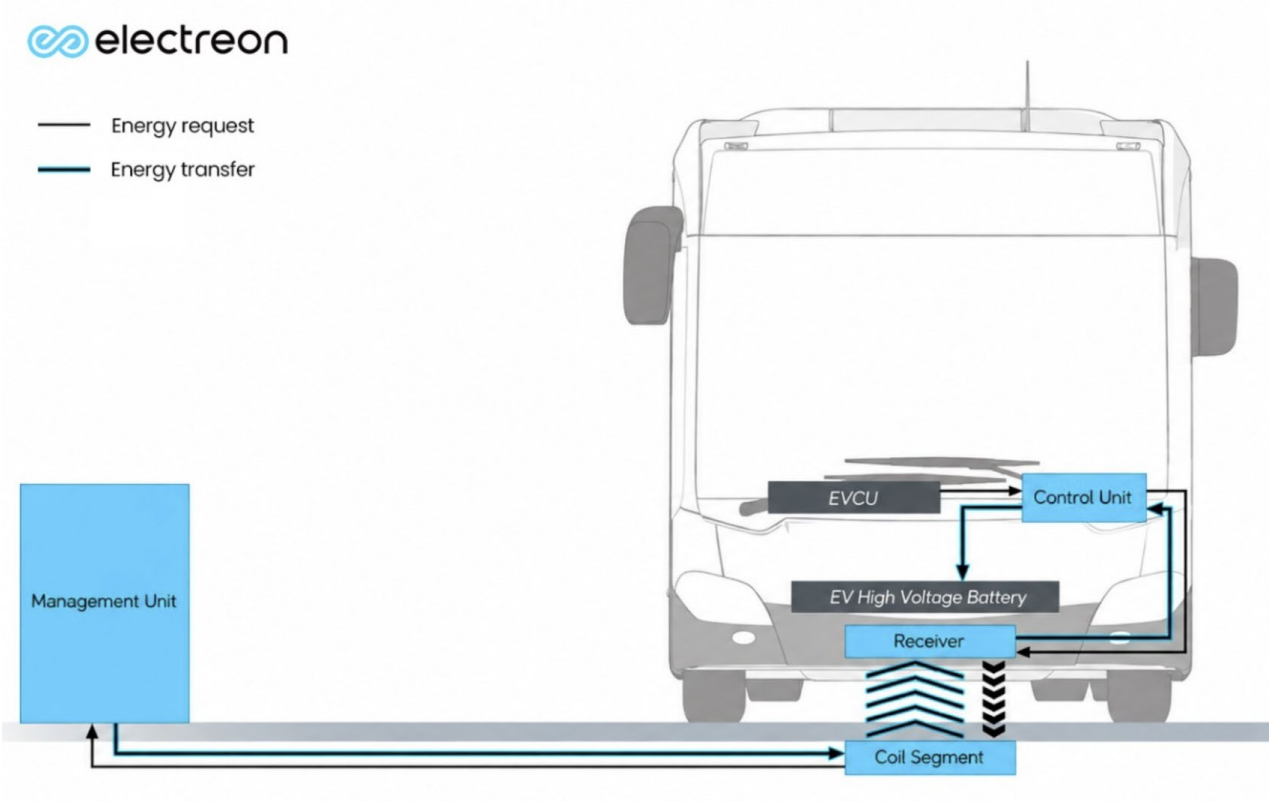
2. Induktiv lading

Induktiv lading gjør det mulig å overføre elektrisk energi mellom en fast installasjon og batteriet om bord på et elektrisk kjøretøy uten noen form for direkte elektrisk kontakt. Teknologien er basert på energioverføring ved hjelp av magnetiske felt og kan benyttes både for statisk lading når kjøretøyet står i ro og for dynamisk lading mens kjøretøyet er i bevegelse. Fordi induktiv lading kan automatiseres uten behov for fysisk tilkobling er teknologien spesielt relevant for kollektivtransport og andre tunge elektriske kjøretøy med høyt energibehov og begrenset tilgjengelig tid for lading. Dette kan også bidra til lengre rekkevidde eller reduserte batteristørrelser for en gitt rute siden kjøretøyet lades hyppigere gjennom dagen.

2.1. Prinsipper for induktiv energioverføring

Induktiv energioverføring er basert på prinsippene for elektromagnetisk induksjon. Ved å sende vekselstrøm (AC) med høy frekvens gjennom en avsenderspole installert i eller på bakken induseres et tidsvarierende magnetfelt rundt spolen. Når en mottakerspole om bord på kjøretøyet befinner seg innenfor dette magnetfeltet, induseres en elektrisk spenning med samme frekvens i mottakerspolen. Denne spenningen driver en strøm i mottakerspolen som likerettes (dvs. omformes fra AC til DC) og benyttes til å lade kjøretøyets batteri.

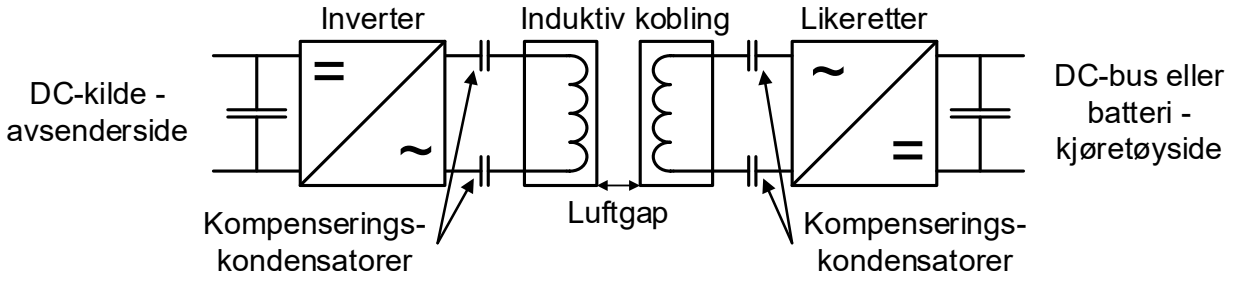
En generell oversikt over de viktigste elementene i et system for induktiv lading av et batteri-elektrisk kjøretøy er vist i Figur 1. Denne figuren viser tydelig hvordan systemet omfatter både elementer som er en del av en fast installasjon og elementer om bord i kjøretøyet. Dessuten indikerer figuren hvordan ladeeffekten som skal overføres til batteriet må styres fra kjøretøyet, og at det dermed er behov for integrert kommunikasjon som en del av det totale ladesystemet.



Figur 1 – Induktiv lading av batteri i elektriske kjøretøy (Illustrasjon: Electreon)

Induktive ladesystemer for elektriske kjøretøy kan designes innenfor et vidt spenn av mulige bruksområder og ladebehov. Overførbar effekt og systemvirkningsgrad avhenger blant annet av avstanden mellom spolene, deres geometriske utforming, innbyrdes plassering, og operasjonsfrekvens for strøm og spenning. For å oppnå høy energioverføring uten behov for betydelig overdimensjonering av komponenter benyttes normalt resonant induktiv kobling, der både sender- og mottakersiden er utstyrt med kondensatorer som danner resonanskretser. Disse resonanskondensatorene kan også betraktes som kompensering for høyt reaktivt effektbehov på grunn av lav magnetisk kobling mellom avsender- og mottaker-spolene som følge av avstanden (luftgapet) mellom disse. Bruk av kondensatorkompensering er derfor nødvendig for å oppnå høy effektfaktor og for å begrense tap i systemet.

En mer detaljert oversikt over den grunnleggende elektriske systemkonfigurasjonen for et typisk induktivt ladesystem er vist i Figur 2. Figuren indikerer hvordan en inverter omformer energi fra en DC-kilde til høyfrekvent AC spenning og strøm i resonanskretsen på avsendersiden. Den faste installasjonen i et induktivt ladesystem omfatter dermed inverteren som driver systemet, resonans-kondensatorene og avsender-spolen. Figuren viser også hvordan den induserte strømmen på mottakersiden likerettes slik at den kan utnyttes til å lade batteriet.



Figur 2 – Generisk kretsskjema som viser oversikt over de viktigste komponentene i induktive energioverføringssystemer

I tillegg til infrastruktur-delen av det induktive ladesystemet omfatter den faste installasjonen på avsendersiden typisk nødvendig utstyr for tilkobling til lokalt AC distribusjonsnett, inkludert en likeretter som kan styres som en DC-spenningskilde. Nettilkoblingen fungerer dermed som DC-kilden indikert i Figur 2. Hvis flere ladesegmenter forsynes fra samme punkt i distribusjonsnettet kan de også ha en felles

likeretter og eventuelt en intern DC-distribusjon for å forsyne hvert enkelt ladesegment som vil ha en systemtopologi i henhold til Figur 2.

2.2. Utbredelse

Vanligvis skiller man generelt sett mellom statisk induktiv lading av stillestående kjøretøy og dynamisk induktiv lading av kjøretøy i fart. Førstnevnte utnytter gjerne det daglige kjøremønsteret slik at lading skjer i perioder hvor kjøretøyet uansett står stille. For rutebusser vil det typisk være ved depot, endestopp og holdeplasser under på- og avstigning av passasjerer, slik at bussene i størst mulig grad kan holde seg kontinuerlig i drift uten dedikerte ladestopp. Dette omtales ofte som «opportunity charging». For dynamisk induktiv lading så er ladespolene installert langs et lengre veistykke og blir aktivert når et elektrisk kjøretøy passerer, slik at det ikke er nødvendig å stanse for å lade batteriet. Begge teknologiløsningene tilbyr bussene regelmessige energitilskudd gjennom dagen uten å måtte returnere til depot for lading og kan dermed redusere nødvendig batteristørrelse eller øke rekkevidden med en gitt batteristørrelse.

Statisk induktiv lading for elektriske kjøretøy kan betraktes som en relativt moden teknologi som er kommersielt tilgjengelig for busser selv om utbredelsen fortsatt er begrenset slik at skaleringseffekter for teknologien fortsatt ikke har blitt utnyttet. Ved oppstart av prosjektet var teknologi for dynamisk induktiv lading fortsatt i en fase med demonstrasjon og tidlige implementering i form av flere ulike pilotprosjekt med ulikt fokus i ulike deler av verden. Selv om utviklingen har gått videre i løpet av prosjektet, og den grunnleggende teknologien er godt kjent, er slike systemer fortsatt i en relativt tidlig fase av kommersiell utvikling.

Teknologi for induktiv lading i ulike bruksområder har vært under utvikling over flere tiår, for en lang rekke bruksområder. Eksempelvis har innføring av Qi-standarden for induktiv lading av forbrukerelektronikk med effektbehov opp til ca. 25 W medført at trådløs lading av mobiltelefoner har blitt nærmest dagligdags. Tilsvarende har det foregått omfattende forskning og utvikling mot bruk av trådløs ladeteknologi for biomedisinske implantater. Et annet tidlig eksempel på bruksområder utenfor elektrisk transport var utnyttelse av teknologien i fornøyelsesparken EPCOT i 2003 med bevegende kinosalseter[2]. Det har likevel tatt tid før mer omfattende bruk av teknologien har blitt vanlig for batterilading av elektriske kjøretøy med høyere effektbehov. De siste to tiårene har teknologien derfor gått gjennom en fase med etablering av flere kommersielle pilotprosjekter innen transport. Tabell 3 viser en rekke eksempler av tidlige prosjekter som demonstrerer bruk av induktiv lading for busser, både ved hjelp av statisk «opportunity charging» og dynamisk lading av kjøretøy i fart. Flere eksempler på nyere demonstrasjonsprosjekter fra de siste fem årene kan man finne eksempler i Tabell 4.

Tabell 3 – Historisk viktige demonstrasjonsprosjekter

Om	Type	Når	Sted	Aktør	Lenke
Ladeplater ved kritiske holdeplasser for en flåte på 23 elektriske busser. Bussene dekker opptil 200 km daglig, med to ladestopp per rute på 30 kW effekt. Pågående siden 2004, ingen batteri har hittil blitt erstattet grunnet gunstige ladenivå.	Statisk	2004--	Torino, Italia	Conductix Wampfler / IPT Techno-logies (nå ENRX)	[1]
Trådløs lading i fart med 20-100 kW effekt demonstrert for skyttelbusser ved universitetscampus og fornøyelsespark, kjent som OLEV. Ble senere utvidet til utvalgte rutebusser i bysentrum.	Dynamisk	2009-2012	Sør-Korea	KAIST universite t	[2], [3]
Første kommersielle bussprosjekt i USA, med 50 kW trådløs lading under ombordstigning og rutestopp ved bussterminal.	Statisk	2014	Salt Lake City, USA	WAVE	[4]

[2] EPCOT's University of Energy, Ride/show charging system

«Slide-in electric road system» var et Svensk prosjekt som blant annet demonstrerte dynamisk induktiv overføring av 200 kW til en lastebil i fart langs en testbane.	Dynamisk	2014	Mannheim, Tyskland	Bombardier Primove (nå ENRX)	[5]
Fem elektriske rutebusser drevet av ENRX sitt Primove 200 kW induktive ladesystem. Flåten består av en buss på 12 meter med 60 kWh batterikapasitet, og fire busser på 18 meter med 90 kWh batterier.	Statisk	2014--	Braunschweig, Tyskland	Bombardier Primove (nå ENRX)	[1]
Opp til 100 kW endepunktlading av tre dobbeltdekker rutebusser.	Statisk	2015-2020	London, England	IPT Techno-logies (nå ENRX)	[1]
Som en del av EU-prosjektet FABRIC så ble samtidig lading av to biler i fart demonstrert med en effekt på 18 kW. Økt hastighet hadde ingen merkbar påvirkning, testet opp til 70 km/t.	Dynamisk	2017	Satory, Frankrike	Qualcomm (nå en del av Witricity)	[6]
En flåte på 32 busser (per 2026) drevet av trådløs lading med effekt 75-300 kW. Lading pågår ved depot under på- og avstigning av passasjerer.	Statisk	2018--	Washington state, USA	InductEV	[7]
Ladesystem levert med 200 kW ladeeffekt ved bussholdeplasser og terminaler til i utgangspunktet 10 rutebusser.	Statisk	2018--	Martha's Vineyard, USA	Momentum Dynamics / InductEV	[8]
Trådløs endepunktlading på 300 kW for 31 bybusser langs Red Line BRT.	Statisk	2019--	Indianapolis, USA	Momentum Dynamics / InductEV, IndyGo	[9]

Tabell 4 – Nyere demonstrasjonsprosjekter de siste fem årene

Om	**Type**	**Når**	**Sted**	**Aktør**	**Lenke**
Trådløs lading på 75 kW for taxier i ordinær drift. Kjøretøyene lades automatisk ved taxiholdeplasser og oppstillingsplasser. Prosjektet ble senere utvidet med flere ladestasjoner.	Statisk	2021--	Göteborg, Sverige	InductEV Volvo Cars, Cabonline	[10]
Tysklands første offentlige bussrute drevet av induktiv lading. Total 1 km elektrifisert veg, samt to holdeplasser med statisk induktiv lading.	Dynamisk og statisk	2023	Balingen, Tyskland	Electreon	[11]
En flåte på 23 busser drevet av statisk lading. Bussene lader på depot under pauser, vedlikehold, og over natten. Skal ekspanderes til lading ved holdeplasser på bussterminal.	Statisk	2023	Tel Aviv, Israel	Electreon	[12]

Smartroad Gotland var et pilotprosjekt der 1.6 km av en offentlig motorvei ble elektrifisert for dynamisk lading. Gjennomsnittlig mottatt effekt på 70 kW. Veien drifter kommersiell skyttelbuss mellom flyplass og Visby samt vogntog.	Dynamisk og statisk	2021-2023	Gotland, Sverige	Electreon	[13]
Demonstrasjonsprosjekt for lading i fart langs A10-motorveien i Frankrike. Et veistrekk på 1.5 km med induktiv lading på 200 kW i snitt for kjøretøy i høy fart (90 km/t). Testet for lastebil, buss, varebil, og personbil.	Dynamisk	2024-2026	Paris, Frankrike	Electreon, VINCI	[14]

Flere demonstrasjonsprosjekt benytter eller bygger erfaringer fra arenaer som er konstruert spesifikt for å teste denne teknologien. Slike testanlegg spiller en viktig rolle i utvikling, verifisering og demonstrasjon av trådløs ladeteknologi under kontrollerte forhold før implementering i ordinær transportinfrastruktur. Tabell 5 gir en oversikt over utvalgte testarenaer for induktiv lading av batteridrevne kjøretøy som inkluderer busser.

Tabell 5 – Oversikt over testarenaer for induktiv lading

Navn	Aktører	Sted	Om	Status	Lenke
Electric Vehicle and Roadway (EVR)	Utah State University, ASPIRE	Utah, USA	Testanlegg for trådløs lading og elektrifiserte veier med 400m elektrifisert testbane, mikrogrid, energilagring, og solkraft.	Ferdigstilt 2015	[15] [16]
ASPIRE research test track	ASPIRE, Electreon, Utah State University	Utah, USA	Testfelt for dynamisk induktiv lading. Oval kjørebane ca. 1,6 km lang hvor 50 meter tilbyr dynamisk lading for bl.a. tunge kjøretøy.	Ferdigstilt 2022	[17]
Arena del Futuro	ABB, Electreon, FIAMM, IVECO, Stellantis	Brescia, Italia	Testfelt for dynamisk induktiv lading. Oval kjørebane på 1050 meter med induktiv lading integrert i veibanen og forsyningseffekt 1 MW.	Ferdigstilt 2021	[18] [19]

2.3. Sentrale aktører

En oversikt over viktige aktører innen induktiv lading av kjøretøy er vist i Tabell 6, med vekt på industri. Det finnes også flere andre aktører som leverer forsknings- og/eller ingeniørtjenester relatert til teknologiutvikling for induktiv lading, samt flere bedrifter som enten på egen hånd eller i samarbeid med andre kjøretøyprodusenter utvikler teknologi for induktiv lading. Siden disse ikke leverer komplette systemer som er relevante for kollektivtrafikk er disse ikke beskrevet nærmere her.

Tabell 6 – Oversikt over sentrale aktører

Aktør	Hovedkontor	Produktløsninger
Electreon	Israel	Electreon leverer induktiv ladeteknologi, er involvert i relatert standardiseringsarbeid (SAE, IEC, ISO), og utreder gjennomførbarhetsstudier og demonstrasjonsprosjekt for elektriske vegbaner og statisk lading. Teknologien er tilgjengelig for både lette og tunge kjøretøy, passasjerbiler, og selvstyrte skyttelbusser. Viktige partnere inkluderer Toyota og Denso.

InductEV	USA	Nå en del av Electreon-konsernet, InductEV leverer statisk induktiv lading med høy effekt fokusert på elektriske kjøretøy brukt i kommersielle flåter.
ENRX	Norge	Utvikler systemer for statisk og dynamisk induktiv lading for bl.a. busser, lastebiler, og spesialkjøretøy. Resultat fra oppkjøp av Bombardier Primove og IPT Technologies, og sitter på IP-rettigheter fra disse selskapene. Er også en stor aktør innen industriell induksjonsoppvarming.
WAVE	USA	Leverer induktive ladeplater med høy effekt for statisk lading ved terminaler og holdeplasser, samt havner, flyplasser, og varehus.
WiTricity	USA	Teknologileverandør og patentholder. Ledende rolle i SAE J2954-standardiseringen. Har demonstrert bussløsninger og samarbeidet med kjøretøyprodusenter, men leverer ikke komplette bussinstallasjoner slik som ENRX eller Electreon.
KAIST	Sør-Korea	Historisk viktig aktør for dynamisk induktiv lading, leverte verdens første offentlige busslinjer med induktiv lading fra veibanen (OLEV). Noe kommersiell spredning (WiPowerOne), og har hatt stor påvirkning for senere aktører, inkludert standardiseringsarbeid og samarbeid med Electreon.
ASPIRE	USA	Forskning- og testsenter med mål om kosteffektiv og skalerbar ladeteknologi og infrastruktur, for elektrifiserte veibaner med dynamisk induktiv lading.
BRUSA	Tyskland	Utvikler og produserer induktive statiske ladesystemer med effektnivå tilpasset privatbiler.
Qualcomm	USA	Gikk inn i markedet for trådløs lading gjennom oppkjøpet av HaloIPT (et utspring fra University of Auckland) i 2011, og utviklet deretter stasjonære og dynamiske ladeløsninger for kjøretøy. Qualcomm Halo ble solgt til WiTricity i 2019.
Porsche	Tyskland	Første bilprodusent som markedsfører og selger biler (Cayenne Electric) med fabrikkmontert mottaker for trådløs lading til privatkunder.

2.4. Tekniske utfordringer

Standardisering er en forutsetning for bred utrulling av trådløs lading av elektriske kjøretøy ettersom løsningene må oppfylle krav til sikkerhet, ytelse og elektromagnetisk kompatibilitet. Interoperabilitet på tvers av kjøretøytyper og leverandører kan også betraktes som en forutsetning for storskala utnyttelse av teknologien og mulighet for etablering av et konkurransedrevet marked for induktive ladesystemer. Det pågående standardiseringsarbeidet omfatter både tekniske grensesnitt for energioverføring og kommunikasjon (SAE-serien), samt krav knyttet til elektromagnetiske utslipp og eksponering av mennesker gjennom standarder og retningslinjer som CISPR 25 og ICNIRP 2010. IEC 61980-serien beskriver krav til infrastrukturen (off-board equipment) mens ISO 5474-serien beskriver krav til kjøretøysiden (on-board equipment). En oversikt over sentrale standarder er vist i Tabell 7.

En utfordring er at trådløs lading skal fungere på tvers av ulike bruksområder. Kravene til en personbil som lades på moderat effekt på private parkeringsplasser er forskjellig fra kravene til busser og andre tunge kjøretøy som gjerne vil overføre høyere effekt under varierende driftsforhold og som har behov for infrastruktur installert på, eller i nær tilknytning til, offentlig vei. Forskjeller i bakkeklaring, batterispenning og effektbehov gjør det krevende å etablere felles standarder som samtidig ivaretar høy virkningsgrad, sikkerhet og kostnadseffektivitet.

Interoperabilitet representerer derfor en viktig teknisk utfordring. Dette krever standardisering av blant annet spolegeometri, operasjonsfrekvenser, kommunikasjon mellom kjøretøy og infrastruktur, posisjoneringskrav, og prosedyrer for autentisering og effektregulering. Samtidig må standardene kunne

håndtere et bredt spekter av bruksområder uten at det er behov for å definere separate standarder for mange ulike effektnivåer.

Stasjonære trådløse ladeløsninger for vanlige elbiler følger SAE J2954 standarden, som definerer industrikravene for effektnivå, interoperabilitet, elektromagnetisk kompatibilitet, ytelse og sikkerhet[3]. Standardiseringsarbeidet tok over et tiår før kravene for sømløs trådløs lading av lettere kjøretøy opp til 11 kW ble ferdigstilt. Tilsvarende standardiseringsarbeid for statisk induktiv lading av tyngre elektriske kjøretøy opp til 500 kW er påbegynt med SAE J2954/2[4]. Industristandard for dynamisk trådløs lading er under arbeid med SAE J2954/3[5]. Electreon leder flere initiativ på standardiseringsfronten for trådløs lading[6], og siden 2024 har ENRX og InductEV inngått et samarbeid (som dermed nå omfatter Electreon) om utvikling av industristandarder med mål om å etablere internasjonale tekniske standarder som kan gi universell kompatibilitet mellom ulike løsninger for samme type systemer[7].

Tabell 7 – Sentrale standarder relatert til trådløs energioverføring til elektriske kjøretøy

Kode	**Beskrivelse**
SAE J2847	Kommunikasjon mellom kjøretøy og kablet ladeinfrastruktur
SAE J2847/6	Kommunikasjon mellom trådløst ladbare kjøretøy og ladeinfrastruktur
SAE J2954	Interoperabilitet, effektklasser og posisjonering for trådløs lading av lette kjøretøy
SAE J2954/2	Interoperabilitet og systemkrav for stasjonær trådløs lading av tunge kjøretøy
SAE J2954/3	Dynamisk trådløs energioverføring og grensesnitt mot elektriske veier
SAE J2836/6	Bruksområder for trådløs kommunikasjon for lading av elektriske kjøretøy
SAE J2931/6	Fysisk og digital kommunikasjon mellom kjøretøy og trådløs ladeinfrastruktur
SAE J2953	Metoder for verifisering av interoperabilitet mellom kjøretøy og ladeutstyr
SAE J2894	Krav til spenningskvalitet og nettpåvirkning fra ladeutstyr
IEC 61980-3	Infrastrukturkrav for stasjonær induktiv lading av lette kjøretøy
IEC 61980-4	Infrastrukturkrav for høy-effekt stasjonær induktiv lading
IEC 61980-5	Infrastrukturkrav for dynamisk induktiv lading av kjøretøy i fart
IEC 61980-6	Krav til kommunikasjon og posisjonering for dynamiske ladesystemer
IEC 61980-7	Krav til toveis trådløs energioverføring mellom kjøretøy og strømnett
ISO 5474-4	Kjøretøykrav for stasjonær induktiv lading av lette kjøretøy
ISO 5474-6	Kjøretøykrav for statisk og dynamisk induktiv lading av tunge kjøretøy
CISPR 25	Grenseverdier og målemetode for beskyttelse mot radiostøy fra elektriske og elektroniske kjøretøysystemer
ICNIRP 2010	Retningslinjer for menneskelig eksponering for elektriske og magnetiske felt

2.5. Muligheter for videre teknologiutvikling

Som det kommer frem av informasjonen ovenfor er teknologien for induktiv lading allerede teknisk moden i den forstand at det allerede finnes flere kommersielt tilgjengelige løsninger og relevant driftserfaring fra bruk av teknologien. Det kan derfor ikke forventes store endringer i funksjonalitet eller mulige bruksområder for induktiv lading av elektriske kjøretøy utover det som allerede er demonstrert. Samtidig er teknologien fremdeles i en relativt tidlig fase av utviklingen mot industrialisering og masseproduksjon,

[3] J2954_202408 Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology
[4] J2954/2_202212 Wireless Power Transfer for Heavy-Duty Electric Vehicles
[5] J2954/3 - Dynamic Wireless Power Transfer for both Light and Heavy Duty Vehicles
[6] The EV Report: Electreon Sets Wireless EV Charging Standard
[7] ENRX and InductEV: agreement to standardize

og det må dermed forventes at videre utvikling kan bidra til å forbedre ytelse, redusere kostnader og muliggjøre interoperabilitet mellom løsninger fra ulike aktører.

Når det gjelder kostnader kan videre utvikling i stor grad forventes å avhenge av muligheten for å utnytte skala-effekter i produksjon og installasjon av teknologien. Både læringseffekter fra utnyttelse og installasjon av tekniske løsninger i større prosjekter og fordelene med masseproduksjon kan forventes å bidra til å redusere kostnader hvis teknologien blir tatt i bruk større skala. Videre teknologiutvikling som gir forbedringer og kostnadsreduksjoner for nøkkelkomponenter som også brukes i andre produkter, som eksempelvis silisiumkarbid (SiC)-baserte halvlederkomponenter, kan også i noen grad forventes å påvirke kostnadsbildet for induktive ladeløsninger over tid.

Mulighet for videre forbedring av tekniske ytelser er i stor grad avhengig av hvilke bruksområder som vil ha størst motivasjon for å utnytte teknologien og av utviklingen innenfor komponentteknologi som er drevet av andre industriformål. Eksempelvis kan det forventes videre utvikling mot høyere effektnivå der dette kan ha praktisk nytte og lede til relevante forretningsmodeller, mens utvikling mot høyere virkningsgrad og/eller høyere effekt-tetthet i stor grad vil være et spørsmål om designkompromisser basert på kostnad og tilgjengelig komponentteknologi.

For å muliggjøre bedre funksjonalitet og fleksibilitet vil standardisering og utvikling av løsninger for å sikre interoperabilitet og kompatibilitet bli avgjørende. Spesielt vil løsninger som sikrer interoperabilitet mellom teknologi fra ulike leverandører kunne bidra til å støtte mer omfattende utbredelse av induktive ladeløsninger. Muligheter for at kjøretøy med induktiv ladeteknologi fra ulike leverandører kan utnytte samme infrastruktur kan i enkelte sammenhenger gi flerbruksmuligheter som også kan bidra til å redusere kostnader eller øke investeringsgrunnlaget for ladesystemer. Utvikling i denne retningen har allerede startet, eksempelvis ved at Electreon har gjennomført interoperabilitets-tester[8], og at ENRX og InductEV (og dermed nå Electreon) har inngått intensjonsavtaler om å støtte standardisering og utvikling av løsninger som kan muliggjøre interoperabilitet mellom ulike leverandører.

Mulighet for lading med ulike effektnivå for ulike typer kjøretøy vil også være viktig for å sikre interoperabilitet. Dette kan enkelt realiseres med modulære systemer fra samme leverandør, siden store kjøretøy med høyt effektbehov kan ha flere mottakerenheter installert, og har allerede blitt demonstrert med Electreons systemer. Det gjenstår likevel utvikling for å oppnå løsninger som kan gi kompatibilitet mellom ladesystemer med ulike effektnivå fra ulike leverandører, eksempelvis mellom mulighetslading med høy effekt og nattlading med redusert effekt. Utvikling av åpne grensesnitt som gjør at slik funksjonalitet kan oppnås uavhengig av leverandør kan bidra til å øke utbredelse av teknologien.

Fra dette utgangspunktet så kan det forventes at teknologien for induktiv batterilading, løsningene for installasjon av infrastruktur og systemene for drift og utnyttelse av slik teknologi, inkludert kommunikasjonssystemer og løsninger for energiavregning i situasjoner med flere ulike brukere, vil forbedres gradvis over tid. Hvor raskt utviklingen vil gå vil sannsynligvis i stor grad avgjøres av hvorvidt noen form for infrastrukturutbygging i større skala vil komme i gang og om arbeidet mot standardisering vil føre frem til praktiske løsninger som kan utløse større interesse for å utnytte teknologien.

3. Organisering og forarbeider

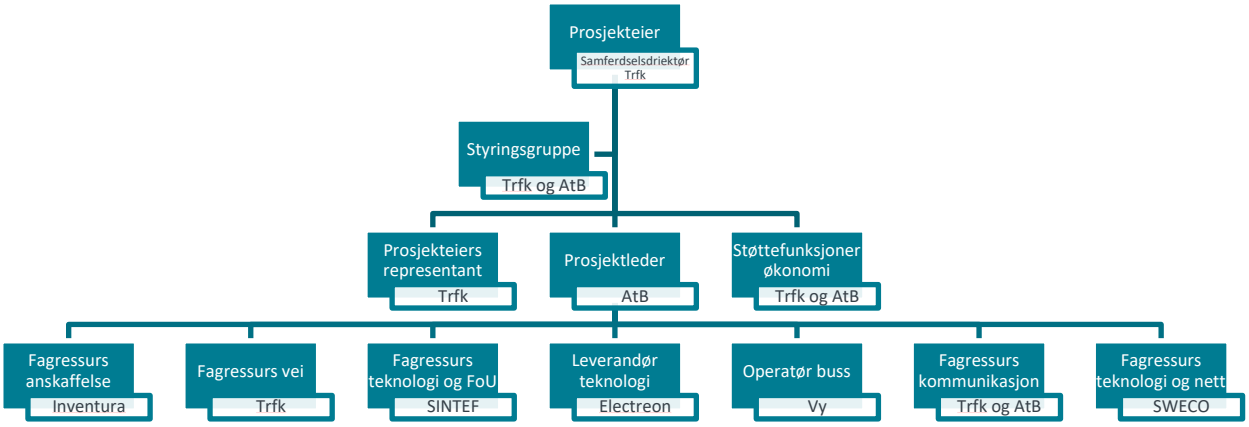
3.1. Organisering

Per i dag er det Trfk som er ansvarlig for etablering av fysisk infrastruktur for kollektivtransport i Trondheim. Trfk har også en samferdselsavdeling med betydelig kompetanse innenfor prosjektering, bygging og drift av vei og tilknyttet infrastruktur. For et prosjekt som omhandler mulig etablering av fysisk infrastruktur til kollektivtransport og i- og i tilknytning til vei var det derfor naturlig at Trfk var prosjekteier og ansvarlig overfor prosjektets finansieringskilder.

AtB er Trfks fagorgan for planlegging, anskaffelse og oppfølging av kollektivtransport. Det er AtB som inngår og følger opp kontrakter om kollektivtransport, og som har den daglige kontakten med bussoperatørene. Av hensyn til kapasitet og kompetanse, og for å best ivareta samarbeid med bussoperatør og driftsmessige aspekter ble AtB tildelt oppdraget å lede prosjektet.

[8] https://theevreport.com/electreon-sets-wireless-ev-charging-standard

Prosjektet har vært eid av samferdselsdirektør i Trfk, mens den daglige oppfølgingen har vært delegert til en styringsgruppe sammensatt av representanter fra Trfk og AtB og en representant for prosjekteier fra Trfk. Den daglige driften av prosjektet har vært lagt til prosjektleder hos AtB med støtte fra fagressurser hos Trfk og AtB, innleide fagressurser og leverandører.



Figur 3 – Prosjektorganisasjon

3.2. Faser og aktiviteter

3.2.1.Teknologianskaffelse

Pilotprosjektet bestod av en rekke anskaffelser. Av disse var anskaffelsen av den trådløse ladeteknologien den største, mest krevende og mest retningsgivende. Teknologileveransen ble håndtert som én kontrakt, mens veiarbeider, graving, nettilknytning og øvrige installasjonsoppgaver i størst mulig grad ble håndtert gjennom egne avtaler og etablerte leverandørrelasjoner. Dette reduserte kompleksiteten i teknologianskaffelsen og gjorde det mulig å utnytte eksisterende kompetanse og avtalestrukturer hos Trfk.

På grunn av tidsbegrensningene som lå i prosjektet måtte teknologianskaffelsen håndtere to hensyn samtidig: behovet for rask gjennomføring og behovet for å ivareta anskaffelsesregelverkets krav til konkurranse, likebehandling og etterprøvbarhet. For å sikre nødvendig kapasitet til rask og forsvarlig gjennomføring ble Inventura engasjert som prosjektleder for teknologianskaffelsen. Ekstern kvalitetssikring av valg av konkurranseform ble gjennomført av CMS Kluge.

Flere mulige tilnærminger ble vurdert før konkurransen ble gjennomført. En ordinær kunngjort konkurranse ble ansett som et sikkert utgangspunkt, men som krevende innenfor prosjektets tidsrammer. Prosjektet hadde behov for å få den trådløse ladeteknologien på plass raskt for å rekke bygging, testing og rapportering før resultatene skulle kunne brukes i planleggingen av 2029-anbudene. Det ble også vurdert om anskaffelsen kunne unntas ordinært anskaffelsesregelverk som forsknings- og utviklingstjeneste. Dette ble lagt bort fordi kontraktens tyngdepunkt ble vurdert å være levering av teknisk ladeutstyr, komponenter og tilhørende installasjon, ikke kjøp av en FoU-tjeneste. Klassifiseringen som varekontrakt var derfor sentral for den videre vurderingen. Eneleverandørunntaket ble vurdert, men ikke valgt. Markedsdialogen viste at det fantes mer enn én aktuell teknologileverandør for dynamisk trådløs lading. Det var derfor ikke grunnlag for å bygge anskaffelsen på at bare én leverandør kunne levere ytelsen av tekniske årsaker eller som følge av enerett. En direkte anskaffelse uten konkurranse ville dermed gitt høy anskaffelsesrettslig risiko. Før-kommersiell anskaffelse ble heller ikke vurdert som en treffende modell. Prosjektet hadde ikke til mål å få markedet til å utvikle konkurrerende løsningskonsepter på en åpen utfordring. Teknologisporet var allerede valgt: dynamisk trådløs lading. Behovet var å anskaffe og teste konkret teknologi under trønderske forhold, ikke å gjennomføre en flerfaset utviklingskonkurranse.

Den valgte løsningen ble å gjennomføre anskaffelsen som konkurranse med forhandling uten forutgående kunngjøring, basert på at anskaffelsen gjaldt en varekontrakt for forsknings-, forsøks-, undersøkelses- eller utviklingsformål. Prosedyren gjorde det mulig å invitere leverandørene som gjennom en innledende markedsdialog var identifisert som reelt aktuelle, samtidig som det ble gjennomført konkurranse og

forhandling mellom flere leverandører så langt markedet ga grunnlag for det. Valget av prosedyre bygget på at ladeteknologien, selv om den fantes i markedet, ikke var tilstrekkelig dokumentert for buss i Norge eller for realistiske norske driftsforhold. Piloten skulle derfor skaffe ny kunnskap om funksjon, driftssikkerhet, kostnader, vedlikeholdsbehov og praktisk gjennomførbarhet. Anskaffelsen hadde dermed et reelt FoU-formål knyttet til ny bruk og verifikasjon av eksisterende teknologi i et nytt og krevende bruksområde.

Den valgte prosedyren var begrunnet i pilotens særskilte FoU-formål og den teknologiske usikkerheten som skulle avklares. En storskala anskaffelse av ladeinfrastruktur til ordinær drift vil ha et annet formål: å etablere kapasitet, funksjonalitet og tjenestekvalitet over tid. Den vil derfor normalt måtte planlegges som en ordinær konkurranse etter relevant anskaffelsesregelverk, med kunngjøring og åpne konkurransevilkår. Da vil læringen fra piloten først og fremst være relevant som grunnlag for kravspesifikasjon, risikofordeling, kontraktstrategi og konkurranseutforming.

Siden verken Inventura, Trfk eller AtB hadde tidligere erfaring med anskaffelse av trådløs ladeteknologi ble SINTEF engasjert til å bistå i utarbeidelse av kravspesifikasjon og evaluering av de tekniske delene av leverandørenes tilbud. Dette sikret prosjektet tilgang på rett kompetanse, og at konkurransegrunnlaget ivaretok prosjektets behov samtidig som det var tydelig og klart nok til at leverandørene forstod hva som var krav og ønsker fra leveransen. Et utkast til kravspesifikasjon ble sendt på høring til de aktuelle leverandørene før konkurransen ble utlyst. Denne førte til noen mindre justeringer i kravspesifikasjonen som var nødvendige for å sikre konkurranse om leveransen.

3.2.2. Bussmateriell

Et viktig premiss for prosjektet var fra starten av å teste trådløs ladeteknologi i ordinær rutedrift av buss. For å få til dette var det nødvendig å enten bygge om eksisterende bussmateriell eller å anskaffe nytt og tilpasset bussmateriell som kunne gå inn i rutedrift i Trondheim.

For å sikre høy tilgjengelighet av materiell og ha mulighet til å gjøre tester av situasjoner hvor flere kjøretøy lader trådløst samtidig ønsket prosjektet å ha tilgang til to busser tilrettelagt for trådløs lading. Dagens busskontrakter i Stor-Trondheim kjøres av to bussoperatører – Tide og Vy. For å sikre størst mulig likebehandling og resultatspredning var det et ønske at bussoperatørene hadde hver sin buss i prosjektet.

Med bakgrunn i problemstillingen som var utløsende for prosjektet – forventede utfordringer med utslippsfri drift av metrobusslinje M1 og M2 – var det et mål å benytte to 24 meter metrobusser. Metrobussene i Trondheim drives av en diesel-elektrisk hybrid drivlinje. Bruk av disse bussene i prosjektet ville innebære en ombygging som bl.a. omfattet montering av mottakere for trådløs lading under bussene, tilkobling av mottakerne til bussens elektriske systemer og montering av diverse utstyr for styring og kommunikasjon. Etter en innledende dialog med produsent av 24 meter bussene ble det klart at ombygging ville bli svært tids- og kostnadskrevende og ikke være forenelig med framdriftsplanen eller budsjettet til prosjektet. Ombygging av 24 meter metrobusser ble derfor forkastet som alternativ.

Neste alternativ var å bygge om to el-busser som gikk i rutetrafikk i Trondheim til å kunne motta trådløs lading. Dette innebar å gå ned i busstørrelse fra 24 meter til 12 meter eller 18 meter. Siden den trådløse ladeteknologien er modulær, ble ikke dette vurdert å være noe stort problem for mulighetene for måloppnåelse i prosjektet. Ladeeffekten som mottas av bussen vil være et multiplum av hvor mange mottakere det er plass til under bussen, og resultater fra en busstørrelse kan derfor enkelt skaleres til å beskrive en annen busstørrelse.

Ved oppstart av prosjektet var det kun én bussoperatør – Tide – som hadde el-busser i drift i Trondheim. El-bussene fra to produsenter – 12 meter busser fra Volvo og 18 meter busser fra Heuliez. Basert på tidligere erfaring med bussmodellene og produsentene ble det vurdert at 12 meter busser fra Volvo var mest egnet for ombygging. Tide var positive til å bidra inn i prosjektet, men på grunn av at Tide leaset de aktuelle bussene var det også behov for aksept fra eier av bussene før det var mulig å gå inn i detaljer om gjennomføring. For å ivareta ønsket om at både Tide og Vy skulle ha én buss hver i prosjektet, ble jobbet parallelt med å se på muligheter for å frigjøre og overføre en el-buss fra en Vy-kontrakt utenfor Trøndelag og til Trondheim.

Forsøkene på å få aksept for ombygging fra busseier ble svært tidkrevende, og endte til slutt ut i et nei. Hovedutfordringen sett fra prosjektet sin side var at antall aktører med økonomiske interesser i bussene var stort og uoversiktlig, og at flere av aktørene satt langt unna Trondheim og hadde begrenset kunnskap om og interesse i bussdriften i Trondheim. Det ble derfor vanskelig å nå frem med argumentasjon om at

viktigheten av prosjektet var større enn risikoen og merarbeidet for busseier og andre økonomiske interessenter.

En løsning for bussmateriell ble til slutt funnet i å koble prosjektet sitt bussbehov med en bestilling av tre 12 meter busser AtB skulle gjennomføre som del av en planlagt kapasitetsøkning på linje 71 (Melhus – Dora) og linje 82 (Brekkåsen – Hesttrøa). Prosjektet ble enige med AtB om å få legge til nødvendige endringer i kravspesifikasjonen til to av bussene slik at de kunne brukes til trådløs lading i prosjektet. Denne løsningen innebar at det var bussoperatør som valgte bussleverandør (Yutong), og at prosjektet sammen med teknologileverandør Electreon gikk i dialog med Vy og Yutong om hvordan tilpasning av bussmateriellet skulle gjennomføres i praksis. En utfordring med denne løsningen var at bussene ikke ville komme på plass tidsnok til å brukes i testing vinteren 2024 – 2025. For å likevel ha muligheten til å teste gjennom vinteren 2024 – 2025 leide prosjektet inn en buss som tidligere hadde vært i bruk i et prosjekt som testet samme type teknologi på Gotland i Sverige.

Etter innledende prosjektering konkluderte Yutong med at det ikke ville være mulig å få plass til tre mottakerplater under deres 12 meter klasse 1 buss (Yutong U12) uten at akselavstanden ble forlenget[9]. Tre mottakerplater var en nødvendighet for å nå målet for ladeeffekt som var satt i prosjektet. Økning av akselavstanden i 12 meter busser ville kreve betydelig teknisk utviklingsarbeid og at de ombygde bussene måtte gjennomgå omfattende tester og sertifiseringer før de kunne godkjennes for trafikk. Økning av busslengden til 13 meter – en busslengde Yutong allerede hadde i bussporteføljen (Yutong U13) – ble foreslått som en vesentlig rimeligere løsning med raskere og mer forutsigbar framdrift. Økningen fra 12 til 13 meter gjorde at bussens akselavstand økte med 80 cm og svingradius økte med ca. 1,75 meter.

En utfordring i utviklingen av trådløse ladesystemer er å finne et best mulig kompromiss mellom to motstridende hensyn: tilstrekkelig bakkeklaring i ordinær drift og høy effektivitet i den trådløse ladingen. I teknologianskaffelsen hadde prosjektet i utgangspunktet håndtert dette ved å stille krav om at mottakerplatene ved behov skulle kunne leveres med en automatisk hev-senk-løsning. Dette var imidlertid lite ønskelig fra et driftsperspektiv, både fordi en slik løsning ville introdusere bevegelige deler under bussen og dermed øke eksponeringen for vær, skitt og mekanisk slitasje, og fordi funksjonaliteten ikke er nødvendig på busser med luftfjæring. Slike busser vil normalt ha en knelingsfunksjon som kan brukes til å senke bussen ved behov, også i forbindelse med lading. Planen om aktiv hev-senk ble derfor forkastet. I prosjektet måtte knelingen først aktiveres manuelt av fører, men løsningen ble senere endret slik at senkningen skjedde automatisk styrt av en geofence-sone ved ladepunktet.



Figur 4 – Integrasjon av mottakerplater under buss

All nødvendig engineering, testing og godkjenninger av buss med integrasjon av utstyr for trådløs lading ble først gjennomført ved Yutong sin fabrikk i Kina. Med Yutong sine fasiliteter og kompetansemiljøer tett på gikk dette raskt og effektivt. Fra tidspunktet alle avtaler om produksjonen av bussene var signert forlenget integrasjonen av mulighet for trådløs lading i bussene leveringstiden med ca. 1 måned sammenlignet med busser fra samme leverandør med standard spesifikasjoner. Den økte tidsbruken skyldtes at det var snakk om en førstegangsintegrasjon i bussmodellen, og at det derfor var ekstra behov

[9] Etter prosjektets bestilling har Yutong lykkes med å finne plass til tre mottakerplater i 12 meter busser til en større leveranse til en annen bussoperatør. Prosjektet er ikke kjent med hvordan det er løst teknisk eller hvor omfattende endringer som var nødvendige i bussene.

for engineering og testing. Det er ikke grunn til å tro at produksjonstiden vil være vesentlig lenger enn for en standardbuss etter at integrasjonsarbeidet er gjennomført.

Før import til Norge ble utstyret for trådløs lading demontert slik at buss og ladeutstyr ble importert hver for seg. Etter at bussene hadde gjennomgått alle relevante godkjenninger i Norge ble det trådløse ladeutstyret montert og nødvendige godkjenninger gjentatt. Import og norske godkjenninger skjedde uten problemer.

3.2.3. Prosjektering

Teknisk prosjektering og tegning av infrastrukturen foregikk i perioden oktober 2023 til februar 2024. Prosjekteringsfasen var preget av et tett samspill mellom veiavdelingen i Trfk, AtB og teknologileverandør (Electreon). I sluttfasen bidro også utførende entreprenør Mesta med byggeteknisk kompetanse.

Trfk hadde hovedansvaret for overordnet prosjektering og koordinering, inkludert innhenting av kartgrunnlag, innmåling av eksisterende situasjon og etablering av geometrisk grunnlag for tiltaket. Dette omfattet blant annet bestilling av data for eksisterende VA- og elektroanlegg, samt supplerende undersøkelser som boreprøver for å avdekke faktisk asfalttykkelse. Electreon hadde ansvar for detaljprosjektering av selve ladesystemet, herunder utforming av ladesegmenter, kabelføringer, tilkobling til energiforsyning og tekniske komponenter som styringsenhet (MU) og omformere. Mesta bidro med byggeteknisk kompetanse inn i prosjekteringen, særlig knyttet til gjennomførbarhet og praktiske forhold rundt installasjon. Godt samspill mellom de involverte aktørene var nødvendig for å sikre at den tekniske løsningen kunne integreres i eksisterende veistruktur og bygges innenfor en stram tidsramme frem mot byggestart sommeren 2024.

Prosjekteringen ble i hovedsak gjennomført i Autodesk Civil 3D, som fungerte tilfredsstillende for utarbeidelse av tegninger og stikningsdata. Samtidig kan det stilles spørsmål ved om mer avanserte modelleringsverktøy, f.eks. BIM-baserte løsninger, kunne gitt bedre samhandling og oversikt, særlig på lengre strekninger og/eller bynære områder der kampen om arealet (både over og under bakken) er større.

Prosjekteringen viste seg gjennomførbar innenfor det som i utgangspunktet var et ambisiøst tidsskjema. Kombinasjonen av en relativt enkel lokasjon (avsidesliggende område ved depot) og høy grad av involvering fra alle parter bidro til effektiv prosjektering. Innhenting av kartgrunnlag og gjennomføring av supplerende målinger ga et tilstrekkelig godt beslutningsgrunnlag for å prosjektere løsningen uten større konflikter med eksisterende infrastruktur.

Samlet sett viser erfaringene fra prosjekteringsfasen at pilotprosjektet var gjennomførbart innenfor korte tidsrammer ved tett samarbeid og høy grad av fleksibilitet. Samtidig peker erfaringene på behov for bedre struktur i informasjonsdeling, tydeligere standardisering og mer bevisst og systematisk bruk av verktøy og prosesser. Antall berørte aktører og behovet for oppdatert kartgrunnlag var stort sett i forhold til prosjektets størrelse. For større utbygginger vil kvalitet i grunnlagsdata og dokumentasjon være en enda viktigere faktor, og det bør legges opp til mer strukturert innsamling og systematisering av grunnlagsdata i tidlig fase.

3.2.4. Utbygging

For å holde gjennomføringen av utbyggingen så enkel og ryddig som mulig var det fra prosjektet sin side ønskelig å engasjere én totalentreprenør med helhetlig ansvar for detaljplanlegging og gjennomføring for alle involverte fag. På grunn av begrenset varighet og behov for fysiske møter og befaringer under planleggingen ble det vurdert som ønskelig med en entreprenør med sterk lokal tilstedeværelse.

En utfordring for prosjektet var at verken prosjektet eller aktuelle entreprenører hadde tidligere erfaring med utbygging av trådløs lading i vei. Selv om mye – spesielt det som omhandlet bruk av tunge maskiner – ble antatt å være svært likt som i et hvilket som helst veiprosjekt, var det også en del særkrav og rekkefølgekrav som var annerledes. Dette gjorde utbyggingen krevende å prisestimere, og det var en frykt fra prosjektet sin side for at krav om fastpris eller bruk av kontrakter hvor tilbudt pris gav en sterk grad av forpliktelse ville føre til store risikopåslag. For å få et best mulig grunnlag til å kunne vurdere kostnader for fremtidige utbygginger ble det også vurdert å ha en verdig å få mest mulig detaljert input om faktisk forbruk i form av timer (mennesker og maskiner) og materialinput. På bakgrunn av dette landet prosjektet på en modell hvor prosjektet selv bar all risiko knyttet til forbruk under utbygging.

Etter en gjennomgang av Trfk og AtBs rammeavtaler ble det klart at kontrahering av entreprenør kunne gjøres gjennom Trfks veiavdeling sin rammeavtale for drift og vedlikehold av veiinfrastruktur. Dette

gjorde at prosjektet kunne tre inn i en etablert relasjon og etablerte kommunikasjonskanaler og basere seg på en avtale med faste satser per time for mennesker, maskiner, ulike typer masser mm. Dette sparte prosjektet for tid og reduserte usikkerheten rundt budsjettering og gjennomføring.

Mesta – i første omgang ved prosjektleder og byggeleder – ble koblet på prosjektet så fort som mulig etter at entreprenør var kontrahert og bidro aktivt inn i prosjekteringsfasen av prosjektet med byggetekniske innspill om nødvendig tegningsunderlag, forslag til gode praktiske løsninger, estimater av omfang og tidsbruk, hms-tiltak mm. Mesta ved prosjektleder og byggeleder fungerte som prosjektets kontaktpunkter gjennom utbyggingsfasen. Mesta kontraherte selv underentreprenører og rådgivere der det var behov, bl.a. for elektro, landmåling og asfalt.

Trinnene i utbyggingen er gjennomgått steg-for-steg i kapittel 4.

3.2.5. Testing

Et av de viktigste målene med prosjektet har vært å teste og verifisere teknologiens funksjon, stabilitet og sikkerhet under realistiske driftsforhold. Testaktiviteten har vært delt opp i flere hovedaktiviteter – vinterfunksjon, stråling og interferens, fremmede objekter, avvikende kjøremønstre og daglig rutedrift. Testene ble gjennomført av SINTEF med bistand fra teknologileverandør der det var nødvendig for tilganger ol. Tester av stråling og interferens ble også gjennomført av en annen rådgiver på oppdrag fra teknologileverandør.

- Vinterfunksjon

  Vintertesting ble kjørt vinteren 2024 – 2025 for å undersøke teknologiens ytelse – og eventuelt reduksjon i ytelse – under varierte vinterforhold. Testene ble gjennomført med bussen som var leid inn fra Sverige. Bussen var i Norge på svenske skilter og hadde begrensninger på bruk utenfor depotområdet som gjorde at det ikke var mulig å kjøre den i rutetrafikk med passasjerer. Testingen måtte derfor foregå inne på depotområdet.

  Kjøringen under vintertestene ble i all hovedsak gjennomført av en liten gruppe på fire Vy-sjåfører. Spredning i alder, kjønn og erfaring ble hensyntatt i utvelgelsen av sjåfører med mål at utvalget skulle være mest mulig representativt for hele Vys sjåførpopulasjon. Ved behov ble de faste sjåførene supplert av instruktør fra Vy som også fungerte som superbruker og kontaktpunkt for prosjektet og sjåfør fra teknologileverandør.

  De fire testsjåførene fra Vy gjennomgikk en halv dags opplæring i teknologien inklusive veiledet kjøring. Deretter ble det satt opp en vaktliste hvor det ble kjørt korte rundturer inne på depotområdet i 20 – 30 minutter hver dag. Som den første testen som ble kjørt med «vanlige» bussjåfører var det et selvstendig mål å undersøke hvilket omfang av opplæring som var nødvendig for at sjåførene skulle forstå og klare å bruke teknologien. Dette ble vurdert dels kvalitativt basert på tilbakemeldinger og spørsmål fra Vy-sjåførene og dels kvantitativt ved å sammenligne sjåførenes oppnådde ladeytelse med tilsvarende tall for sjåføren fra teknologileverandør som referanse.

  For hver kjøring logget sjåførene starttid, temperatur, føreforhold, SoC start, SoC slutt, evt. feilmeldinger i buss og evt. andre kommentarer. Sjåførenes logger ble koblet mot data fra Electreon sine systemer og værdata fra nærliggende værstasjoner for å kunne evaluere systemets ytelse under ulike vær- og føreforhold.

  I tillegg til testene som ble gjort under kjøring ble det gjennomført noen tester av statisk lading under vinterforhold. Hensikten med disse var å vite eksakt bussplassering slik at eventuelle virkninger av snø og is kunne isoleres fra usikkerhet om bussen var optimalt plassert i kjørebanen.

  Resultater og erfaringer fra vintertestene er presentert i delkapittel 5.1.

- Økt bakkeklaring og størrelse på ladefelt

  Som en oppfølging av funn fra vintertestene ble det gjennomført en egen test av hvordan økning av bakkeklaringen til bussen og feilplassering av bussen i kjørebanen påvirket effektiviteten til den trådløse ladingen. For å ha kontroll på alle posisjonsparametere ble testene gjennomført på bar asfalt og med statisk lading. Økningen av bakkeklaringen ble gjort ved å kjøre hjulene på bussen opp på små ramper som økte bussens bakkeklaring med 4,8 cm.

  I testene ble bussens posisjon ift. optimum forskjøvet sideveis og i lengderetningen. Bussen ble ladet med og uten ramper som økte bakkeklaringen. Effektiviteten – dvs. forholdstallet mellom energi

levert av ladesegmentene og energi mottatt av mottakerne på bussen – ble logget og sammenlignet. Testene ble gjennomført av SINTEF med bistand fra teknologileverandør.

- Stråling og interferens

EMC beskriver el-veiens evne til å fungere i sitt elektromagnetiske miljø uten å føre til forstyrrelser av annet utstyr. EMC er viktig for å sikre stabil drift av el-veien, bl.a. at kommunikasjonen mellom buss og vei er stabil, og at ikke el-veien forstyrrer andre systemer som annen ladeinfrastruktur og kommunikasjonsutstyr. EMC-testene ble gjennomført i henhold til IEC 61980-1:2020, CISPR 11:2015 og CISPR/TR 16-2-5:2008. Testene ble gjennomført av firmaet «EMC och elkvalitet Mikael Sigge AB» på oppdrag fra teknologileverandør. Siden EMC i liten grad er sikkerhetskritisk for tredjepersoner ble det ikke gjort noen replisering av EMC-testene.

EMF beskriver magnetiske og elektromagnetiske felt. Magnetisk felt finnes over alt – både med naturlig opphav og skapt av elektrisk utstyr. For eksempel er jordas magnetfelt grunnlaget for bruk av kompass og navigasjon. Men sterke eller feil eksponerte magnetiske felt kan gi helsefare for mennesker og tekniske problemer for utstyr. Effektiv trådløs overføring av høy effekt - som er det man prøver å oppnå med trådløs lading – krever sterke magnetiske felter. For å være sikre på at de magnetiske feltene som dannes av trådløs ladeteknologi ikke utgjør noen risiko for mennesker eller annet teknisk utstyr ble det gjennomført grundige målinger av magnetiske felter under lading. Dette kan være spesielt kritisk for mennesker med elektriske medisinske implantater som pacemaker. Det ble gjort målinger både i- og utenfor bussen, på sjåfør- og passasjerplasser, og i ulike høyder helt ned til bussgulv og fortauskant. EMF-testene ble gjennomført i henhold til ICNIRPs retningslinjer. Testene ble gjennomført i to omganger; Først av «EMC och elkvalitet Mikael Sigge AB» på oppdrag fra teknologileverandør og senere repetert av SINTEF.

I oktober 2024 ble prosjektet kontaktet av Nasjonal kommunikasjonsmyndighet (Nkom) som er tilsyns- og forvaltningsmyndighet for elektronisk kommunikasjon i Norge. Nkom hadde spørsmål om anleggets elektromagnetiske stråling. Nkom fikk tilsendt EMC- og EMF-rapportene og fulgte ikke opp spørsmålene med egne målinger eller videre undersøkelser.

- Fremmede objekter

Hvis det er magnetiske objekter i ladefeltet når det er aktivt vil de bli varmet opp, og på grunn av styrken i magnetfeltet kan oppvarmingen skje svært raskt. Oppvarming av fremmede objekter kan utgjøre en risiko både for tredjeperson og for bussen selv. For eksempel kan personer på et busstopp berøre varme objekter etter at bussen har kjørt videre, eller kombinasjoner av magnetiske og brennbare materialer kan ta fyr.

Risikoen forbundet med oppvarming av fremmede objekter vil være størst ved statisk trådløs lading – lading når bussen står stille. Ladesegmentene det lades fra vil da kunne være aktiv over en lengre periode med potensiale for å varme fremmede objekter opp til høye temperaturer. Ved dynamisk trådløs lading – lading i fart – vil bussen passere hvert ladesegment raskt. Hvis en buss kjører i 20 km/t vil f.eks. hvert ladesegment bare være aktivt i ca. 0,5 sekunder per passering og potensialet for oppvarming derfor begrenset.

Det finnes flere tiltak som kan bygges inn i infrastrukturen for å redusere risikoen for at fremmede objekter skal utgjøre noen fare. Det er mulig å bygge inn funksjonalitet i vei-delen av infrastrukturen som detekterer fremmede magnetiske objekter som forstyrrelser i magnetfeltet og kutter strømmen til segmenter med forstyrrelser ved deteksjon. Denne funksjonen vil gi god beskyttelse mot større metallobjekter som er lette å detektere i magnetfeltet. Det er også mulig å bygge inn termiske kameraer for varmedeteksjon på mottakersiden i bussen, slik at strømmen kan kuttes hvis det er objekter i veibanen under bussen som blir varme. Dette vil også gi en beskyttelse mot mindre objekter som kan være vanskeligere å detektere i magnetfeltet.

Pilotinstallasjonen i Kvenildstrøa var i utgangspunktet spesifisert som en dynamisk installasjon. Det var ikke lagt opp til at den skulle omfatte funksjonalitet for deteksjon av fremmede objekter verken i vei- eller buss-delen. Tidlig i prosjektet ble det imidlertid bestemt at også testing av statisk trådløs lading skulle foregå på den dynamiske installasjonen. Testing av hvilke risikoer fremmede objekter kan utgjøre ble derfor gjennomført i to omganger; først ble det testet uten noen form for deteksjonssystem, og så ble det montert et provisorisk deteksjonssystem (termiske kameraer) på buss-siden og testene repetert. Alle tester av risikoer ved fremmede objekter ble gjennomført av SINTEF med bistand fra teknologileverandør.

- Avvikende kjøremønstre

Uventede situasjoner og avvik oppstår hele tiden i trafikken. For å fungere under reelle driftsforhold er det avgjørende at den trådløse ladingen opptrer stabilt og forutsigbart også når bussene ikke kjører helt som planlagt. Dette omfatter bl.a. at det ikke oppstår overbelastninger eller noe annet som kan skade systemet, og at systemet ikke går i lås eller blir sittende fast i en feilkode. Avvikende kjøremønstre antas i første rekke å kunne være en utfordring for programvaren som styrer den trådløse ladingen.

Testing av systemets funksjon ved avvikende kjøremønstre ble gjennomført med Kvenildstrøa stengt for annen trafikk. To busser ble benyttet i testene. Kjøremønstre som ble testet omfattet start-stopp, rygging, forbikjøring, kjøring i feil kjørebane og kombinasjoner av disse. Testene ble gjennomført av SINTEF med sjåfører fra teknologileverandør.

- Daglig rutetrafikk

For å teste stabiliteten til teknologien i et reelt driftsmiljø ble bussene satt i rutetrafikk på linje 75 (Trondheim S – Spongdal), 76 (Flakkråa – Spongdal) og 77 (Spongdal – Heimdal). Begrunnelse for valg av linjer er utdypet i 3.2.6.

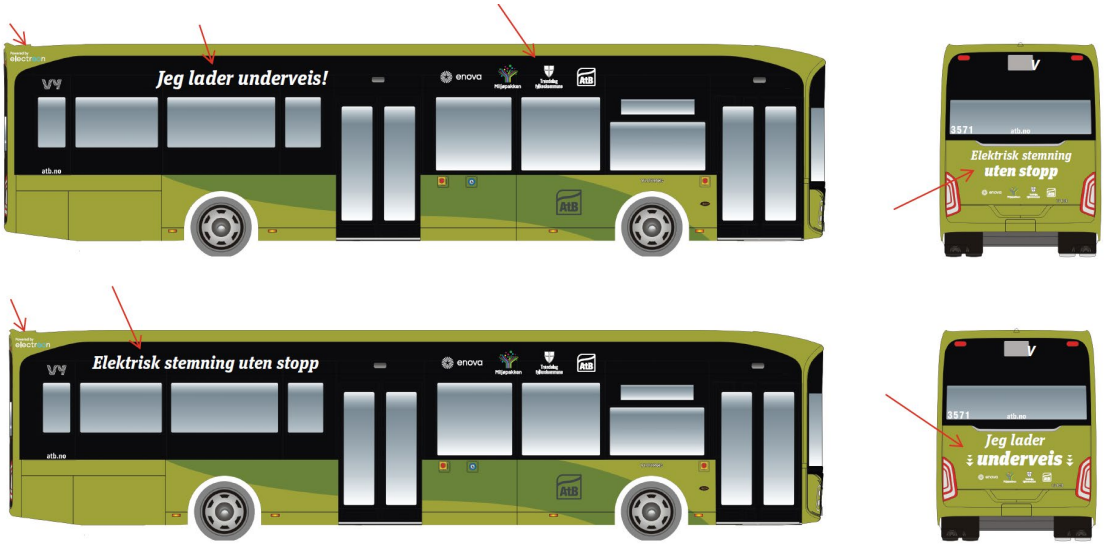
Målene med testingen i rutetrafikk var bl.a.:

- å få erfaring med oppetiden og tilgjengeligheten til systemet.
- å teste om installasjonen på buss-siden var robust nok til å tåle daglig bruk på vei av varierende standard.
- Å teste teknologien i bruk med en stor gruppe sjåfører.
- Å gjøre bussene og teknologien til en synlig del av bybildet.

Siden ladeinfrastrukturen i prosjektet kun ble bygget ut i Kvenildstrøa på Sandmoen var den trådløse ladingen av bussene i rutetrafikk begrenset til passeringene på vei ut av depotet om morgenen og etter pause midt på dagen, i tillegg til eventuelle korte turene inne på depotområdet mellom oppstillingsplass og vask/klargjøring. Hoveddelen av energitilførselen til bussene kom fra plugglading med CCS2-plugg over natt.

I perioden med rutetrafikk inngikk bussene på lik linje med alle andre busser i VY sin busspark. Dette medførte bl.a. at de i teorien kunne bli kjørt av alle Vys sjåfører i Trondheim inklusive tilkallingsvikarer. Dette er en stor gruppe mennesker, noe som gjorde at gjennomføring og omfang av opplæring ble et viktig spørsmål. Med utgangspunkt i tilbakemeldinger fra Vy om opplæringsbehov – blant annet basert på erfaringene og tilbakemeldingene fra sjåførene som bidro i vintertestingen - ble det bestemt at det ville være tilstrekkelig med en instruksjonsvideo i tillegg til en skriftlig og visuell trinn-for-trinn guide. Instruksjonsvideoen og trinn-for-trinn guiden ble distribuert til alle sjåførene. Instruksjonsvideoen inngikk i tillegg i loopen på Vy sine info-skjermer på Sandmoen, og en utskrift av trinn-for-trinn guiden ble lagt tilgjengelig i bussene. Som under vintertestingen hadde Vy en egen superbruker som fungerte som førstelinje-kontakt ved spørsmål fra sjåførene.

Utvendig var bussene tydelig merket med at de inngikk i pilotprosjektet. Bak og på siden av bussen var det egne slagord knyttet til at bussene ladet trådløst og i fart i tillegg til logoer fra nøkkelpartnere og finansieringskilder.



Figur 5 – Utvendig profilering av buss

Bussene ble kjørt i daglig rutetrafikk i perioden 19. mai 2025 til 31. desember 2025. I denne perioden kjørte bussene 3 460 km i rute per normaluke, totalt snaut 90 000 km ila. testperioden. Siden formålet med testingen i daglig rutetrafikk var å få erfaring med teknologien i reell drift ble det ikke lagt opp til egne dedikerte tester eller særskilt rapportering fra sjåførene i testperioden. Ytelser, stabilitet og andre driftsparameter ble registrert fortløpende, mens omfanget av direkte intervensjoner ble holdt på et absolutt minimum.

3.2.6.Drift

Driftsfasen i pilotprosjektet var i utgangspunktet planlagt delt inn i to faser; en innledende periode med prøvedrift og så ordinær rutedrift. Prøvedriften skulle bl.a. omfatte tekniske tester som var nødvendige for å sikre at alle systemer fungerte tilfredsstillende før bussene ble satt i ordinær drift hvor eventuelle problemer også ville ramme passasjerene. Som forklart i kapittel 3.2.2 tok det imidlertid lengre tid enn planlagt å få tak i busser som kunne gå i rute. Testing under vinterforhold var en av de viktigste aktivitetene i prosjektet, og med den variasjonen i snømengde og temperatur som har vært de siste vintrene i Trondheim ble det vurdert som for risikabelt å kun ha mulighet for testing én vinter. Det ble derfor nødvendig å endre og stokke om på planene for driftsfasen. I den nye planen ble driftsfasen splittet opp i tre deler; vinterdrift med innleid buss, rutedrift med nye busser, og tekniske tester der det var mulig og nødvendig.

Den innleide bussen hadde allerede vært i drift i en lignende pilot i Sverige. Den hadde derfor ikke det samme behovet for prøvedrift som en ny buss ville hatt. Bussen hadde imidlertid en del bruksbegrensninger som gjorde at den ikke kunne gå i rute eller med passasjerer. Vinterdriften ble derfor sterkt test-preget og er beskrevet i 3.2.5 under punktet *Vinterfunksjon*. Fordelen med dette var at prosjektet raskt og effektivt fikk samlet mye data fra vinterdrift av systemet.

Med de nye bussene på plass var det behov for en innledende fase med prøvedrift før bussene var klare for å settes i ordinær rutedrift. Prøvedriften hadde til hensikt å sikre at alle systemer i bussene - inklusive kommunikasjonen mellom ladesystem og buss - fungerte tilfredsstillende. Den innledende prøvedriften ble gjennomført av teknologileverandør i samarbeid med bussleverandør. Når alle nødvendige tester var gjennomført ble bussene klarert for rutedrift.

Målet for den ordinære rutedriften var at bussene skulle brukes i et mest mulig realistisk driftsmiljø. Det innebar at de ideelt sett skulle inngå som en hvilken som helst annen buss i Vys busspark, kjøres av helt vanlige bussjåfører og ellers følge vanlige rutiner for renhold, vedlikehold, uttak osv. Et nødvendig unntak var at vedlikehold av selve ladesystemet måtte utføres av teknologileverandør i samråd med bussleverandør.

Et sentralt tema i forkant av driftsfasen var risikoen for skader på mottakerplatene under bussene og hvordan denne ble påvirket av valg av trasé. Mottakerplatene var montert slik at de var omgitt av en beskyttende kant som ville ta unna for støt hvis bussen skulle slå nedi fartshumper, kanter e.l. Denne

reduserte bakkeklaringen til bussen noe. I tillegg gjorde den økte akselavstanden at den effektive høyden over fartshumper (primært 30- og 40 km/t humper) kunne bli noe lavere. I utgangspunktet skal fartshumper i Norge ha en maksimal høyde på 10 cm – godt innenfor bussers bakkeklaring. Praktisk erfaring tilsier imidlertid at kurvaturen til veibanen før- og etter fartshumper, eventuelle groper og sporing i asfalten mm. kan gjøre at den faktiske høyden er høyere.

Før oppstart gjennomførte AtB i samarbeid med Vy en vurdering av alternative traséer med mål å finne traseer som ble kjørt med samme type bussmateriell, hadde Sandmoen som ende- eller reguleringspunkt og som var kjørbare både mht. sporing og bakkeklaring. Kandidater ble gjennomgått i detalj, og kritiske punkter ble diskutert med berørte veieiere. I utgangspunktet var ønsket å kjøre linje 82 Brekkåsen – Hesttrøa. Økningen i bussenes svingradius da busslengden ble økt fra 12 meter til 13 meter gjorde imidlertid at det ikke var mulig å kjøre den traseen. Å gjøre endringer i traséene til linje 82 ble vurdert å være for tidkrevende til å kunne gjøres innenfor prosjektet. Vy startet derfor et arbeid med å se på alternative traseer for bussene i prosjektet med en plan om å overføre to 12 meter busser som vanligvis kjørte på andre linjer til linje 82 og benytte de nye bussene på andre linjer.

Neste kandidat var linje 23 Sandmoen – Pirbadet. Etter prøvekjøring av traseen sammen med representanter for Vy og en innledende dialog med berørte veieiere ble det klart at tiltaksbehovet var for stort til at det var gjennomførbart innenfor prosjektets rammer. Utfordringene var spesielt knyttet til fartsdempere i konvekse kurver (hvor den effektive høyden kan bli høyere enn standard pga. bussenes lange akselavstand) og til rundkjøringer med spesiell utforming (f.eks. rundkjøringen i krysset Bøckmans veg – Byåsveien).

Et tredje alternativ som ble identifisert som en mulighet var linjene 75 (Trondheim S – Spongdal), 76 (Flakkråa – Spongdal) og 77 (Spongdal – Heimdal) på Byneset. Siden ingen av linjene hadde endepunkt på Sandmoen gjorde disse det mer krevende å få til jevnlig bruk av ladeinfrastrukturen på Sandmoen i løpet av dagen. Med lavere frekvens for avgangene gav linjene også en noe lavere utnyttelse av bussmateriellet enn det som Vy og AtB i utgangspunktet hadde forutsatt. På den positive siden hadde linjene færre fartsdempere enn busslinjene i tettere befolkede områder. De tre traséene ble først prøvekjørt med bil med konklusjon at de kunne være kjørbare. Som en siste sjekk før det ble grønt lys ble traseene inkludert aktuelle omkjøringer og reservetraseer ved veiarbeid/stengt vei prøvekjørt med en av de aktuelle bussene. Representanter fra Vy, AtB og begge de berørte veieierne (Trfk og Trondheim kommune) var med på prøvekjøringen. Under prøvekjøringen ble bussen plassert i verste posisjon over alle fartsdempere og andre brå kanter o.l., og minste bakkeklaring ble målt.

Konklusjonen ble at traseene ville være kjørbare så lenge hastigheten til bussen var innenfor fartsgrensen. Som en ekstra sikkerhetsventil ble det avtalt med de berørte veieierne at de første ukene med drift skulle betraktes som en prøveperiode, og hvis behov så skulle det iverksettes tiltak. Det mest aktuelle tiltaket ville vært å bygge om fartshumper fra 30 km/t-humper (med kort radius) til 50 km/t-humper (med vesentlig lengre radius)[10]. Bakkeklaringen ble imidlertid ikke noe problem og ombygging av fartshumper ble aldri aktuelt.

I løpet av driftsperioden var det tre episoder som gav skader på bussene og førte til at de måtte tas ut av trafikk i kortere perioder. Ingen av episodene ble forårsaket av- eller førte til skader på utstyr som var montert i bussene i forbindelse med prosjektet. De to første ble forårsaket av at bussene tok borti faste objekter som gav skader på vinduer, dører og karosseri. Sikre årsaker er ikke kjent, men bussenes lange svingradius antas å ha vært medvirkende. Den siste episoden var en delvis utforkjøring forårsaket av en unnvikelsesmanøver av et hull i veien og en veiskulder som gav etter. Bussen måtte hjelpes tilbake på veien, men fikk ellers ikke noen skader. Ingen av episodene førte til personskader.

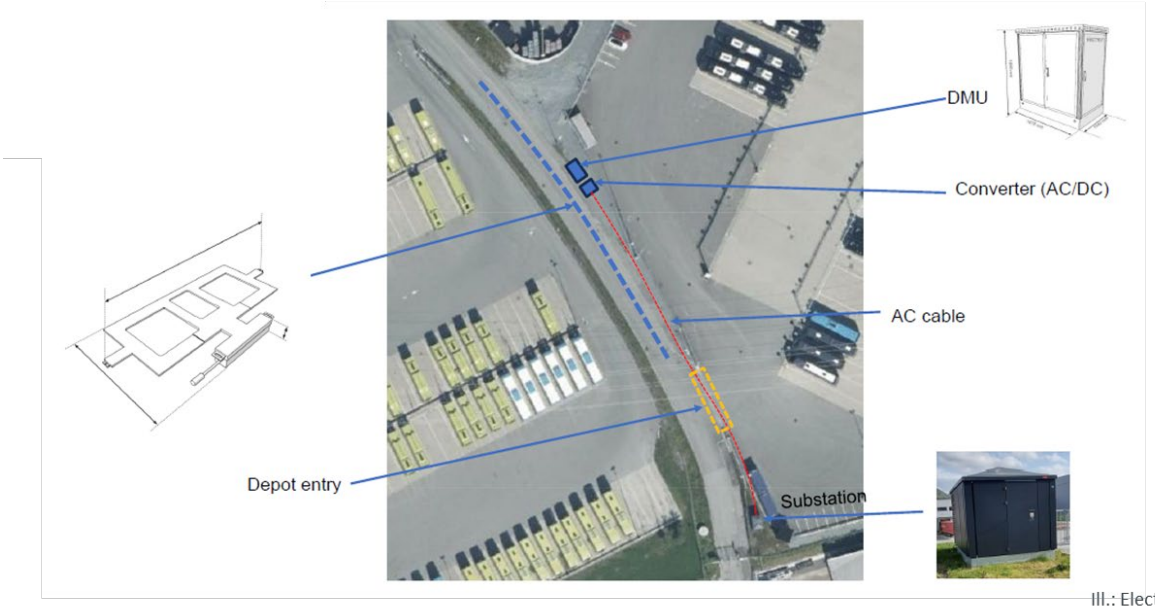
[10] Se Statens vegvesen håndbok V128, kap. 3.1.3 – 3.1.4 for mer informasjon om mål på fartshumper.

4. Utbygging og drift

4.1. Infrastruktur for dynamisk trådløs lading

Pilotstrekningen for dynamisk trådløs lading ble bygget i Kvenildstrøa på Sandmoen. Dette er en veistrekning som deler depotområdet på Sandmoen i to, og som fungerer som adkomstvei for den ene delen av bussdepotet. For å minimere forstyrrelsen av bussdriften ble byggeperioden planlagt til sommerruteperioden fra slutten av juni til starten av august. I denne perioden reduseres antall bussavganger med ca. 40 % i forhold til vanlig. I samråd med Vy og entreprenør ble det bestemt at den beste løsningen både mht. hms og effektiv og fleksibel gjennomføring av byggingen var å stenge Kvenildstrøa i byggeperioden. Adkomst til begge depotområdene ble sikret ved å etablere en midlertidig omkjøringsvei via en rampe som knyttet de to depotområdene sammen.

Infrastrukturen for dynamisk lading – lading i fart – består av 52 ladesegmenter, en styringsenhet, en AC/DC-omformer og kabling. En oversikt over hovedelementene med ca. plassering er vist i Figur 6.



Figur 6 – Oversiktstegning over infrastrukturen for dynamisk lading

Før byggingen startet ble det etablert nettilknytning til en nærliggende nettstasjon. Det var ikke plass til å etablere en ny kurs med egen måler i den eksisterende nettstasjonen, så dette ble plassert i et eksternt koblingsskap (Figur 7). Dette var arbeid som i henhold til gjeldende regelverk måtte gjennomføres eller oversees av områdekonsesjonæren for nett. For å redusere risikoen for forsinkelser i byggeukene ble koblingsskap og nettilkobling etablert noen uker før byggestart.



Figur 7 – Koblingsskap og tilknytning til nettstasjon

I samarbeid med entreprenør og teknologileverandør ble det utarbeidet en dag-for-dag byggeplan (Tabell 8) som omfattet rekkefølge og varighet av alle hovedaktiviteter som grunnlag for planlegging av personell, maskiner og leveranser. På grunn av ulempen som omkjøringsveien representerte for Vy og et ønske i prosjektet om å teste hvor fort det var mulig å få til utbygging ble det lagt opp til at alt arbeid som berørte veibanen skulle gjennomføres på én arbeidsuke. Uke 25 ble avsatt til forberedende aktiviteter som ikke berørte veibanen, mens uke 26 ble avsatt til arbeid med Kvenildstrøa stengt.

Tabell 8 – Gjennomføringsplan

	Uke 25							Uke 26							Uke 27
	Man 17.06	Tir 18.06	Ons 19.06	Tor 20.06	Fre 21.06	Lør 22.06	Søn 23.06	Man 24.06	Tir 25.06	Ons 26.06	Tor 27.06	Fre 28.06	Lør 29.06	Søn 30.06	xxx
Ferdigstilling kabelgrøft															
Fjerning av asfalt og masser fra fortau															
Fjerning av kantstein															
Resetting av kantstein															
Gjenoppbygging og avretting av fortau															
Etablering av midlertidig omkjøringsrampe															
Stenging av Kvenildstrøa															
Fjerning av asfalt og masser fra vei															
Asfaltering underlag								Natt til tirsdag							
Fresing av spor til kabler og ladesegmenter															
Utplassering og testing av ladesegmenter															
Gjenfylling av grøfter										Onsdag kveld eller torsdag morgen					
Arrangement for media											10:30-12:00				
Asfaltering av bindelag															
Asfaltering av slitelag															
Asfaltering av fortau															
Opprydning og gjenåpning av Kvenildstrøa															

Deler av kabeltraséen fra nettstasjonen og til AC/DC-omformeren gikk under eller tett på fortau. I første del av uke 25 ble fortau og kantstein fjernet slik at det ble mulig å ferdigstille kabelgrøfter fram til tiltenkt plassering av fundamenter for AC/DC og styringsenhet (Figur 8). Fundamentene ble prefabrikkert i betong på bakgrunn av målskisser fra teknologileverandør. Under etableringen av fundamentene dukket det opp en ukjent lavspentkabel som ikke var synlig på kart eller under kabelpåvisning. For å unngå forsinkelser

med tilhørende kostnader for maskiner og personell ble det gjort en vurdering av om kabelen kunne kuttes, legges om og skjøtes uten å først finne eier og koble den fra. Tilbakemeldingen fra elektroentreprenør var at det var teknisk mulig, forenelig med god HMS og at konsekvensene for kabeleier sannsynligvis ville være små til ingen. Kabelen ble derfor kuttet, lagt utenom fundamentet og skjøtet. Opprinnelig var det planlagt å resette kantstein og gjenoppbygge fortau i uke 25, men da kantsteinen ble fjernet viste det seg at kantsteinen inkludert nødvendig fundamentering bygde så dypt at det ikke var mulig å legge trekkrør for kablene fra ladesegmentene og til styringsenheten under. Resetting av kantstein og gjenoppbygging av fortau ble derfor utsatt i påvente av en god løsning på kabelfremføring.



Figur 8 – Fjerning av fortau og montering av fundament for styringsenhet

Søndag uke 25 ble brukt til å etablere rampe for omkjøring mellom Sandmoen 1 og Sandmoen 2 slik at Kvenildstrøa kunne stenges (Figur 9). Mens arbeidet pågikk, var adgangen til Sandmoen 2 stengt. For å minimere de negative konsekvensene for bussdriften var det derfor nødvendig at arbeidet gikk så fort som mulig, og at det skjedde på et tidspunkt hvor busstrafikken inn- og ut fra Sandmoen 2 var lav. Rampen var i utgangspunktet planlagt bygget etter et prosjekteringsgrunnlag hvor svingradier, hellinger og radier i overgangskurver var hensyntatt, men det ble også gjennomført befaring med representanter fra Vy før ferdigstilling. Innspill fra Vy under befaringen førte til at bredden på rampen ble økt med ca. 50 % ift. det som var planlagt og at det ble gjort noen mindre justeringer i overgangskurvene. Dette var enkle og rimelige grep, men som gjorde omkjøringsrampen lettere og tryggere å bruke for sjåførene og som trolig bidro positivt til at perioden med omkjøring ble gjennomført uten noen skader på bussmateriell.



Figur 9 – Etablering av rampe til omkjøringsvei

Med omkjøringsvei mellom Sandmoen 2 og Sandmoen 1 etablert ble Kvenildstrøa stengt sør for innkjøringen til Sandmoen 1. Stengingen ble gjort med en automatisk veibom utstyrt med refleks og varsellys. Dette gav god sikring mot feilkjøring samtidig som det var en brukervennlig løsning for kjøretøy som skulle inn på anleggsområdet. Det ble også etablert en ny gangvei mellom Sandmoen 1 og Sandmoen 2 for å hindre at sjåfører på vei til eller fra busser på Sandmoen 2 skulle gå inn på anleggsområdet.

Planen for mandag uke 26 var å fjerne asfalten fra nordgående felt av Kvenildstrøa og legge til rette for asfaltering av underlag til ladesegmentene natt til tirsdag. Til tross for at Kvenildstrøa er av nyere dato var det ikke mulig å fremskaffe et godt underlag av veiens oppbygning. Som en del av arbeidet med prosjekteringen ble det derfor gjennomført boringer for å verifisere tykkelse på asfaltlag og fragmentstørrelse i underbygningen. Basert på disse ble det anslått behov for å fjerne eksisterende asfaltlag og de øverste 4 – 5 centimeterne av underbygningen – til sammen i underkant av 50 m^3 masser. Når fjerningen av asfalt startet ble det raskt klart at massene i underbygningen var mye grovere enn antatt (Figur 10).



Figur 10 – Fjerning av asfalt

Steinblokker helt opp mot 2 m^3 tangerte undersiden av asfaltlaget (Figur 11). Dette var helt på grensen til hva som var mulig å få løs og bort med en 15 tonns gravemaskin. Utplasseringen av ladesegmentene var avhengig av et plant underlag og det var også behov for gjennomgående kabelgrøfter. Det ble derfor nødvendig å skifte ut masser ned til ca. 1,5 meter dybde. Dette gjorde at behovet for fjerning og

erstatning av masser ble rundt 10 ganger så stort som planlagt. For å unngå at det uforutsette merarbeidet gav forsinkelser satte entreprenør inn flere tippbiler for transport av masser, men plassbegrensninger gjorde at det ikke var mulig å jobbe med flere enn én gravemaskin så det ble en lang dag med mye bruk av overtid. Masseutskiftning og planering ble fullført en time før asfaltering var bestilt, men resultatet ble at kvaliteten på underbygningen i nordgående felt av Kvenildstrøa er av vesentlig høyere kvalitet enn hva den var i utgangspunktet.



Figur 11 – Utskiftning av masser

Asfalt som underlag for ladesegmentene ble lagt natt til tirsdag og planert slik at overflaten lå på minus 10 cm i forhold til eksisterende asfalt. Tykkelsen på det underliggende asfaltlaget er ca. 10 cm. Asfaltlegging på natt gjorde at asfalten rakk å kjøles ned til start av neste arbeidsdag.

Tirsdag morgen markerte landmåler plassering av kabelgrøfter på asfaltlaget (Figur 12). Kabelgrøftene – en sentral samlegrøft og en tverrgrøft per to ladesegmenter – ble saget ut med en asfaltsag på hjul. Kabelgrøftene ble renset ned til 15 cm manuelt med spade.



Figur 12 – Asfaltering av underlag for ladesegmenter og markering av posisjoner for kabelgrøfter

Godt hefte mellom asfaltlagene i veibanen og ladesegmentene er nødvendig for å motvirke sprekkdannelser eller andre skader på asfalten forårsaket av ting som brå akselerasjon eller nedbremsing av tunge kjøretøy, forskjeller i sammentrekning og ekspansjon forårsaket av temperaturendringer mm. For å sikre godt hefte mellom det underliggende asfaltlaget og ladesegmentene ble asfaltunderlaget

dekket med et lag flytende bitumen før ladesegmentene ble lagt ut (Figur 13). Før bitumenlaget ble sprøytet ut ble asfaltoverflaten ryddet og kostet for grus og stein som kunne gi luftlommer eller punktbelastninger på ladesegmentene.



Figur 13 – Sprøyting av bitumen som underlag for ladesegmenter

For å oppnå maksimal ladeeffekt er det viktig at avstanden mellom ladesegmentene er den samme som mellom mottakerplatene på buss-siden. Siden Installasjonen var av begrenset omfang, ble utplasseringen gjort på en enkel måte ved å først sikre nøyaktig plassering av elementet i sør-enden av Kvenildstrøa og så plassere ut de øvrige elementene med avstand gitt av to flyttbare avstandsmaler (Figur 14). Plasseringene ble jevnlig kontrollert mot plasseringene markert av landmåler slik at ikke små forskyvninger eller følgefeil skulle vokse seg store. Dette ble også sikret ved at kabelføringen fra segmentene var avhengig av at de ble plassert rett ift. tverrgrøftene. Utplasseringen av elementene var manuell og relativt tidkrevende, og med en veibane med slake kurver både i lengde- og høyderetning var det ikke mulig å oppnå absolutt nøyaktighet. For en utbygging med begrenset omfang er det prosjektets vurdering at er en ressurseffektiv måte å gjøre dette på, men for større utbygginger ville man risikert at metoden blir en bremsekloss og risiko for konsistens. Automatisert utplassering av ladesegmenter – inklusive å legge ut ladesegmenter med fast avstand fra rull – har i ettertid blitt testet ut i andre europeiske prosjekter, men krever noe spesialutstyr og i sistnevnte eksempel også en veistrekning uten kurver i lengderetning.

Til tross for bruken av malene og gjentatte kontrollmålinger endte det nordligste ladesegmentet opp ca. 30 cm for langt nord. Dette ble ikke vurdert å ha noen funksjonell betydning for ladingen fra veien, men ga behov for et lite ekstra utsnitt av asfalten for å hindre at segmentet ble liggende over en asfaltkant. Årsaken til forskyvningen ble ikke funnet, men det skyldes trolig en kombinasjon av unøyaktighet i markeringen fra landmåler (tykkelse på spraymalte linjer), unøyaktigheter i utsagingen av tverrgrøftene og unøyaktigheter i utplasseringen av ladesegmentene. Risikoen for denne typen forskyvinger kan reduseres ved å etablere og kvalitetssikre flere referansepunkter langs strekningen som bygges.



Figur 14 – Utplassering av ladesegmenter med bruk av avstandsmaler

Hvert ladesegment ble tilkoblet med to kabler per segment fordi infrastrukturen skulle kunne støtte både dynamisk og statisk trådløs lading. Statisk lading gir normalt høyere og mer vedvarende belastning enn dynamisk lading, og kan derfor kreve kraftigere kabeldimensjonering for å håndtere varmeutvikling. Siden kombinasjonen av dynamisk og statisk lading fra samme infrastruktur var et særtrekk ved prosjektet, valgte teknologileverandøren å legge en ekstra kabel per segment i stedet for å gå opp til en grovere kabeldimensjon.

Alle kabler kom ferdig oppmålt for et gitt segment og ferdig terminert. Kablene fra to og to segmenter delte felles tverrgrøft, og alle kablene på hver side av styringsenheten ble samlet i en felles grøft under fortauet. Med 52 segmenter og 104 kabler ble det mye kabel å holde orden i og rulle ut (Figur 15). Spesielt det å unngå tvinn og sikre at kablene ble liggende i grøftene når de ble strukket var en til dels tidkrevende oppgave med potensiale for forbedringer.



Figur 15 – Kabelføringer inn i fundamentet til styringsenheten

Når ladesegmentene var plassert ut og koblet til ble funksjonen til hvert segment testet (Figur 16) før kablene ble støpt ned. Hensikten med testingen var å luke ut eventuelle defekte segmenter på et tidlig nok tidspunkt til at utskifting kunne gjøres raskt og enkelt. Styringsenheten som skulle inngå i den permanente infrastrukturen i prosjektet var forsinket og testingen måtte derfor gjøres med en midlertidig styringsenhet. Med denne var kun mulig å koble til og teste ett og ett ladesegment av gangen. Dette gjorde at testingen av segmenter ble mer tidkrevende enn den ellers ville vært, men problemstillingen

var kjent og tatt høyde for i framdriftsplanen så det gav ingen større praktiske problemer. Av 52 utplasserte segmenter ble ett underkjent etter testing og byttet ut.



Figur 16 – Testing av funksjonen til ladesegmentene etter utplassering

Så fort alle segmentene i det første av de tre delstrekkene i veien var testet og godkjent var det mulig å starte igjenfylling av kabelgrøfter. En diskusjon som løp gjennom hele prosjekteringsfasen og fram til byggingen var hvilket fyllmateriale som skulle brukes i kabelgrøftene fra vei til fortau. Fra teknologileverandøren sin side var det et ønske om å bruke Densolastic – en PU-basert to-komponent resin – til å fylle grøftene. Densolastic har svært gode egenskaper mht. homogenitet, trykkfordeling, motstand mot mekanisk slitasje og herdetid, men har veldig høy pris sammenlignet med betong. For pilotprosjektet – med begrensede volum – var betydningen av dette begrenset, men for større prosjekter vil prisforskjellen mellom Densolastic og betong kunne utgjøre store beløp.

Det var nødvendig at grøftene var størknet og mest mulig herdet før asfaltering. For å minimere dødtid og overtidsbruk og redusere risikoen for utsettelse av asfaltering måtte igjenfyllingen være ferdig i løpet av onsdag ettermiddag/kveld.

Prosjektet endte opp med å fylle én grøft med Densolastic (Figur 17) og de øvrige 25 med betong. For å sikre god fylling og rask herding ble betongen spesifisert til å ha fint tilslag (maks 4 mm.) og rask herdetid. Den første betongleveransen hadde for grove fragmenter. Det ville gitt utfordringer med å fylle kabelgrøftene ordentlig og unngå at kablene ville flyte opp. I begge tilfeller kunne det gitt luftlommer i betongen med risiko for økt bevegelse i asfalten, oppsprekking og mekanisk stress på kablene. Den første betongleveransen måtte derfor returneres. På andre forsøk ble betongen riktig.

En annen utfordring i igjenfyllingen av grøftene var at betongbilen manglet renne eller slange slik at betong kunne legges direkte i grøftene. Dette ble løst ved å fylle betong over i grabben på en gravemaskin og bruke gravemaskinen til å fordele betong i grøftene, men det var en lite effektiv løsning som i tillegg gav mye betongsøl (Figur 18). For å unngå dårlig hefte mellom ladesegmentene og overliggende asfaltlag og redusere risikoen for punktbelastninger måtte alt betongsøl (Figur 19) på ladesegmentene fjernes manuelt.



Figur 17 – Kabelgrøft fylt med Densolastic



Figur 18 – Gjenfylling av kabelgrøfter med betong fra grabb på gravemaskin



Figur 19 – Ladesegmenter med kabelgrøfter fylt med betong

Etter at alle grøfter var fylt igjen og betongen hadde fått noe tid til å tørke ble segmentene dekket av en glassfiberarmert bitumenmatte (Figur 20). Hensikten med dette var å sikre godt hefte mellom segmentene og det overliggende asfaltlaget. Før segmentene ble dekket ble de igjen kostet fri for sand og grus. Bitumenmattene kom i ruller som måtte rulles ut og tilpasses kurvaturen til veien. Videre måtte det lages utsnitt for å få bitumenmatten til å hefte til den underliggende asfalten i åpningene i ladesegmentene. Dette var et manuelt og tidkrevende arbeid med varierende presisjon, men det er lite som tyder på at presisjonen i utsnittene hadde betydning for sluttresultatet. Etter hvert kom vi inn i gode rutiner som gjorde at utrulling og kutting av utsnitt i bitumenmattene gikk vesentlig raskere enn i starten.



Figur 20 – Ladesegmenter tildekket av glassfiberarmert bitumenmatte

En av de største praktiske utfordringene i byggeprosessen var hvordan vi skulle få kablene fra ladesegmentene forbi kantsteinen mellom veibane og fortau. Eksisterende kantstein med støp gikk så dypt at det ikke var mulig å få lagt kablene under. Samtidig var det nødvendig å ha kantsteinen som ytre avgrensing av veibanen under asfaltering. Tre alternative løsninger ble vurdert:

1) Å bore hull til kablene gjennom eksisterende kantstein. Dette ble vurdert å være vanskelig og tidkrevende, bl.a. fordi terminalene på kablene ville kreve relativt grove hull. Alternativet ble derfor forkastet.
2) Å ta opp, kutte og resette eksisterende kantstein. For å få fortauet i riktig høyde etter at kantsteinen var resatt ville det være nødvendig å kutte kantsteinen 2 – 3 cm i høyden. Dette ble vurdert å være teknisk mulig, men for tidkrevende til å være forenelig med tidsplanen for asfaltering. Alternativet ble derfor forkastet.
3) Å erstatte eksisterende kantstein med ny kantstein. Kantstein av rett kvalitet og med riktige dimensjoner var tilgjengelig lokalt med kort leveringstid. Ved å la eksisterende kantstein inngå som delbetaling ble kostnadene for ny kantstein rundt 300 kr/m. Dette eliminerte usikkerhet om tidsbruk for boring eller saging, og det ble også antatt at totalkostnaden inkl. timekostnader ville bli lavere enn for alternativene.

Ny kantstein ble satt med armert bakstøp. Resettingen startet så fort de første kablene fra ladesegmentene var lagt ut og pågikk parallelt med fylling av grøfter, tørketid for betong og legging av bitumenmatte. Med tre steinleggere støttet av en gravemaskin med gripeklo (Figur 21) gikk det opp slik at kantsteinen var på plass tidsnok til planlagt asfaltering.



Figur 21 – Resetting av kantstein

Før asfaltering av bærelag ble veibanen og ladesegmentene igjen sprøytet med et lag flytende bitumen for å sikre godt hefte mellom lagene. Etter at veibanen var sprøytet med flytende bitumen var det klart for asfaltering av bindelag. Bindelaget skulle etter tegningene være 6 cm tykt og dekke kjørefeltet i full bredde. Ladesegmentene ville da være dekket av ca. 3,5 cm asfalt. Den første asfaltleggeren som ankom, hadde en sporvidde som bare så vidt gikk klar av ladesegmentene (Figur 22). I teorien kunne det vært mulig å benytte den, men i praksis ville det medført for høy risiko for skader på ladesegmentene. Asfaltleggeren ble derfor returnert for å erstattes av en asfaltlegger med større sporvidde. Årsaken til at den første asfaltleggeren hadde for smal sporvidde antas å være at den ble bestilt på bakgrunn av bredden til kjørefeltet uten at krav til minste sporvidde ble presisert. Å få tak i en ny og større asfaltlegger gikk heldigvis raskt, så feilen gav ikke forsinkelser av betydning. Torsdag etter lunsj startet asfaltering av bindelag (Figur 23), og et par timer seinere var alle ladesegmentene dekket av asfalt.



Figur 22 – Asfaltlegger med for smal sporvidde



Figur 23 – Asfaltering av 6 cm bindelag

Asfaltering av bindelag (6 cm) og slitelag (4 cm) ble fullført ila. ettermiddagen torsdag og natt til fredag. Planen for fredag var opprinnelig å asfaltere fortauet slik at byggeplassen kunne ryddes og Kvenildstrøa gjenåpnes i løpet av påfølgende lørdag. Utfordringene med kantsteinene gjorde imidlertid at det gjensto mer arbeid enn planlagt før gjenåpning av Kvenildstrøa var mulig. Omkjøringsveien som ble etablert mellom de to depotområdene fungerte så godt at det ikke gav utfordringer for bussdriften hvis gjenåpning måtte utsettes. For å unngå mye helgearbeid og overtidsbruk ble derfor det resterende arbeidet utsatt til uke 27. Det oppsto ingen uforutsette utfordringer i arbeidet med gjenoppbygning av fortau, asfaltering eller rydding. Helgen uke 27, én uke senere enn opprinnelig planlagt, ble omkjøringsrampen fjernet og Kvenildstrøa gjenåpnet.

En detalj som falt mellom to stoler i byggeprosjektet var veimarkering. Kvenildstrøa var i utgangspunktet uten veimarkering, men i prosjektet var det sterkt ønskelig med minimum en midtlinje som hjelp til sjåførene for å plassere bussene riktig i veibanen. Dette behovet ble ikke fanget opp før mot slutten av september. En spørsmålsrunde til lokale firmaer som jobber med veimarkering ble konkludert med at det på grunn av lav temperatur og ustabilt vær ville bli krevende å få på plass veimarkering før vinteren. Det ble derfor avtalt at veiavdelingen i Trfk skulle spraymale en midlertidig midtlinje, og at en ordentlig midtlinje skulle males neste vår. En uke senere var gul midtlinje malt (Figur 24). Det er fortsatt ukjent for prosjektet hvem som malte midtlinjen.



Figur 24 – Ferdig vei med gul midtlinje

4.2. Infrastruktur for statisk trådløs lading

I utgangspunktet var testing av statisk trådløs lading – det vil si lading av stillestående buss – planlagt gjort på den samme infrastrukturen som den dynamiske trådløse ladingen. Statisk trådløs lading er i prinsippet det samme som dynamisk trådløs lading med fart = 0. I praktisk bruk vil det imidlertid være en viktig forskjell i at man ved statisk lading normalt vil ønske å ha de samme ladesegmentene aktive over lengre tid. Dette gjør at håndteringen av varme blir mer krevende. For å kunne lade statisk trådløst med høy effekt over lenger tid vil det derfor normalt være nødvendig med aktiv kjøling av ladesegmenter og kabler.

Statisk trådløs lading er enklere teknisk og teknologien er mer moden enn dynamisk trådløs lading. På buss-siden er installasjonen lik. Bussene som ble brukt i pilotprosjektet hadde også mulighet for lading fra plugg, og dette ble brukt som den primære lademåten. Funksjonen til den statiske installasjonen var derfor i all hovedsak demonstrasjon, og i liten grad test eller verifikasjon. Det ble derfor vurdert å være tilstrekkelig med statiske ladesykluser på opptil tre minutter og at det derfor ikke var behov for å installere aktiv kjøling. Med en øvre grense for lengden på sammenhengende statiske ladesykluser på tre minutter var det ikke behov for noen egen installasjon av infrastruktur for statisk trådløs lading siden den dynamiske installasjonen også dekket behovene for demonstrasjon av statisk lading.

Seint i prosjektet åpnet det seg en mulighet for å gjøre en liten installasjon av én dedikert statisk ladeplass med en ny generasjon ladesegmenter som hadde blitt til overs etter utbyggingen av et prosjekt i Tyskland. Ladeeffekten til de nye segmentene var den samme som for segmentene som ble benyttet i Kvenildstrøa, men den maksimale høyden var redusert fra ca. 115 mm til ca. 28 mm og antall kabler per segment var redusert fra to til én. Virkningen av den reduserte tykkelsen er at det med normal tykkelse på asfaltlaget vil være mulig å gjøre installasjoner uten å måtte ned i underbygningen til veien. Som utbyggingen i Kvenildstrøa viste, gir det å være avhengig av tilstanden og evt. kabler og annet som måtte befinne seg i underbygningen til veien betydelig usikkerhet om tiltaksbehov og framdrift. Å unngå denne usikkerheten vil ha stor verdi ved utbygginger i miljøer med mye infrastruktur under bakkeplan, som i bymiljøer, eller steder hvor det er vanskelig og dyrt å stenge av over lengre perioder under utbygging.

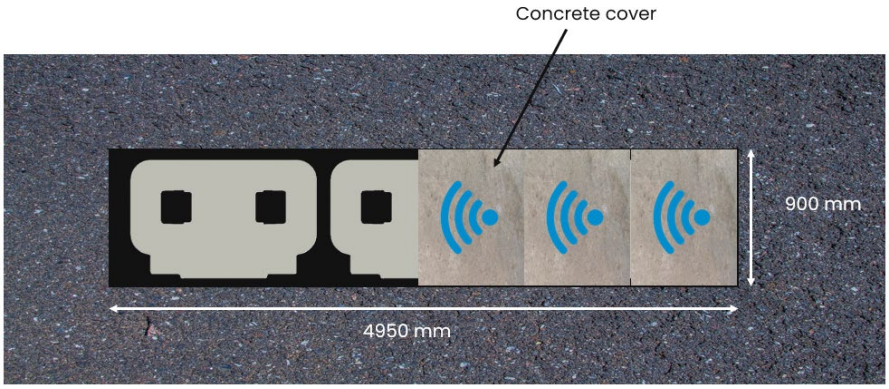
Den statiske ladeplassen ble bygget ut med tre segmenter som ble koblet til samme strømforsyning og styringsenhet som den dynamiske ladeinfrastrukturen. Målet med den statiske installasjonen var to-delt:

1. Å teste hvor fort det var mulig å gjøre installasjonen.
2. Å teste om det var mulig å gjøre utbyggingen uten tungt utstyr.

For punkt 1. ble det satt et mål om å gjennomføre installasjonen på maksimum to dager. For punkt 2. var målet å gjennomføre installasjonen uten tyngre utstyr enn en minigraver og håndholdt asfaltsag og platekompaktor. I sum vil dette gjøre at utbygging vil kunne gjøres raskt og effektivt og med lave byggekostnader. Dette vil være viktig hvis man ønsker å etablere desentralisert statisk trådløs lading på

busstopp, i bymiljøer eller andre steder hvor det er dyrt eller krevende å stenge av områder for lengre perioder under bygging.

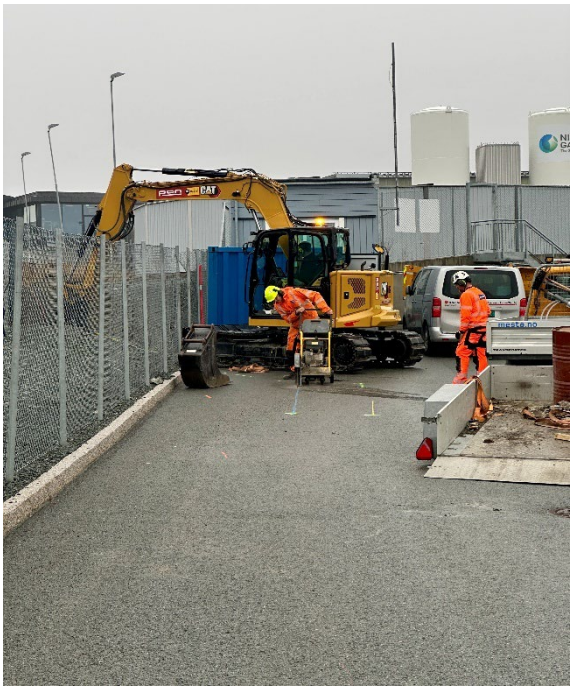
Istedenfor å dekke ladesegmentene med asfalt var planen å legge dem under lokk. Dette gjør det mulig å vise fram installasjonen til besøkende, og vil også gi lettere tilgang til å skifte ut eller fjerne ladesegmenter ved behov. Siden ladesegmentene ikke kan dekkes av magnetiske materialer ble det i første omgang sett på muligheter med kum med kompositttlokk. Leveringstidene for kompositttlokk med riktige dimensjoner og bæreevne (D400) var lange og usikre. For å ha bedre kontroll på framdriften ble det derfor valgt å heller gå for tildekking med betonglokk (Figur 25). Siden disse ikke kunne inneholde armering av magnetisk materiale måtte de støpes for denne installasjonen med glassfiberstenger som armering og løftepunkter. Med samme dimensjoner er betong vesentlig tyngre enn kompositt. For å likevel ha mulighet til å løfte av lokkene og vise frem ladesegmentene uten bruk av maskiner ble hvert ladesegment dekket av to betonglokk. Dette gav betonglokk som var tunge nok til å være stabile og gi god sikring mot uautorisert tilgang samtidig som de var lette nok til å kunne flyttes av to personer med løftestropper.



Figur 25 – Infrastruktur for statisk trådløs lading (Ill. Electreon)

Dag 1 av utbyggingen startet med oppmåling og markering av kabeltrasé og plassering av ladesegmenter. Planen for installasjonen var å legge ladesegmentene i en felles utskjæring i asfalten, pakke rundt med settesand og dekke til med betonglokk. Til ladesegmentene ble det skjært ut en åpning på 4950 x 900 mm gjennom asfalten. Siden målene til betonglokkene allerede var gitt, var det viktig at markeringen og kuttingen av asfalt var presis. Kuttingen av asfalt ble gjort med en hånddrevet betong/asfaltsag med vannkjøling (Figur 26). Med en erfaren bruker gav det tilstrekkelig presisjon for formålet. Ved framtidige utbygginger, spesielt hvis det blir aktuelt å etablere flere statiske trådløse ladeplasser vil det være interessant å se på muligheter for å lage en mal for markering og skjæring for å øke presisjon og redusere tidsbruk til markering.

Etter at sporene i asfalten var kuttet og kontrollmålt ble asfalten fjernet. Fjerningen av asfalt ble mer krevende enn forventet. Dette skyldtes at asfaltlaget var tykkere enn antatt – opp mot 15 cm på det tykkeste – og at det ikke var alle steder hvor asfalten var kuttet helt gjennom. Med litt ekstra tid og innsats gikk det fint å få opp og bort asfalten, men det hadde gått vesentlig raskere og enklere med et noe dypere sagblad og ripperkrok i tillegg til grabb på gravemaskinen. Trekkrør for kabler ble lagt i egen grøft fram til styringsenheten.



Figur 26 – Kutting av asfalt med asfaltsag

Dag 2 ble det først laget en plan såle av sand som underlag for ladesegmentene. Sålen ble pakket med overflate 10 cm under asfaltoverflaten. Ladesegmentene ble plassert ut og koblet til, og det ble fylt i og pakket med sand mellom og rundt ladesegmentene slik at ladesegmenter og sand dannet en flate ca. 7,85 cm under asfaltoverflaten. Betonglokkene ble lagt på plass slik at de hvilte mot sanden og ladesegmentene (Figur 27). Dette gav ifølge teknologileverandør god nok fordeling av trykk til at ladesegmentene ikke ville ta skade av å bli kjørt over av tunge kjøretøy.



Figur 27 – Tildekking med pre-fabrikkerte betonglokk

Det var behov for noen mindre justeringer før alle betonglokkene lå støtt og med overflate i samme plan som asfaltoverflaten, men samlet tok ikke utplasseringen av betonglokkene mer enn rundt en time. Kabelgrøften mellom ladesegmentene og styringsenheten ble fylt igjen med grus og pakket. For mer permanente installasjoner vil det være naturlig å asfaltere kabelgrøften.



Figur 28 – Ferdig installasjon

Med alle segmenter og betonglokk på plass ble funksjonen til ladesegmentene testet. Siden ladesegmentene nå var tilkoblet den permanente styringsenheten kunne de nå testes samlet. Alle ladesegmentene fungerte som forventet, og samlet tok prosessen med funksjonstesting kun noen få minutter.



Figur 29 – Funksjonstesting

Samlet tok utbyggingen av en statisk trådløs ladeplass med grunne ladesegmenter 1,5 dager. Det inkluderte ikke etablering av styringsenhet og nettilknytning siden det allerede var på plass. Med noe mer erfaring og optimalisering av utstyr – viktigst et dypere sagblad til asfaltsagen, ripperkrok til gravemaskinen og en mal for markering av hvor det skulle kuttes vil det være realistisk å få tidsbruken ned i én dag.

Med asfalttykkelse fra ca. 13 cm eller tykkere vil installasjon av grunne ladesegmenter kunne gjøres uten å berøre eller være avhengig av veiens underbygning. På grunn av magnetfeltet fra ladesegmentene vil det likevel være nødvendig å ha kontroll på eventuell annen infrastruktur, som kabler og vann- eller avløpsrør, som ligger under veibanen. Hvis disse ligger i mer enn 50 cm avstand fra ladesegmentene vil

de ikke påvirkes av magnetfeltet, men hvis avstanden er kortere må de skjermes med aluminiumsplater eller -nett.

5. Resultater og analyser

Dette kapitlet presenterer resultater og analyser fra testingen av trådløs lading på Sandmoen. Testene omfatter ladeeffekt og virkningsgrad, funksjon under vinterforhold, sikkerhet og erfaringer fra praktisk drift.

Først presenteres vintertestene, som ga erfaring med lading under varierende vær- og føreforhold. Observasjoner fra disse ble fulgt opp med kontrollerte undersøkelser av hvordan bussens plassering og avstanden mellom mottakerplatene og ladesegmentene påvirker ladingen. Deretter gjennomgås ytelsen ved dynamisk lading i ulike hastigheter, før sikkerhetstester og operasjonelle erfaringer presenteres. Måleoppsettet for de elektriske undersøkelsene er beskrevet i delkapittel 5.2, mens organisering og gjennomføring av testaktivitetene er omtalt i delkapittel 3.2.5.

5.1. Vintertesting

Vintertestingen undersøkte hvordan trådløs lading fungerer under varierende temperatur-, nedbørs- og føreforhold. Testene ble gjennomført fra 1. desember 2024 til 31. januar 2025 med den innleide bussen fra Sverige og omfattet 324 loggførte passeringer fordelt på 27 testdager. Testingen foregikk ved depotet uten passasjerer og bestod hovedsakelig av dynamisk lading, supplert med statiske tester med kontrollert bussplassering. Gjennomføringen og resultatene fra vintertestene er utdypet i en egen delrapport[11]. Analysene bygger på ladedata fra Electreons systemer, sjåførenes registreringer og værdata fra nærliggende værstasjoner.

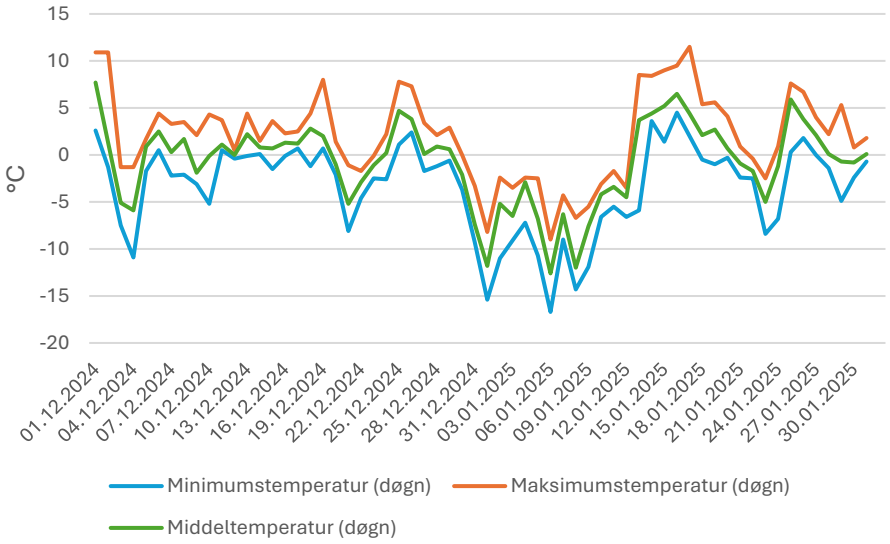
Lufttemperaturen i testperioden varierte fra om lag −17 til +12 °. Perioden omfattet regn, sludd, snø og gjentatte overganger mellom frysing og tining. Kraftige snøfall rundt nyttår førte til en hard såle av sammenpakket snø og is, også i hjulsporene. Dette er forhold som ligger godt utenfor det som normalt aksepteres av kjøreforhold i busstraseer - for eksempel stiller vinterdriftsklasse A (Trøndelag fylkeskommune[12]) og A og B (Statens vegvesen[13]) krav til «bar asfalt». Seks testdager i perioden 30. desember til 5. januar ble derfor analysert separat for å skille betydningen av tykk snø- og issåle fra sammenligningen mellom de øvrige vær- og førekategoriene. Disse dagene inngår derfor ikke i

[11] https://www.atb.no/getfile.php/13118371-1746527476/Rapporter/Rapport%20vintertest%20-%20Elektrisk%20vei%202024_2025.pdf

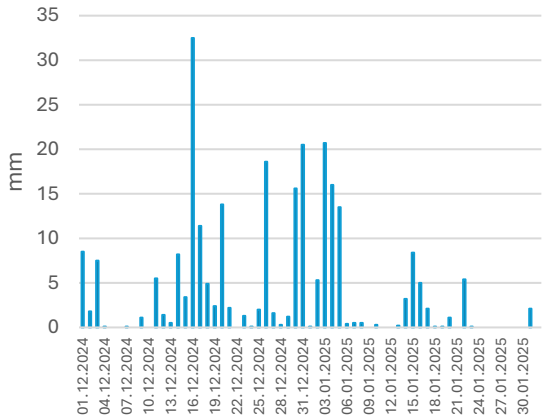
[12] https://www.trondelagfylke.no/vare-tjenester/veg/drift-og-vedlikehold/vinterdrift/#:~:text=Oppgavene%20som%20inng%C3%A5r%20i%20vinterdriften%20er%3A%20Vegnettet%20er,vegen%20kan%20v%C3%A6re%20n%C3%A5r%20det%20ikke%20er%20nedb%C3%B8r.

[13] https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r610.pdf?v=49926d

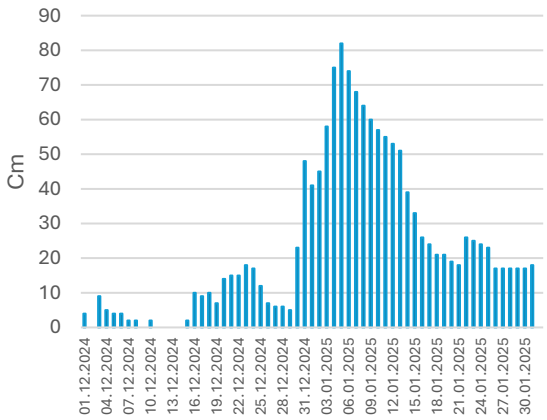
gjennomsnittstallene og de statistiske sammenligningene som presenteres nedenfor, men omtales særskilt etter disse.



Figur 30 – Temperaturer i vintertestperioden (Data: Met.no)



Figur 31 - Nedbør (Data: Met.no)

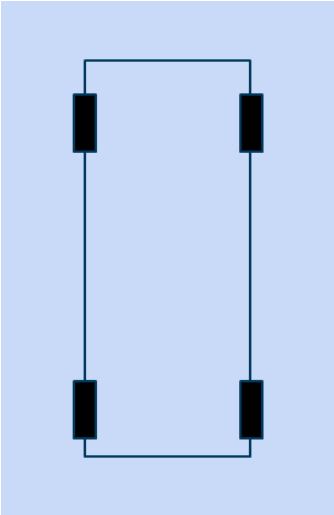


Figur 32 - Snødybde (Data: Met.no)

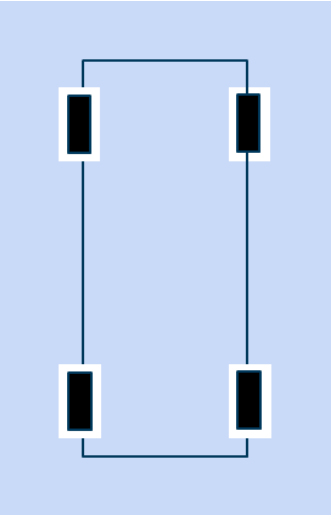
For de øvrige testdagene ble kjøringene sammenlignet etter temperatur, nedbør og om veibanen var bar eller dekket av snø og is. Det ble ikke observert statistisk signifikante forskjeller i gjennomsnittlig ladeeffekt mellom bar vei og snø- eller isdekket vei. Det ble heller ikke påvist statistisk signifikante forskjeller mellom kjøringer ved temperaturer over og under 0 °C eller mellom de undersøkte nedbørskategoriene. Resultatene gir dermed ikke grunnlag for å påvise forskjeller mellom disse kategoriene, men utelukker ikke mindre påvirkninger. Nedbørskategoriene bygget på samlet nedbør gjennom døgnet og skilte ikke mellom regn og snø. Effekttallene er gjennomsnitt for de aktuelle vinterkjøringene og representerer ikke maksimal ladeeffekt. Betydningen av ladeprofil og avbrudd i energioverføringen mellom ladeseksjonene er beskrevet i delkapittel 5.5.

For dagene fra 30. desember til 5. januar ble det observert betydelig redusert dynamisk ladeeffekt. Sammenlignet med vinterdager med bar veibane var gjennomsnittlig dynamisk ladeeffekt redusert med om lag 13 % ved såletykkelser på inntil om lag 3 cm i hjulsporene og med over 40 % ved tykkelser fra om lag 4 cm. Sålen økte avstanden mellom mottakerplatene under bussen og ladesegmentene i veien. Samtidig skjulte den veimarkeringen, mens kjørespor og brøytekanter kunne gjøre det vanskeligere å plassere bussen riktig over ladefeltet. Dataene som ble innsamlet fra kjøringer med dynamisk lading gav ikke grunnlag for å skille mellom effektene av økt overføringsavstand og utfordringer med å plassere bussen riktig i ladefeltet. For å undersøke betydningen av snø og is ved kontrollert bussplassering ble det gjennomført supplerende statiske vintertester.

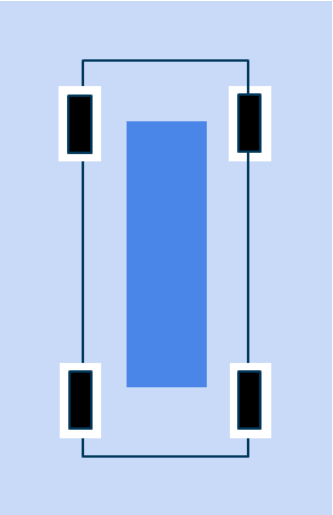
De statiske vintertestene ble gjennomført på infrastrukturen for dynamisk lading. Bussens plassering over ladesegmentene ble kontrollert, slik at betydningen av snø og is kunne undersøkes uten samtidig usikkerhet om plasseringen. Med om lag 3 cm is også i hjulsporene ble ladeeffekten målt til 101 kW og virkningsgraden til 84,3 % (Figur 33). Da hjulsporene ble ryddet ned til bar asfalt, mens isen mellom ladesegmentene og mottakerplatene ble beholdt, økte ladeeffekten til 104,7 kW og virkningsgraden til 87,3 % (Figur 34). Tilførsel av om lag 10 cm snø i overføringsområdet ga ingen registrert endring i ladeeffekt eller virkningsgrad i denne testen (Figur 35).



Figur 33 – Statisk lading med veibanen dekket av 3 cm is. (Ill.: Electreon)



Figur 34 – Statisk lading med hjulene gravd ned til bar asfalt og veibanen dekket av 3 cm is. (Ill.: Electreon)



Figur 35 – Statisk lading med hjulene gravd ned til bar asfalt og veibanen dekket av 3 cm is og 10 cm ekstra snø. (Ill.: Electreon)

Samlet viste vintertestene ingen statistisk signifikante forskjeller mellom de undersøkte vær- og førekategoriene når de seks testdagene med tykk snø- og issåle ble analysert separat. Under disse krevende forholdene ble det imidlertid observert betydelig redusert dynamisk ladeeffekt. De statiske testene indikerte at snø og is i selve overføringsområdet hadde liten betydning under de undersøkte forholdene, mens bedringen etter fjerning av is under hjulene pekte på betydningen av overføringsavstanden. Vintertestene ga ikke grunnlag for å skille virkningen av økt avstand fra virkningen av posisjonsavvik under kjøring. Disse forholdene ble derfor undersøkt videre gjennom kontrollerte tester på bar asfalt, presentert i delkapittel 5.3 og 5.4.

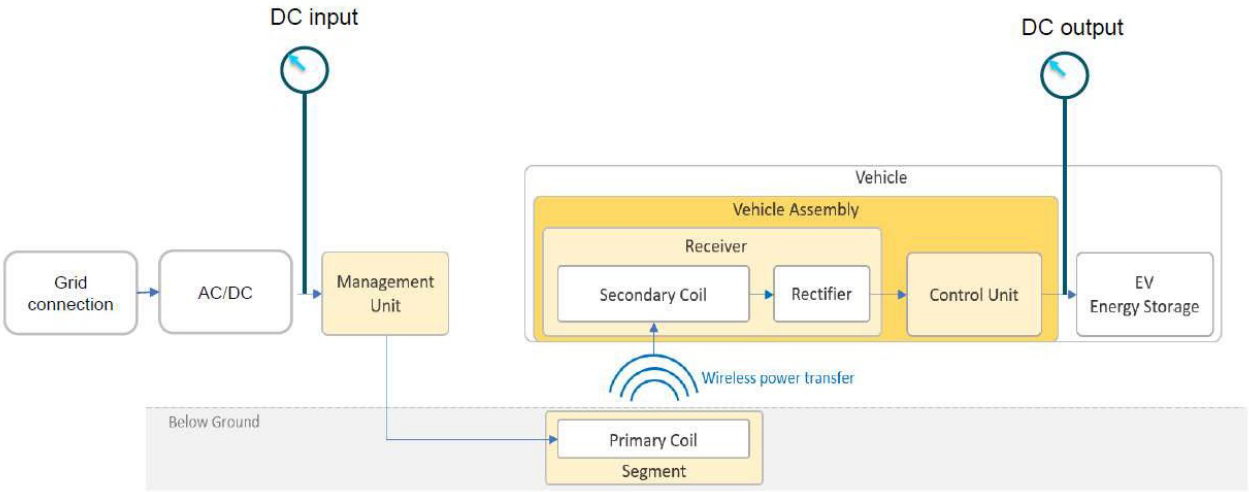
5.2. Måling av ladeeffekt og virkningsgrad

For å få eksterne målinger av ladeeffekt og virkningsgrad ble et dedikert måleoppsett fra SINTEF installert i kraftforsyningen til Electreons «Management Unit» for installasjonen. Dette systemet inkluderte eksterne sensorer for måling av DC-spenning og DC-strøm som leveres til installasjonen, samt en digital prosesseringsenhet for behandling og lagring av måledata. Datalogging kan aktiveres automatisk når det induktive ladesystemet overfører effekt, og lagres med tidsstempling fra en GPS-antenne. Dermed kan måleresultater synkroniseres med andre målinger basert på lagret tidssignal.

På grunn av at endringer i det elektriske systemet om bord på bussene ville medføre krav om re-sertifisering for å kunne gå i ordinær rutedrift, kunne ikke måleoppsettet fra SINTEF installeres på bussene. Batterispenning og ladestrøm om bord på bussen kunne derfor bare logges i Electreons systemer, men data for tidspunkt når testing har blitt gjennomført har blitt gjort tilgjengelig for SINTEF.

En oversikt over måleoppsettet som er brukt for evalueringer av ladeeffekt og virkningsgrad er gitt i Figur 36. Denne figuren gir også en generisk oversikt over strukturen på energiomformingssystem for ladesystemet, der den stasjonære infrastrukturinstallasjonen inkluderer AC/DC omforming fra lokalt nett og Electreons «Management Unit» som styrer de enkelte ladeelementene («Primary Coil») installert i veibanen. Installasjonen om bord på bussene inkluderer mottakerenheten («Secondary Coil») med tilhørende likeretter og eventuelt styreenhet for tilkobling til bussens batteri. I denne oversikten er målingene av spenning og strøm for «DC input» basert på eksternt måleutstyr fra SINTEF, med mulighet

for å logge data med svært høy tidsoppløsning. Målingene av spenning og strøm for «DC output» fra ladesystemet, som ved statisk lading vil samsvare omtrent med effekten inn på bussens batteri, er bare logget i Electreons interne systemer. For evaluering av måleresultater er derfor data logget fra Electreons system manuelt tids-synkronisert med data logget fra SINTEFs målesystem, og data logget av SINTEF er enten benyttet til gjennomsnittsberegninger eller ned-samplet til samme tidsoppløsning som måledata gjort tilgjengelig fra Electreon.



Figur 36 – Måleoppsett for ekstern evaluering av virkningsgrad og ytelse

5.3. Statisk lading og virkningsgrad som funksjon av posisjon

Vintertestene i delkapittel 5.1 viste redusert dynamisk ladeeffekt ved tykk snø- og issåle, men ga ikke grunnlag for å skille betydningen av økt overføringsavstand fra betydningen av posisjonsavvik. Det ble derfor gjennomført kontrollerte statiske tester på bar asfalt med systematisk variasjon i bussens plassering. For å undersøke overført effekt og virkningsgrad som funksjon av bussens posisjon over et sett med ladesegmenter i veibanen ble ett sett med tester gjennomført med systematisk endring av posisjon både forover/bakover og sideveis. Et bilde av bussen under testing er gitt i Figur 37, som også inkluderer lasermåling av posisjon. For disse testene stod bussen direkte på bar asfalt, og sideveis posisjon ble målt manuelt med målebånd, med kantstein som referanse, mens endring av posisjon forover/bakover ble målt med lasermåler.

I utgangspunktet ble virkningsgrad beregnet direkte som forholdet mellom målt mottatt effekt P_{out} om bord på bussen og effekt levert til det induktive ladesystemet, P_{in}:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{batt} \cdot I_{batt}}{V_{dc,in} \cdot I_{dc,in}}$$

Siden målte momentanverdier av strøm og spenning inkluderer målestøy, har gjennomsnittlig virkningsgrad eller energioverføringsvirkningsgrad blitt brukt for systematisk evaluering av posisjonssensitivitet. Virkningsgrad er da beregnet som forholdet mellom energi mottatt om bord på bussen, E_{out}, og energi levert til ladesystemet, E_{in} over et gitt tidsrom:

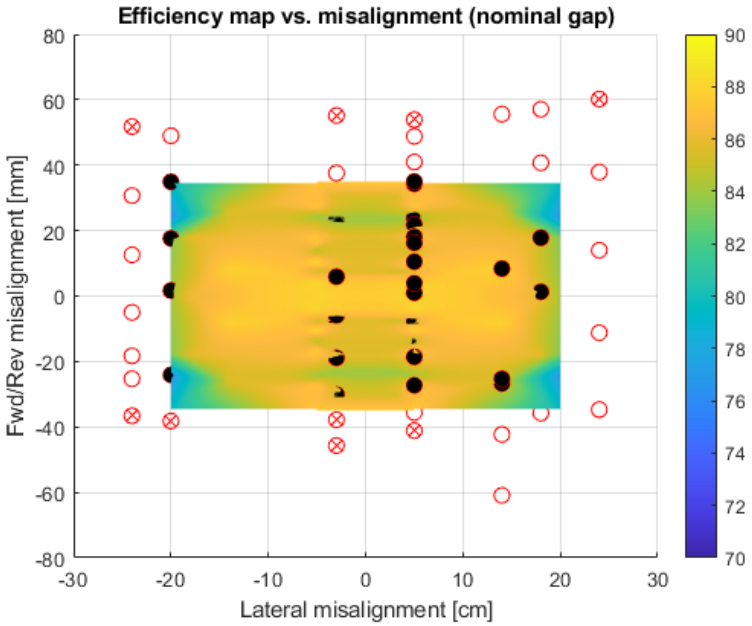
$$\bar{\eta} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{\int_{t_0}^{t_f} V_{batt} \cdot I_{batt} dt}{\int_{t_0}^{t_f} V_{dc,in} \cdot I_{dc,in} dt} \approx \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+NT_{s,batt}} V_{batt}(t) \cdot I_{batt}(t) \cdot T_{s,batt}}{\sum_{t=t_0}^{t_0+NT_{s,in}} V_{dc,in}(t) \cdot I_{dc,in}(t) \cdot T_{s,in}}$$

For statisk lading, starttidspunkt t_0 for evalueringen er valgt etter at ladeeffekten har nådd sin stasjonære verdi, og sluttidspunkt t_f er valgt slik at energiberegningen avsluttes før ladesesjonen stoppes. Dermed er eventuelle virkinger fra den transiente responsen ved oppstart og stopp av lading ekskludert fra beregnet virkningsgrad.



Figur 37 – Buss under statisk ladetesting med lasermåling av posisjon

Individuelle resultater fra målinger når bussen er flyttet over et område på 120 cm i forover/bakover-retning og 50 cm sideveis er presentert i vedlegg 9.6. Ut fra disse målingene er senterpunkt som tilsvarer ideell plassering av bussen over ladeelementene i veibanen identifisert, og posisjonen til de individuelle målingene med relativ plassering i forhold til dette punktet er plottet i Figur 38. I denne figuren så er posisjoner som resulterte i full overført effekt på ca. 100 kW markert med svarte punkt, mens posisjoner som resulterte i redusert effekt (dvs. med bare en eller to av tre ladeelementer i drift) markert med røde sirkler. Posisjoner hvor det ikke var mulig å få statisk energioverføring og hvor alle ladeelementene stoppet er markert som røde sirkler med kryss.



Figur 38 – Virkningsgradskart for statisk lading som funksjon av posisjon: Svarte punkt representerer lading ved full effekt, røde sirkler representerer lading ved redusert effekt og røde sirkler med kryss representerer at lading ikke var mulig

Fra de individuelle resultatene plottet i Figur 38 framgår det at full ladeeffekt kan overføres innenfor et område omkring ideell senterposisjon, med ca. +/- 20 cm sideveis posisjonsavvik og +/- 35 cm

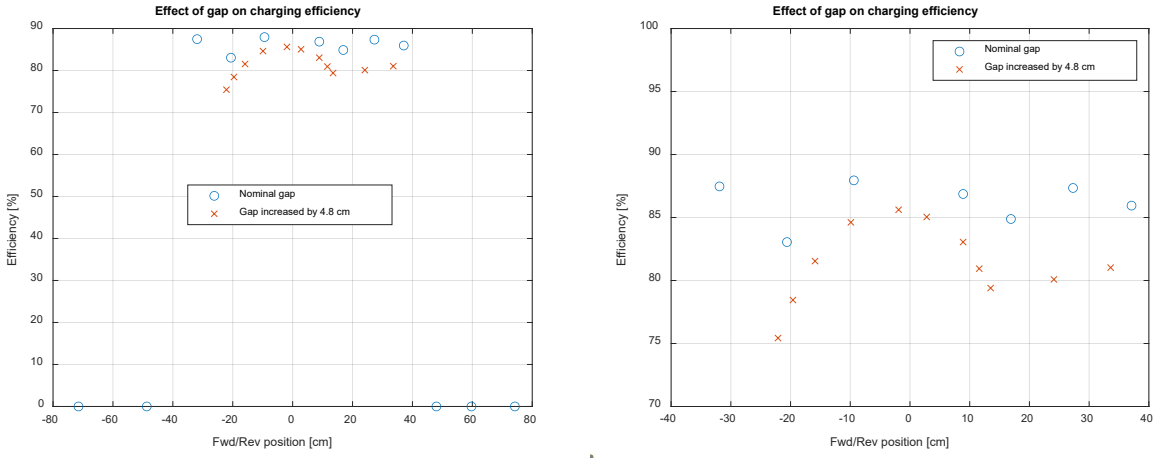
posisjonsavvik i kjøreretningen. Utenfor dette området kan ikke full ladeeffekt overføres stabilt, og systemet slår vanligvis av en eller flere av ladeenhetene på grunn av for lav magnetisk kobling mellom avsender og mottaker-elementene. Det målte datasettet er utvidet ved å anta symmetri omkring det beregnede senterpunktet og deretter brukt til å beregne et virkningsgradskart som gitt ved fargekoding i Figur 38. Dette fargekartet viser at systemet kan overføre full effekt med høy og stabil energivirkningsgrad i området 85-89 % innenfor det meste av området hvor full ladeeffekt kan oppnås, men at virkningsgraden kan falle ned mot 80 % i de ytre hjørnene av ladeområdet.

5.4. Innvirkning fra bakkeklaring på virkningsgrad

For å evaluere innvirkning av bakkeklaring på overført effekt og virkningsgrad ved variasjon i posisjon, ble bussen hevet fra bakkeplan ved bruk av treplater som vist i Figur 39. Ordinære finerplater med tykkelse på 1.2 cm ble brukt, og bussen ble hevet i 4 steg slik at bakkeklaringen ble økt med maksimalt 4.8 cm. Ved ideell plassering over spolene ble det ikke registrert noen betydelig endring i overført effekt eller virkningsgrad når bakkeklaringen ble økt med 1.2 cm eller 2,4 cm. Ved ytterligere økning i bakkeklaringen ble virkningsgraden noe redusert, men først og fremst ved avvik fra senterposisjon, og ingen betydelig endring kunne observeres i overført effekt.



Figur 39 – Buss hevet med finerplater for test av økt bakkeklaring



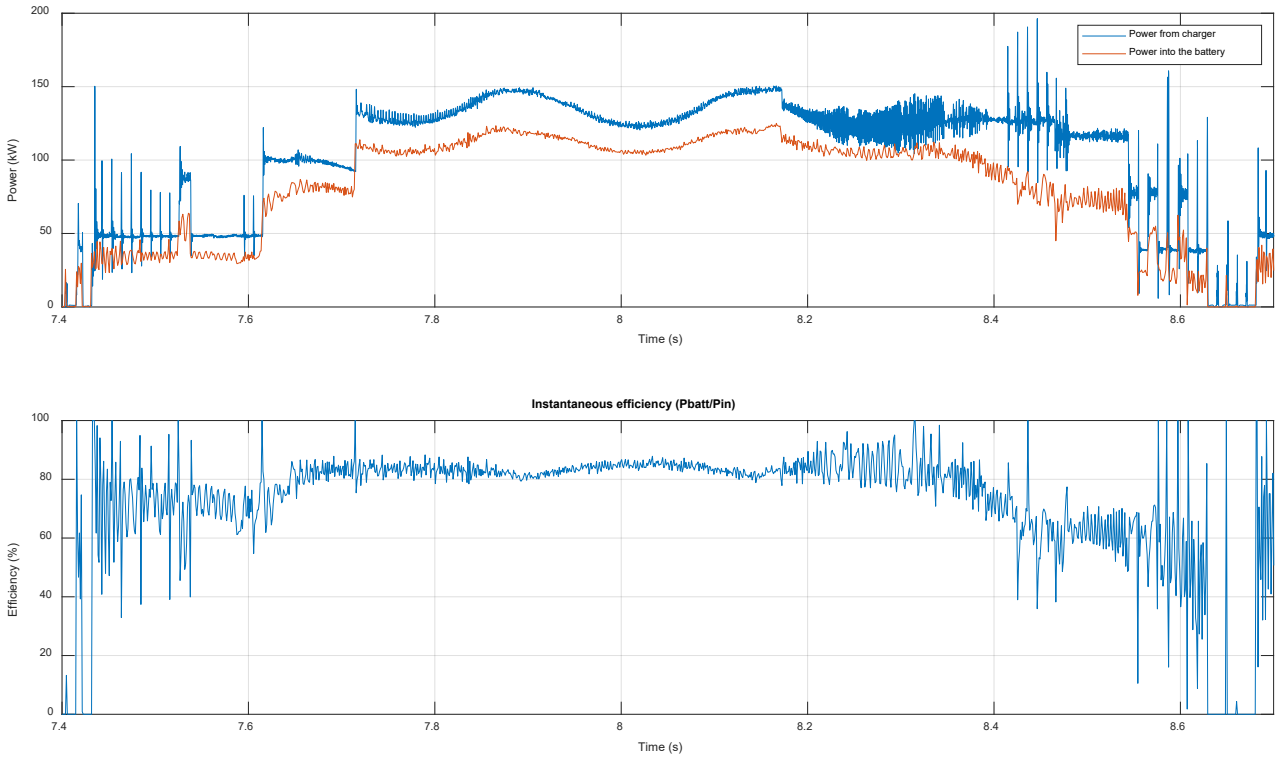
Figur 40 – Innvirkning fra bakkeklaring på virkningsgrad

Virkningsgrad som funksjon av posisjonsendring i kjøreretning ved 4.8 cm økt bakkeklaring er vist i Figur 40 og sammenlignet med virkningsgrad ved normal bakkeklaring. Som vist i figuren, er reduksjonen i virkningsgrad minimal omkring ideell senterposisjon, men den økte bakkeklaringen medfører at virkningsgraden synker mer markert ved posisjonsendring i forover/bakover-retning. I dette tilfellet, faller virkningsgraden med ca. 3-5 % sammenlignet med normal bakkeklaring, og når avviket i forover/bakover-retning blir mer enn ca. 20 cm faller virkningsgraden under ca. 80 %.

5.5. Ytelse og virkningsgrad ved dynamisk lading

For videre evaluering av ytelse og virkningsgrad ved ordinær drift av systemet er det benyttet målinger ved ordinær dynamisk lading hvor en buss kjører langs veistrekningen med ulik hastighet. Som et eksempel på ladeprofil, er målt effekt og momentanvirkningsgrad ved passering av ett segment i en hastighet på 5 km/t vist i Figur 41. I tillegg til en del støy og virkning av testpulser ved oppstart viser denne figuren hvordan overført effekt går opp til maksimalt område i tre trinn, gitt av posisjonen for de tre mottakerenhetene om bord på bussen. Så snart en mottakerenhet kommer inn over en avsenderenhet med tilstrekkelig magnetisk kobling starter effektoverføringen med opp mot 40 kW overført, samt at systemet gir flere deteksjonspulser. Når to mottakerenheter får tilstrekkelig magnetisk kobling til å start effektoverføring, får overført effekt opp til 70-80 kW, og til slutt øker effektoverføringen til over 100 kW. Deretter er alle tre mottakerenhetene aktive, mens overført effekt er høy og stabil, selv om en tydelig sakte variasjon avhengig av posisjon kan observeres. Deretter går effekten ideelt sett ned til 0 i tre trinn på samme måte som når effektoverføringen ble startet. I dette tilfellet er overgangen fra to til én aktiv mottakerenhet ikke entydig, slik at systemet hopper frem og tilbake mellom en og to aktive enheter, før det til slutt stopper effektoverføringen slik at eneste gjenværende aktivitet er en serie mindre deteksjonspulser, før en ny sekvens starter når bussen kommer inn over neste avsendersegment i vegbanen.

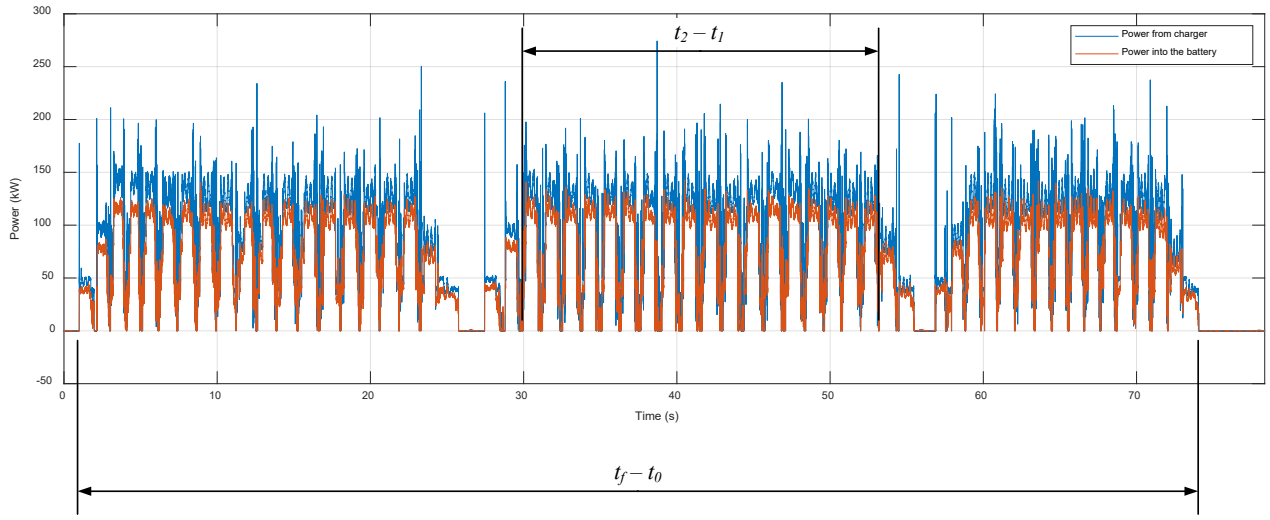
Momentan virkningsgrad er plottet i nedre del av Figur 41, og viser jevnt litt over 80 % virkningsgrad i området der alle tre mottakerenhetene er aktive. Når bare to eller en mottakerenhet er aktiv er virkningsgraden noe lavere i gjennomsnitt, men med betydelig rippel på grunn av deteksjonspulsene. Dette viser tydelig at momentan virkningsgrad kan variere betydelig ved dynamisk lading.



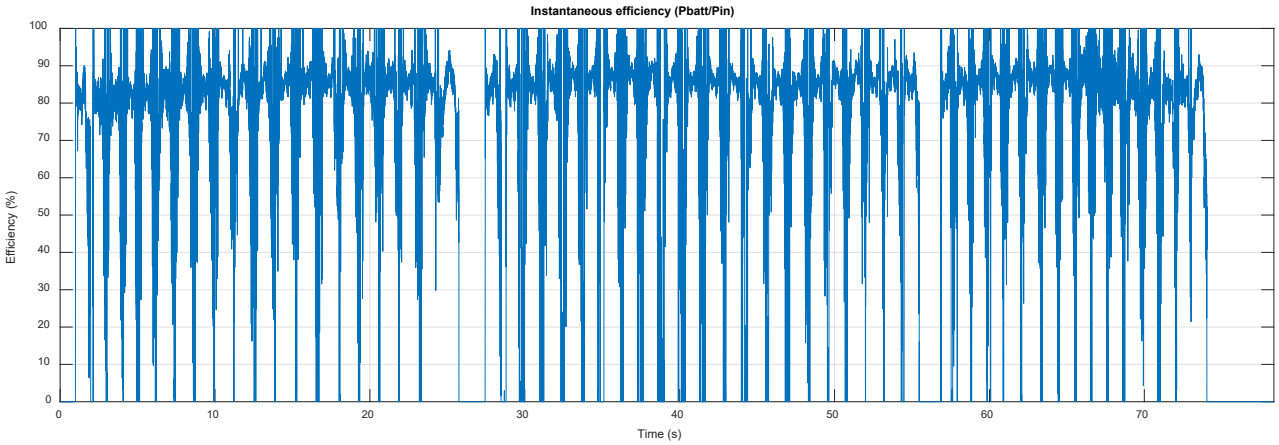
Figur 41 – Målt effekt og momentanvirkningsgrad ved passering av ett ladeelement (5km/h)

Effektmåling ved dynamisk lading over hele demonstrasjonsstrekningen er vist i Figur 42 mens momentanvirkningsgrad beregnet fra disse målingene er vist i Figur 43. Kurvene viser tydelig hvordan installasjonen er oppdelt i tre seksjoner, og at overført effekt går ned til 0 når bussen passerer punktene uten installerte ladesegmenter. Ved visuell inspeksjon er det mulig å se at mottatt effekt om bord i bussen er omtrent 100 kW og at momentan virkningsgrad er over 80 % i de periodene når alle ladeelementene er aktive. Samtidig er det tydelig at målingene inkluderer store variasjoner og betydelig støy, samt at transisjonene når bussen kommer inn over eller forlater et segment med installerte ladeelementer har betydning for hvor mye gjennomsnittlig effekt og dermed hvor mye energi som overføres til bussen. For

vurdering av ladeytelse er det dermed relevant å definere spesifikke størrelser som representerer både gjennomsnittlig overført effekt og mulig overført effekt på en lang strekning uten avbrudd.



Figur 42 – Typisk dynamisk ladeprofil ved lav hastighet (5 km/t)



Figur 43 – Beregnet momentanvirkningsgrad ved typisk dynamisk ladeprofil (5 km/t)

For videre evaluering av teknisk ytelse ved dynamisk induktiv lading, er det relevant å definere følgende størrelser:

1. Totalt levert energi, $E_{dc,in}$ og totalt mottatt energi E_{batt} (for DC-til-DC overføring), evaluert over hele lengden på infrastrukturen:

$$E_{batt} = \int_{t_0}^{t_f} V_{batt} \cdot I_{batt} \cdot dt\,, \qquad E_{dc,in} = \int_{t_0}^{t_f} V_{dc,in} \cdot I_{dc,in} \cdot dt$$

   Tidspunkt t_0 og t_f er da definert fra når bussen kjører inn over første ladesegment i veibanen og til bussen kjører vekk fra det siste ladesegmentet.

2. Gjennomsnittlig overført effekt over hele lengden på infrastrukturen:

$$\overline{P}_{batt} = \frac{E_{batt}}{t_f - t_0}, \qquad \overline{P}_{dc,in} = \frac{E_{dc,in}}{t_f - t_0}$$

3. Total energioverføringsvirkningsgrad:

$$\eta_{tot} = \frac{E_{batt}}{E_{dc,in}}$$

4. Levert energi per lengdeenhet og mottatt energi per lengdeenhet, evaluert over en mulig uendelig lang ladeseksjon:

$$e_{batt} = \frac{1}{p_{cc} \cdot (n_{coils} - 2)} \cdot \int_{t_1}^{t_2} V_{batt} \cdot I_{batt} \cdot dt, \qquad e_{dc,in} = \frac{1}{p_{cc} \cdot (n_{coils} - 2)} \cdot \int_{t_1}^{t_2} V_{dc,in} \cdot I_{dc,in} \cdot dt$$

hvor p_{cc} er avstanden fra kanten på ett ladesegment til kanten på det neste ladesegmentet, og n_{coils} er antall ladesegment i en gitt seksjon. I dette tilfellet er seksjonen I midten benyttet som utgangspunkt.

5. Gjennomsnittlig effekt per lengdeenhet, evaluert over en mulig uendelig lang ladeinfrastruktur:

$$\overline{P}_{batt,0} = \frac{p_{cc} \cdot (n_{coils} - 2) \cdot e_{batt}}{t_2 - t_1}, \qquad \overline{P}_{dc,in,0} = \frac{p_{cc} \cdot (n_{coils} - 2) \cdot e_{dc,in}}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

6. Energioverføringsvirkningsgrad evaluert over en mulig uendelig lang ladeseksjon:

$$\eta_0 = \frac{e_{batt}}{e_{dc,in}}$$

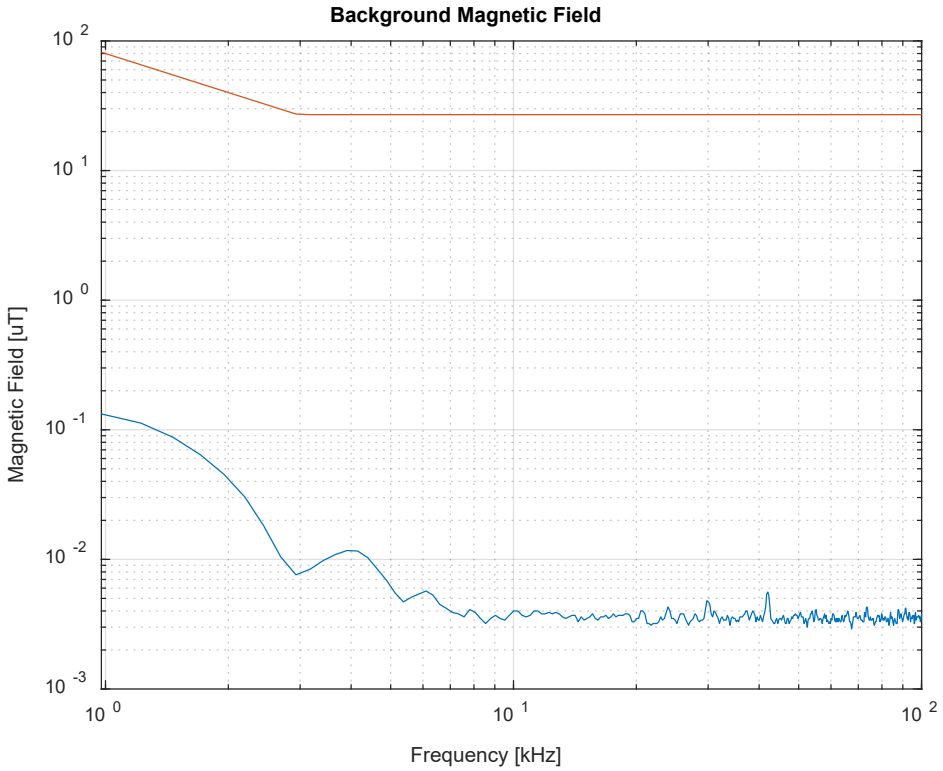
De tre første uttrykkene gir et mål på energi, effekt og virkningsgrad for en praktisk installasjon, og tar hensyn til transientene når bussen kommer inn over eller forlater en ladeseksjon. Tilsvarende definerer de tre siste uttrykkene hva de samme uttrykkene vil gi for en uendelig lang infrastruktur installasjon. Alle disse målene er listet opp i Tabell 9 for flere ulike testkjøringer av en buss ved ulik hastighet. Fra disse resultatene kan det tydelig observeres at hastigheten har svært liten innvirkning på overført gjennomsnittseffekt og energivirkningsgrad. Derimot synker som forventet overført gjennomsnittseffekt og overført energi per lengdeenhet med økende hastighet.

Tabell 9 – Målt ladeytelse ved ulike hastigheter

Speed avg [km/t]	Pin avg. [kW]	Pbatt avg. [kW]	En in [Wh]	En batt [Wh]	Total Efficiency	e_{in} [Wh/m]	e_{batt} [Wh/m]	$p_{in,0}$ [kW]	$p_{batt,0}$ [kW]	Eff_0	
4.34	86.2	70.0	1750	1421	**0.81**	20.1	16.6	**93.4**	**77.4**	**0.83**	
4.43	86.5	69.8	1718	1387	**0.81**	19.3	15.9	**94.6**	**77.8**	**0.82**	
4.54	86.4	69.6	1672	1347	**0.81**	18.9	15.6	**95.1**	**78.3**	**0.82**	
4.28	85.0	68.5	1750	1409	**0.81**	18.8	15.5	**91**	**74.7**	**0.82**	
4.09	84.0	67.1	1808	1456	**0.80**	20.3	16.8	**86.6**	**71.5**	**0.82**	
8.14	89.4	72.1	968	780	**0.81**	10.75	8.86	**99.9**	**82.3**	**0.82**	
8.53	89.2	72.2	919	743	**0.81**	10.45	8.64	**98.5**	**81.4**	**0.83**	
8.35	88.0	71.0	928	749	**0.81**	10.07	8.3	**94.3**	**77.8**	**0.82**	
8.62	89.3	72.1	910	735	**0.81**	9.96	8.22	**99.3**	**81.9**	**0.83**	
8.23	87.5	70.6	935	755	**0.81**	10.03	8.27	**93.7**	**77.3**	**0.83**	
12.34	89.4	72.1	639	514	**0.81**	6.89	5.68	**97.8**	**80.5**	**0.82**	
12.63	90.2	72.9	628	507	**0.81**	7.05	5.8	**101.5**	**83.5**	**0.82**	
12.40	89.7	72.2	636	512	**0.80**	7.26	5.98	**99.2**	**81.8**	**0.82**	
12.34	89.7	72.3	641	516	**0.81**	7.12	5.87	**100.5**	**82.8**	**0.82**	
12.55	88.9	71.4	624	501	**0.80**	6.72	5.55	**98.8**	**81.6**	**0.83**	
20.46	90.1	72.4	387	311	**0.80**	4.25	3.48	**101**	**82.8**	**0.82**	
20.80	90.9	73.1	385	309	**0.80**	4.17	3.44	**100.5**	**82.7**	**0.82**	
20.63	86.3	69.3	368	296	**0.80**	4.43	3.67	**101.3**	**84.1**	**0.83**	
21.40	89.8	72.5	370	298	**0.81**	4.06	3.36	**98.9**	**81.9**	**0.83**	
24.92	89.1	71.6	315	252	**0.80**	3.64	2.99	**100.7**	**82.8**	**0.82**	
25.81	89.7	72.2	306	246	**0.80**	3.41	2.81	**100.5**	**82.7**	**0.82**	
24.66	89.0	71.7	318	256	**0.81**	3.63	2.99	**100.5**	**82.8**	**0.82**	
28.89	89.7	71.9	274	219	**0.80**	3.15	2.59	**101.2**	**83.1**	**0.82**	
28.94	89.2	71.9	272	219	**0.81**	2.9	2.39	**97.8**	**80.6**	**0.82**	
33.13	89.3	71.6	237	190	**0.80**	2.46	2.03	**97.8**	**80.6**	**0.82**	
32.35	89.4	71.4	243	194	**0.80**	2.62	2.14	**99.6**	**81.4**	**0.82**	
32.55	89.6	71.7	242	194	**0.80**	2.62	2.15	**100.1**	**81.9**	**0.82**	
32.50	89.5	71.5	242	193	**0.80**	2.74	2.23	**100**	**81.5**	**0.81**	
	88.55	**70.74**			**0.80**			**98.00**	**80.70**	**0.82**	**Average Values**
	1.869445	2.614438			1.863114			3.65518	3.59355	0.60656	**StdDev/Mean (%)**

5.6. Måling av magnetfelt

For å validere at installasjonen fra Electreon oppfyller krav til sikkerhet med tanke på elektromagnetisk påvirkning har SINTEF gjennomført separate målinger av magnetfelt under lading. Gjeldende regler for magnetfelteksponering er gitt av veiledninger fra International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection» (ICNIRP)[14]. De veiledende grensene er definert for arbeidere med opplæring og for generelt publikum, og det er grenseverdiene for generelt publikum som vil være gjeldende for kollektivtransport. Siden kravene i ICNIRP-veiledningen for magnetfeltpåvirkining er gitt som et frekvensspektrum, er det i praksis bare målinger ved statisk lading som kan evalueres. Målingene er gjennomført med NARDA EHP-50F magnetfeltanalysator i frekvensområdet fra 1 Hz til 100 kHz. Som et referansepunkt ble det først gjennomført måling av bakgrunnsfelt ved bussen, med ladesystemet fullstendig avslått. Denne målingen er gjengitt i Figur 44. Figuren viser grenseverdiene for magnetfelt i henhold til ICNIRP-veiledningen som en rød linje, og frekvensspekteret for målt magnetfeltet som en blå linje. Disse resultatene bekrefter at det ikke er noen betydelige bakgrunnsfelt i området som vil påvirke målingene.



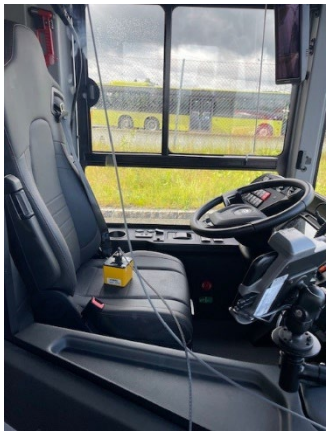
Figur 44 –Magnetisk bakgrunnsfelt med ladesystem fullstendig avslått. Blå kurve gir målte verdier og rød kurve gir grenseverdier i henhold til ICNIRP-veiledningen

Målinger av magnetfelt er deretter gjennomført på tre kritiske punkter:

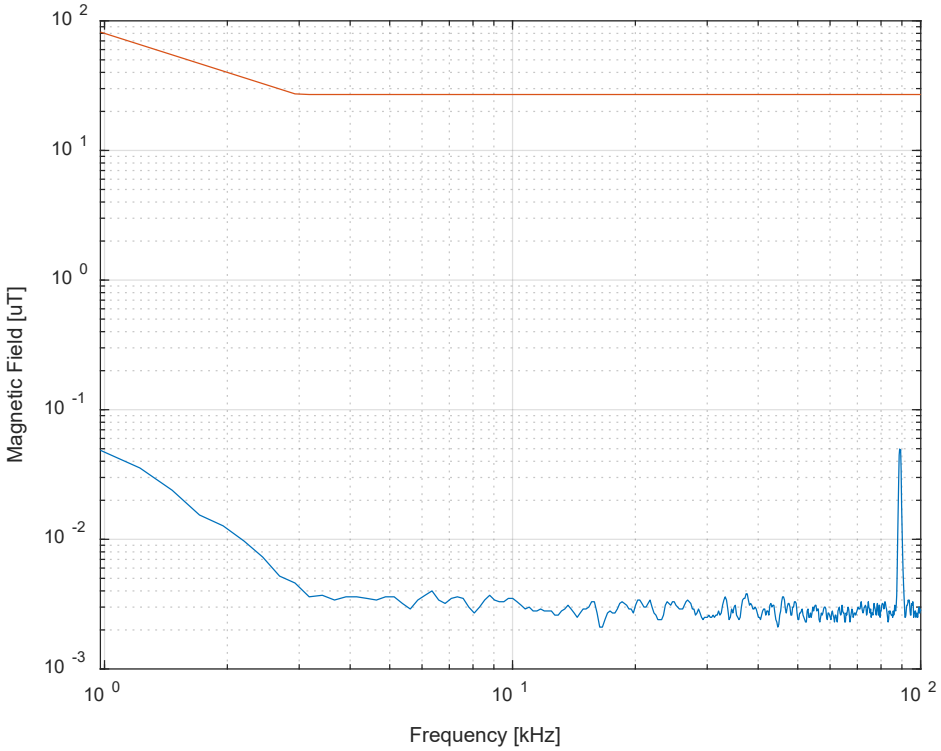
1) I førersetet
2) Ved dør for av- og påstigning
3) På punkt med høyest detektert felt i passasjerområdet inne i bussen

Et bilde av hvordan målingene i førersetet ble gjennomført er vist i Figur 45, og resultatene fra magnetfeltmåling ved lading i en posisjon som gir høyest lekkfelt fra ladesystemet er vist i Figur 46. Den blå kurven i Figur 46 viser en tydelig lokal topp i området omkring 85 kHz som sammenfaller med operasjonsfrekvensen til ladesystemet, men magnetfeltet er godt innenfor grensene satt a ICNIRP-veiledningen.

[14] https://www.icnirp.org/

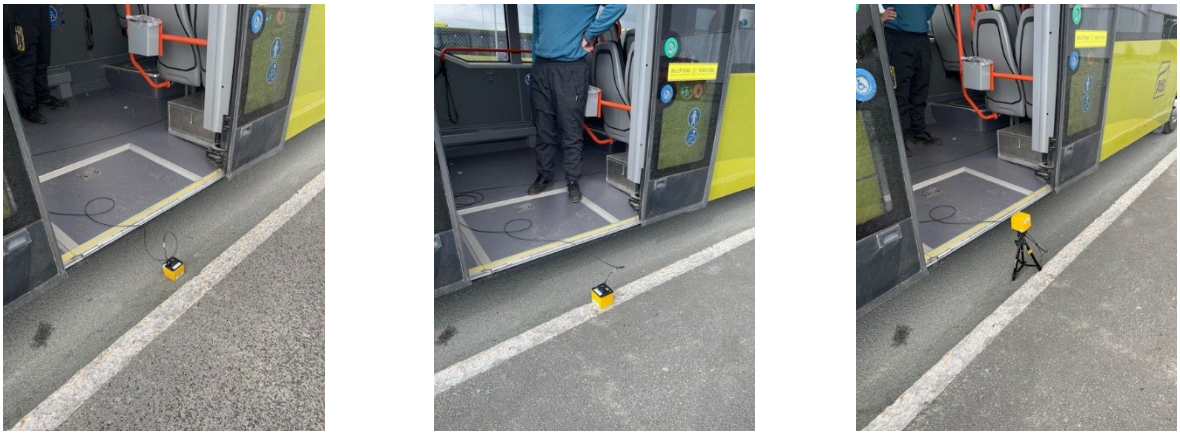


Figur 45 – Måling av magnetfelt i førersetet på bussen



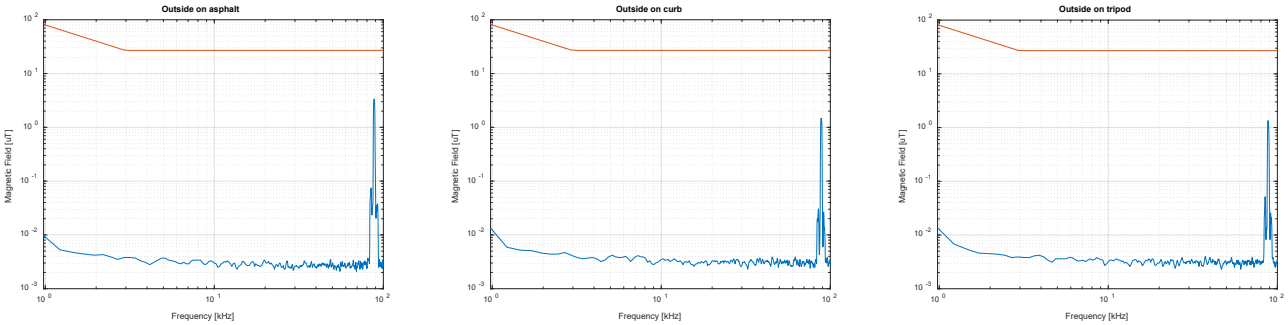
Figur 46 –Magnetfelt i førersete (statisk lading, posisjon med høyest lekkfelt). Blå kurve gir målte verdier og rød kurve gir grenseverdier i henhold til ICNIRP-veiledningen

Samme type måling er gjennomført med tre ulike plasseringer av måleinstrumentet utenfor dør for av- og påstigning. Alle tre målingene er gjennomført midt utenfor døren, direkte på asfalten, på kantstein og på en tripod med måleinstrumentet hevet ca. 20 cm fra punktet med måling direkte på asfalten. Bilder fra de tre målingene er vist i Figur 47 og resultatene er vist i Figur 48 når bussen er i optimal senterposisjon for lading. Alle målingene gir magnetfelt som er godt innenfor grensene fra ICNIRP-veiledningen.



(a) Måling på asfalt (b) Måling på kantstein (c) Måling på tripod

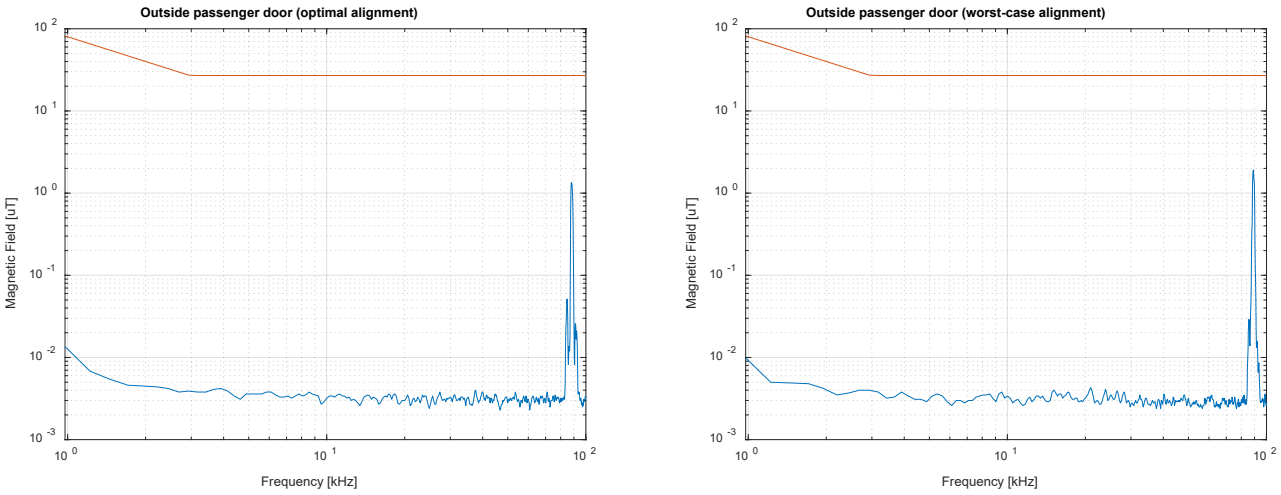
Figur 47 – Måling av magnetfelt utenfor dør for av/påstigning



Figur 48 – Magnetfelt utenfor dør (statisk lading, optimal posisjon). Blå kurve gir målte verdier og rød kurve gir grenseverdier i henhold til ICNIRP-veiledningen

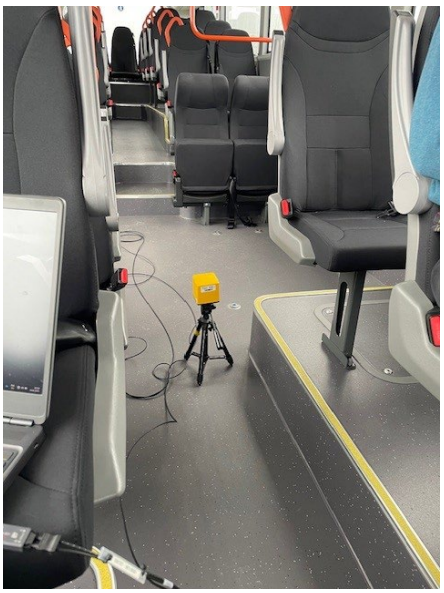
Målingene på tripod utenfor døren er også gjentatt med bussen i en posisjon med maksimal forskyvning fra senterposisjon som samtidig gir full ladeeffekt. Sammenligning av resultater med buss i optimal posisjon for statisk lading og ved maksimal posisjonsforskyvning er gitt i Figur 49. Resultatene viser at magnetfeltet øker betraktelig når posisjonen forskyves fra ideell senterposisjon for lading, men det maksimale magnetfeltet er fortsatt begrenset til under 2μT, som er godt innenfor kravene i ICNIRP-veiledningen.

Målinger ble også gjennomført i passasjerområdet inne i bussen. For dette formålet ble det søkt etter punket med høyest magnetfelt der måleinstrumentet kunne brukes innenfor sine spesifikasjoner. Dette resulterte i en måling i midtgangen slik som vist i Figur 50, og måleresultatene er vist i Figur 51 både ved optimal ladeposisjon og ved maksimal posisjonsforskyvning som fortsatt gir full ladeeffekt. Ved optimal ladeposisjon er maksimalt magnetfelt ca. 1.7 μT, og ved maksimal posisjonsforskyvning så øker dette til ca.2.5 μT, men dette er fortsatt godt innenfor grensene satt av ICNIRP-veiledningen.

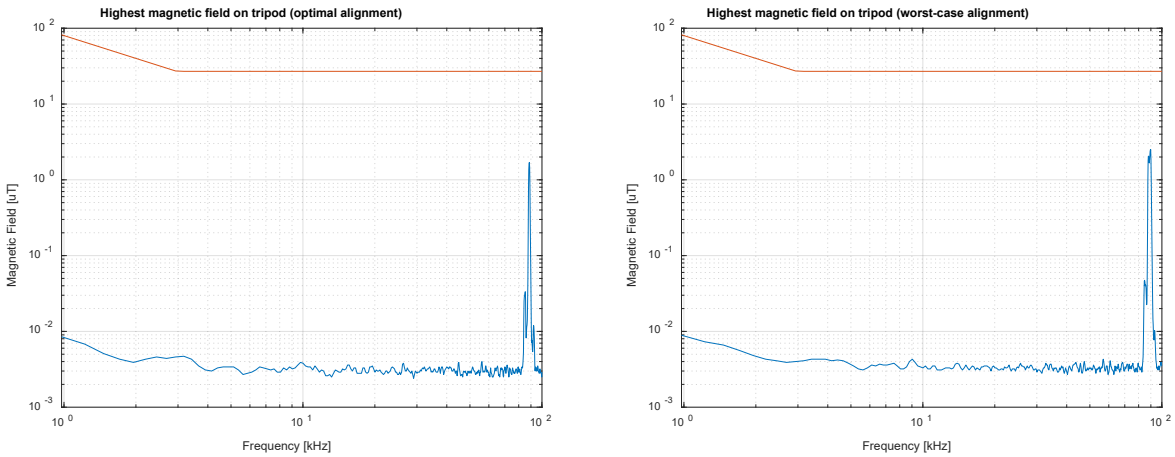


(a) (b)

Figur 49 – Magnetfelt utenfor dør ved beste (a) og i verste (b) posisjon. Blå kurve gir målte verdier og rød kurve gir grenseverdier i henhold til ICNIRP-veiledningen



Figur 50 – Måling på punkt inne i bussen med høyest magnetfelt



Figur 51 – Magnetfelt på punkt inne i bussen med høyeste verdi. Blå kurve gir målte verdier og rød kurve gir grenseverdier i henhold til ICNIRP-veiledningen

5.7. Oppvarming av fremmedlegemer på veibanen

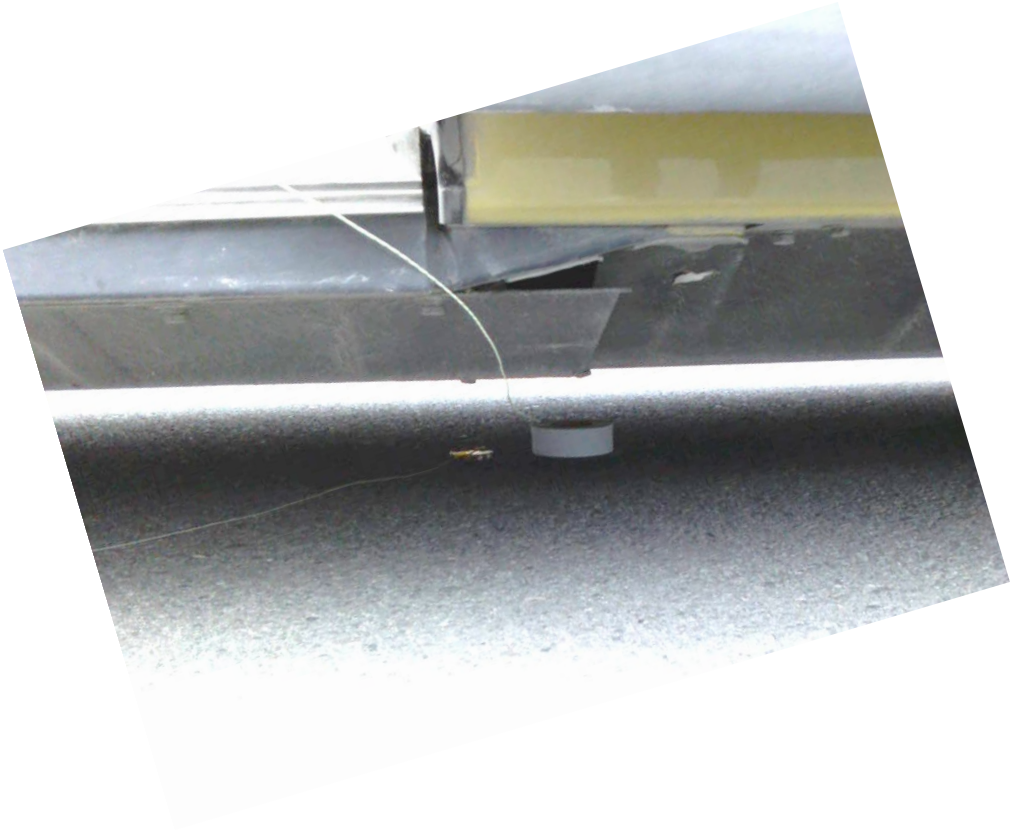
Som utgangspunkt for vurdering av andre praktiske aspekter omkring sikkerhet ved bruk av induktiv ladeinfrastruktur ble det gjennomført testing med fremmedlegemer på veibanen under lading. For å evaluere muligheten for oppvarming på grunn av induserte strømmer i ledende materialer ved langvarig eksponering for magnetfelt, ble disse testene gjennomført under statisk lading. Flere ulike objekter ble testet med samme fremgangsmåte. Hvert enkelt testobjekt ble utstyrt med temperatursensor og plassert midt i ladeområdet under bussen. I tillegg ble et ikke-ledende, ikke-magnetisk referanseobjekt også utstyrt med temperatursensor og plassert i ladeområdet. Temperaturen ble deretter overvåket ved ordinær statisk lading, og ladeprosessen ble avbrutt hvis for høye temperaturer ble målt. I tillegg be infrarødt kamera for termografi benyttet for å få et visuelt bilde av oppvarming i testobjektet.

5.7.1. Overkjørt aluminiumsboks

En første test ble gjennomført med en overkjørt brusboks av aluminium som testobjekt. Et bilde av testobjektet med påmontert temperatursensor er vist i Figur 52, og et bilde av objektet plassert under bussen, sammen med referanseobjektet er vist i Figur 53.

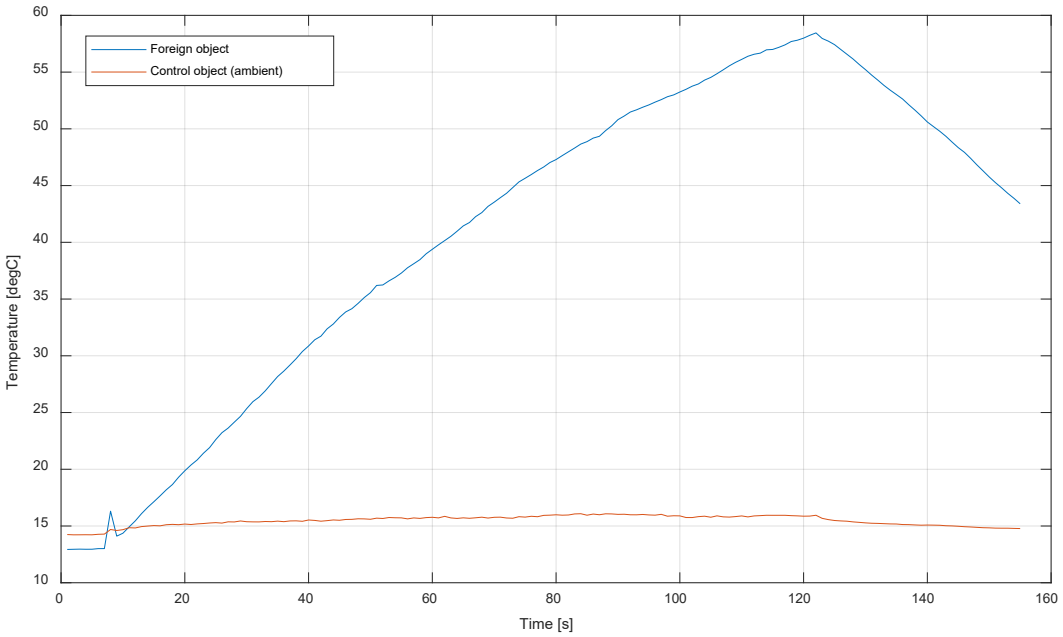


Figur 52 – Måling på punkt inne i bussen med høyest magnetfelt



Figur 53 – Testobjekt og referanseobjekt med temperaturmåling plasser under bussen ved lading

Resultatet fra temperaturmålingen er plottet i Figur 54. og viser hvordan at temperaturen stiger på grunn av induserte strømmer i testobjektet. I dette tilfellet er temperaturstigningen begrenset, og foregår nesten lineært med ca. 0.4 °C/s. I dette tilfellet når temperaturen ca. 58 °C før ladingen ble stoppet etter ca. 110 s. Et bilde fra termokamera tatt mot slutten av ladesesjonen er vist i Figur 55, og detektert maksimaltemperatur samsvarer rimelig godt med måling fra temperatursensor. I dette tilfelle er oppvarmingen begrenset, og på grunn av den relativt lave termiske massen til alumiumsboksen vil det ikke være noen stor umiddelbar berøringsfare hvis bussen hadde kjørt videre etter en statisk ladesesjon.



Figur 54 – Temperaturmåling – overkjørt aluminiumsboks



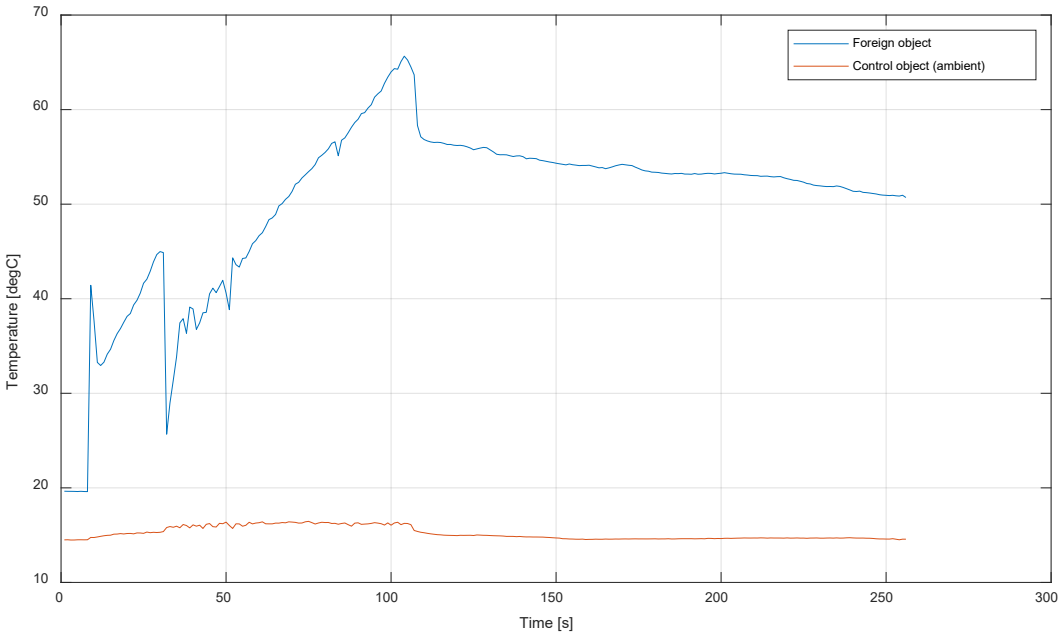
Figur 55 – Termografibilde av overkjørt aluminiumsboks like før stopp av lading

5.7.2.Magnetisk objekt med stor termisk masse

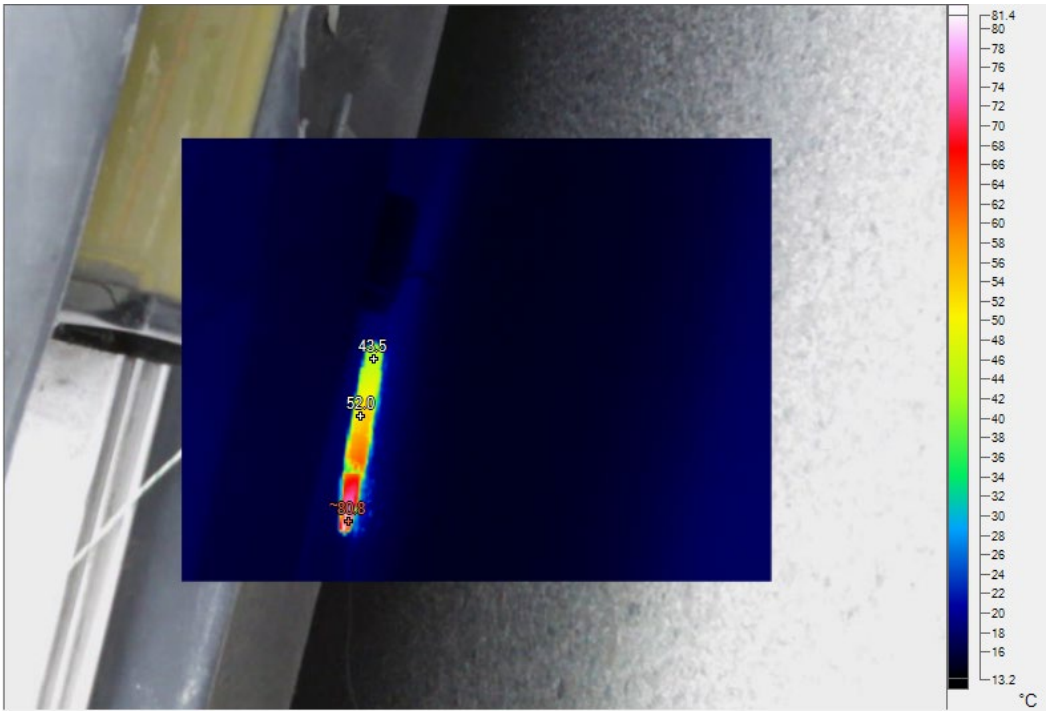
En neste test er gjennomført for å undersøke hva som vil skje med en magnetisk gjenstand med større termisk masse. En trekk-krok for en personbil som vist i Figur 56 er derfor brukt som eksempel. Temperaturmåling ved lading i ca. 100 s er vist i Figur 57. I dette tilfellet blir den termiske sensoren påvirket av magnetfeltet omkring testobjektet, og dette medfører en mindre stabil og presis temperaturmåling enn for eksempelet med aluminiumsboksen. Termografibildet i Figur 58 gir en maksimaltemperatur på ca. 80°C, og indikerer derfor at målingene fra temperatursensoren er for lave. Med unntak av en plutselig forskyvning etter ca. 40 s, gir likevel temperaturmålingen en generell indikasjon på temperaturutviklingen. Målt temperatur viser også et relativt raskt fall når lading blir avbrutt, før temperaturen deretter synker svært langsomt. Dette er forventet siden det meste av varmeutviklingen på grunn av induserte strømmer i det magnetiske materialet er forventet å skje nært overflaten av testobjektet, samtidig som varmen raskt vil fordele seg internt i et metallisk objekt. Når ladingen og varmeutviklingen nært overflaten stoppes vil derfor overflaten avkjøles ganske raskt i en kort periode. Samtidig har objektet en relativt stor termisk masse, og det vil ta lang tid før hele objektet vil kjøles ned. Et slikt magnetisk testobjekt med stor termisk masse kan derfor holde høye temperaturer i relativt lang tid etter at lading er avsluttet.



Figur 56 – Trekk-krok for bil som eksempel på magnetisk gjenstand med relativt stor termisk masse.



Figur 57 – Temperaturmåling – trekk-krok



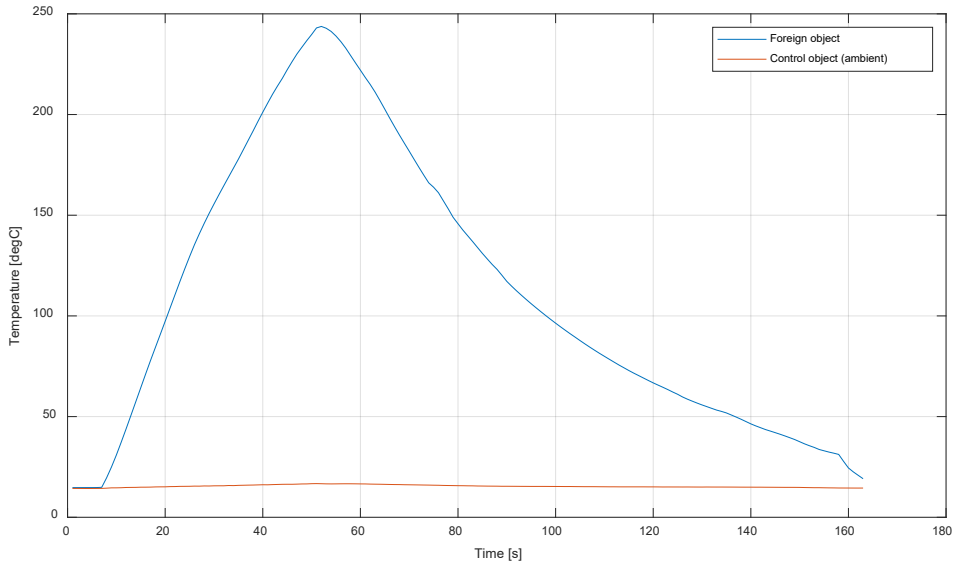
Figur 58 – Termografibilde av trekk-krok like før stopp av lading

5.7.3.Magnetisk objekt med lav termisk masse kombinert med brennbart materiale

Som et eksempel på et mulig magnetisk fremmedlegeme med lav termisk masse har en test blitt gjennomført med et lokk fra et syltetøyglass. Lokket har brennbart plastbelegg på den ene siden og vil dermed også representere muligheten for antenning på grunn av oppvarmede fremmedlegemer.

Temperaturmåling fra denne testen er vist i Figur 59, som viser at temperaturen stiger svært raskt. Dette er et resultat av at testobjektet er magnetisk og tynt med lav termisk masse, som gir rask oppvarming. Temperaturen når nesten 250°C i løpet av ca. 40 s. Ladingen ble i dette tilfellet avbrutt når det ble observert røykutvikling fra testobjektet på grunn av begynnende forbrenning av plastbelegget på syltetøylokket. Bilder av testobjektet før og etter testen er vist i Figur 60, og viser tydelig hvordan oppvarmingen har medført smelting og forkulling av plastbelegget på syltetøylokket. Et termografibilde tatt like før røykutviklingen ble observert og ladingen ble stanset er vist i Figur 61 og bekrefter at maksimaltemperaturen på overflaten av testobjektet var over 240°C.

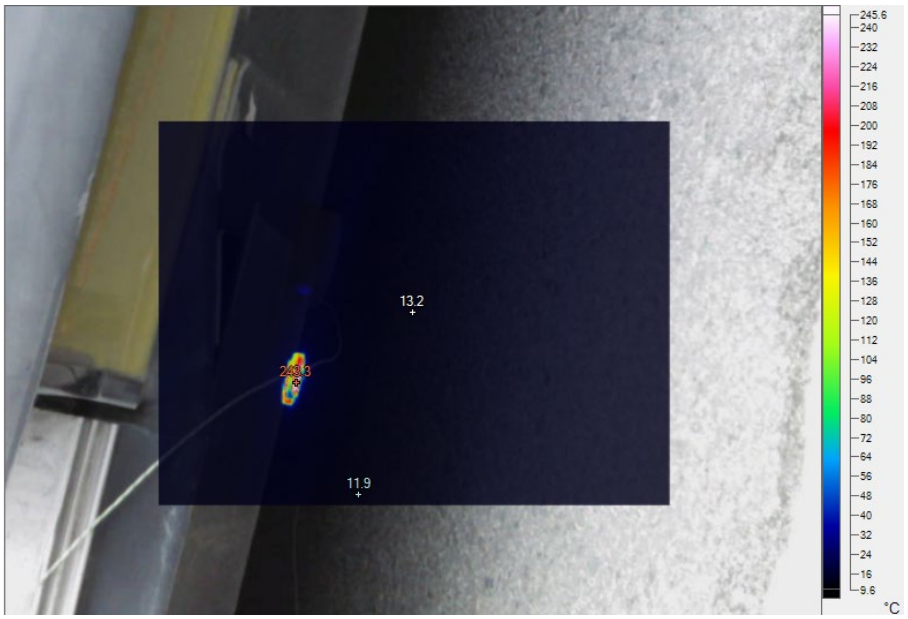
Denne testen demonstrerer mulig brannfare på grunn av små magnetiske fremmedlegemer i kombinasjon med brennbart materiale. Dette er likevel først og fremst et mulig problem ved statisk lading siden bussen ved dynamisk lading vil passere ett ladesegment på langt kortere tid enn det som er nødvendig for å få oppvarming til temperaturer som medfører antennelsesfare eller berøringsfare. Mulige utfordringer omkring antennelsesfare og berøringsfare på grunn av fremmedobjekter i ladeområdet er derfor ikke nødvendigvis kritisk for dynamisk lading, og har ikke vært omfattet av kravene som ble satt til installasjonen på Sandmoen, men bør vurderes nærmere ved statisk lading.



Figur 59 – Temperaturmåling – syltetøylokk



Figur 60 – Syltetøylokk før og etter test med lading i ca. 40 s.

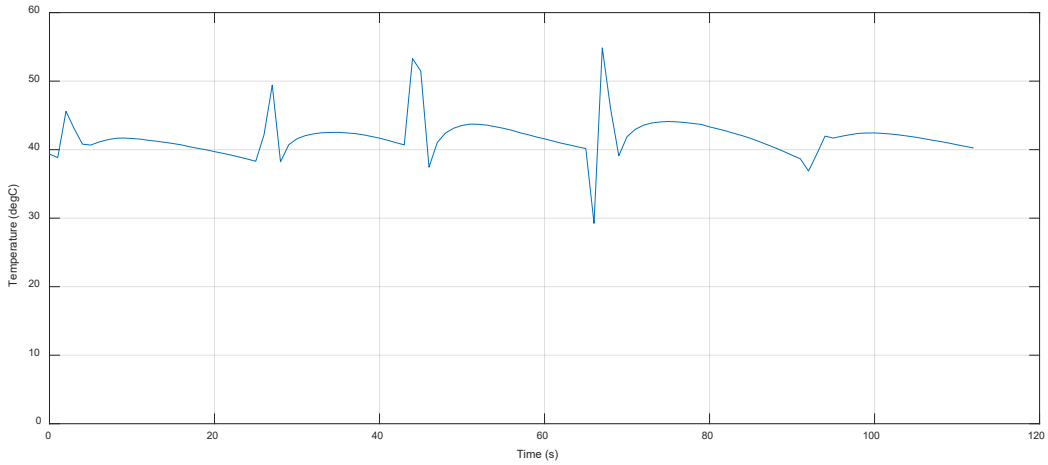


Figur 61 – Termografibilde av syltetøylokk like før røykutvikling og avbrutt lading

5.7.4.Test med deteksjonssystem for oppvarming av fremmedlegemer

Det finnes allerede mange vitenskapelige studier omkring metoder for å detektere fremmedlegemer i nærheten av induktive ladesystemer. For store magnetiske fremmedlegemer, slik som trekk-kroken som ble brukt som eksempel under testing, finnes det muligheter for å detektere påvirkningen på induktans i ladesystemet. Det kan dermed være mulig å detektere slike objekter fra det elektriske systemet. For ledende, men ikke-magnetiske, objekter vil slik detektering være vanskelig. Tilsvarende vil det være vanskelig å detektere små magnetiske objekt som ikke gir betydelig påvirkning på de magnetiske forholdene i ladesystemet. Av testene som er gjennomført for å vurdere mulig oppvarming av fremmedlegemer under lading, er det dermed testen med syltetøylokket som vil være mest kritisk. Samtidig vil også deteksjon av en overkjørt aluminiumsboks være vanskelig.

Som respons på testresultatene som viser mulighet for rask oppvarming og antennelsesfare for magnetiske fremmedlegemer med liten termisk masse i kombinasjon med brennbart materiale, har Electreon utviklet og testet et system for deteksjon av oppvarming i fremmedelementer basert på termografi. Termiske kamera ble dermed montert under bussen og integrert i ladesystemet slik at lading automatisk kan avbrytes når et objekt med høy temperatur detekteres. Testen med syltetøylokk ble derfor gjentatt etter at dette systemet var installert, og resultater fra temperaturmåling er vist i Figur 62. Figuren viser hvordan temperaturen stiger raskt i noen korte intervaller når lading blir aktivert. Den høye temperaturen blir så detektert av beskyttelsessystemet og ladingen blir slått av frem til ingen punkter med temperatur over et gitt nivå er synlige for systemet. Ladingen starter dermed opp på nytt etter en stund når ingen uønsket høye temperaturer kan detekteres, og den samme prosessen med rask oppvarming og deretter stopp av ladingen gjentar seg på nytt. I dette tilfellet holdes maksimal målt temperatur inder ca. 55°C, og systemet unngår dermed både antennelsesfare og mulig berøringsfare etter at bussen har kjørt fra ladepunktet.



Figur 62 – Temperaturmåling på syltetøylokk ved lading etter installasjon av termografi-basert system for beskyttelse mot overoppheting av fremmedlegemer på veibanen

5.8. Operasjonelle erfaringer

Bussene gikk i ordinær rutetrafikk fra 19. mai 2025 til 31. desember 2025 på linjene 75, 76 og 77 på Byneset i Trondheim. I denne perioden kjørte bussene om lag 3 460 kilometer i rute per uke. Samlet kjørelengde i testperioden var i underkant av 90 000 kilometer. Bussene inngikk i ordinær drift på lik linje med øvrige busser i Vy sin busspark, og ble kjørt av et stort antall førere. Prosjektet la ikke opp til særskilt rapportering fra førerne i driftsperioden, men registrerte tekniske data og fulgte opp eventuelle avvik. Prosjektet har ikke mottatt kritiske tilbakemeldinger fra førerne knyttet til bruk av den trådløse ladeteknologien. Dette indikerer at teknologien ble opplevd som trygg og brukervennlig for førerne.

Dynamisk trådløs lading skjedde når bussene kjørte ut fra depot og ved kjøring til vask. Siden ladestrekningen var kort og bygget for pilot- og datainnsamlingsformål ble den trådløse ladingen supplert med lading fra CCS-plugg. I driftsperioden ble det gjennomført 432 dynamiske ladesykluser.

I løpet av perioden med rutekjøring var det tre episoder som førte til skader på bussene og at de måtte tas ut av trafikk i kortere perioder. Ingen av episodene var forårsaket av den trådløse ladeteknologien, og ingen av dem førte til skader på ladeutstyr, mottakerplater eller annen infrastruktur knyttet til

pilotprosjektet. De to første episodene skyldtes at bussene kom borti faste objekter som forårsaket skader på blant annet vinduer, dører og karosseri. Det er ikke fastslått sikre årsaker, men bussenes økte akselavstand og tilhørende større svingradius antas å ha vært en medvirkende faktor. Den tredje episoden var en delvis utforkjøring etter en unnvikelsesmanøver ved et hull i veien og en veiskulder som ga etter. Bussen måtte hjelpes tilbake på veien, men fikk ellers ikke skader. Ingen av episodene førte til personskader.

Det var opprinnelig en plan at prosjektet skulle overta det operative driftsansvaret for teknologien i løpet av pilotperioden. Denne planen ble etter hvert forlatt. Å overta slikt ansvar ville krevd oppbygging av ny kompetanse, etablering av rutiner og beredskap for feilsøking og vedlikehold. Prosjektet vurderte at dette ville kreve mer kapasitet og spesialisert kompetanse enn det som var hensiktsmessig å bygge opp innenfor rammen av en kort pilot. Det ble derfor ikke vurdert som fornuftig ressursbruk å etablere en egen operativ driftsorganisasjon for teknologien i prosjektperioden. Vedlikehold og teknisk oppfølging av selve ladesystemet ble i stedet håndtert av teknologileverandør. Om dette er en god eller nødvendig modell også for et større prosjekt med lengre varighet bør vurderes som en del av forarbeidene til et eventuelt nytt prosjekt.

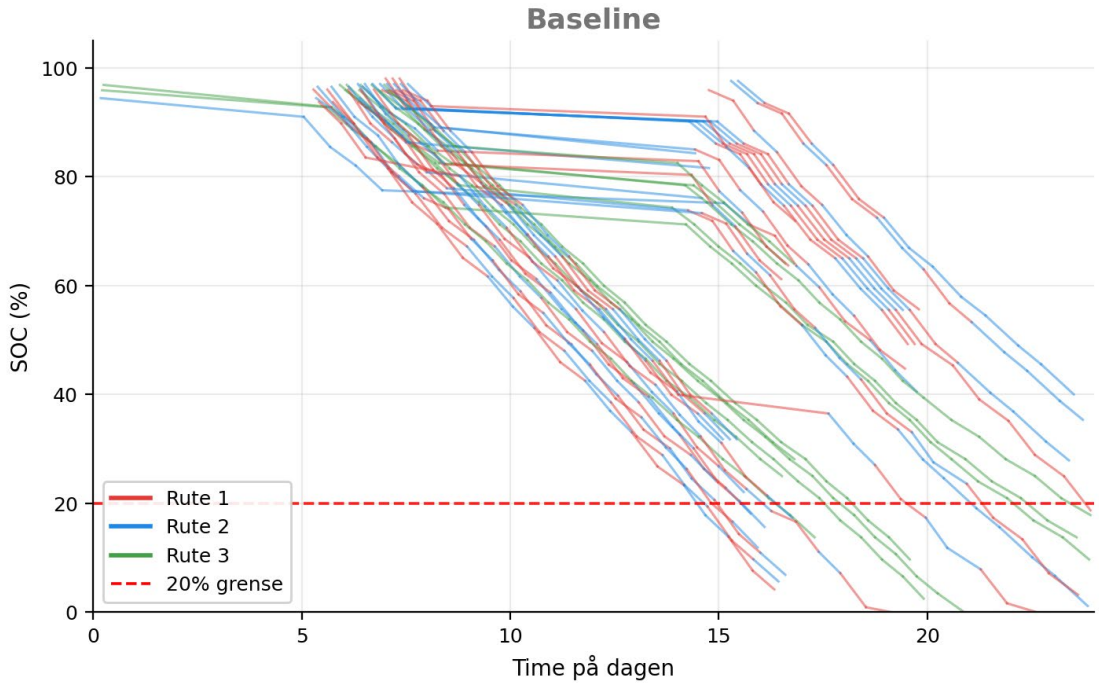
6. Mulige bruksområder for el-vei i Trondheim

AtB har identifisert metrobusslinjene M1 og M2 som de meste krevende linjene å elektrifisere i Stor-Trondheim. Sammen med metrobusslinje M3 utgjør disse ryggraden i kollektivtilbudet i Trondheim og står for rundt 40 % av alle bussreiser. For M1, M2 og M3, som opereres med avganger hvert 5.–10. minutt fra tidlig morgen til sent på kveld, er muligheten for tradisjonell nattlading i depot alene utilstrekkelig fordi bussene ikke rekker full lading i de korte pausene som finnes mellom turene. Det er derfor gjort en vurdering av tre ulike caser for hvordan trådløs lading kan bidra med ladeinfrastruktur for en stabil og sikker energiforsyning til metrobusslinjene.

Grunnlaget for analysene i dette kapittelet er en detaljert kartlegging av AtBs faktiske rutenett og energibehov. All rutedata er hentet fra rutetabellen til AtB, og det er tatt utgangspunkt i alle avganger på en hverdag. For å skalere opp til ett år er det brukt et estimat på at ett år tilsvarer 315 hverdager. Energiforbruket per stoppsegment (fra en holdeplass til neste) er beregnet med SINTEFs SME2C-modell (SINTEF Multimodal Energy and Emission Calculation Model), en fysikkbasert kjøretøysimulering som tar hensyn til veigeometri, høydeprofil og kjøretøyspesifikasjoner hentet fra NVDB. For de tre metrobusslinjene er det inkludert 727 hverdagsavganger med et samlet energiforbruk på omtrent 24 400 kWh/dag (2,16 kWh/km i snitt). Med *tur* og *avgang* menes gjennomgående én enkeltrettet kjøring fra endestopp til endestopp i én retning, dvs. ikke tur-retur. En rundtur (f.eks. Sluppen– Studentersamfundet –Sluppen) telles dermed som to turer/avganger, én i hver retning. Alle kWh/tur-tall i dette kapittelet er per enkeltrettet tur. Øvrige bussruter i Trondheim kommune bidrar med omtrent 55 300 kWh/dag, til et totalt energibehov på omtrent 79,7 MWh/dag. Et forbehold i modelleringen er at bussantallet er optimalisert ut ifra rutetabellen alene og ikke inkluderer andre praktiske føringer som sjåførlogistikk, avtaleverk og krav til reservemateriell. Dette gjør at bussantallet som brukes i simuleringene er noe lavere enn det som vil være realistisk mulig i et reelt driftsscenario.

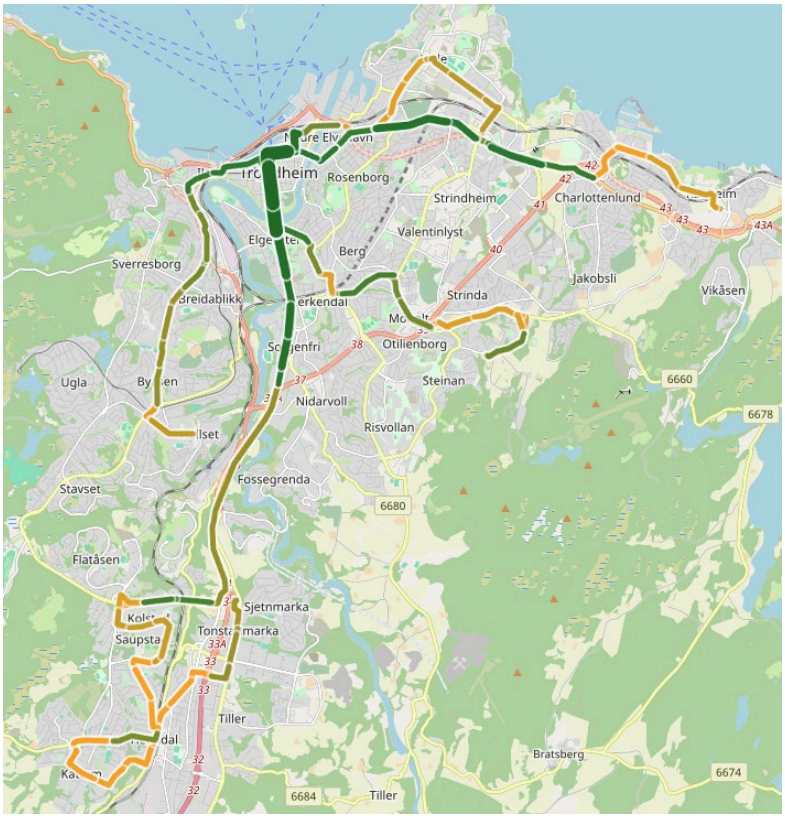
På dette grunnlaget er tre konsepter for ladeinfrastruktur analysert og sammenlignet. Konsept 1 tar utgangspunkt i å maksimere energiutnyttelse ved å plassere trådløs lading på en av strekningene hvor trafikkstrømmene er størst. Konsept 2 er en opportunistisk strategi der ladeinfrastruktur koordineres med allerede planlagte gateopprustninger i tre navngitte korridorer, som kan føre til at anleggskostnaden for ladeinfrastruktur reduseres med 30%. Konsept 3 analyserer statisk lading ved endestopp og reguleringsplasser, der bussene uansett har planlagte pauser.

For hvert konsept er det beregnet daglig ladepotensial (kWh/dag), levelisert kostnad (NOK/kWh over infrastrukturens levetid) og en simulering av bussenes State of Charge (SOC) for de metrobussene som betjener rute M1, M2 og M3 gjennom en hel driftsdag. Levelisert kostnad er valgt som hovedindikator fordi den sammenstiller investeringskostnad og energileveranse over tid, og dermed gir et direkte mål på kostnadseffektivitet uavhengig av systemstørrelse. SOC-simuleringen gir et supplement ved å illustrere om de ulike ladestrategiene faktisk er tilstrekkelige til å sikre drift uten at busser går tomme for strøm i løpet av en hverdag. Et eksempel for en baseline situasjon er vist i Figur 63, hvor metrobussrutene opereres med kun nattlading på depot. Her ser en at flere busser havner under akseptabel SOC på 20%, som illustrerer behovet for lademuligheter utover nattlading. I tillegg er det undersøkt tilsvarende for en hverdag med krevende forhold som øker energiforbruket til gjennomsnittlig 3,6 kWh/km.



Figur 63 – SOC-simulering for batterielektriske Metrobusser med kun depotlading. Bussene blir fordelt på ruter etter tilgjengelighetsprinsipp, som gjør at noen linjer i figuren skifter farge i løpet av dagen. Det bemerkes også at SOC er oppgitt ved start på tur, som gjør seg spesielt utslag i et tilsynelatende energiforbruk ved inaktivitet, f.eks. på natt.

Som et utgangspunkt for hensiktsmessig plassering av trådløs lading er det i Figur 64 vist estimert energiintensitet per segment for alle busser som trafikkerer metrobusstrekningene. Fargen på linjen viser gjennomsnittlig energiforbruk per kilometer (kWh/km), mens bredden på linjen viser antall bussturer per dag på segmentet (tykkere linje = flere daglige passeringer).



Figur 64 – Energiintensitet per segment langs metrobusstraséene (farge: kWh/km, grønt=lavt/rødt=høyt) og daglig trafikkmengde (linjebredde: antall turer/dag)

6.1. Konsept 1 – Optimalisert for AtBs behov

6.1.1.Beskrivelse

Kostnadseffektiviteten til ladeløsninger kan forenklet presenteres som levelisert kostnad (LC) i kr/kWh hvor *kr* består av summen av etablerings og driftskostnader og *kWh* består av den samlede energien som overføres til bussene over infrastrukturens levetid (25 år for dynamisk lading, 15 år for statisk lading). En lav LC innebærer at investeringen gir mye ladet energi per krone.

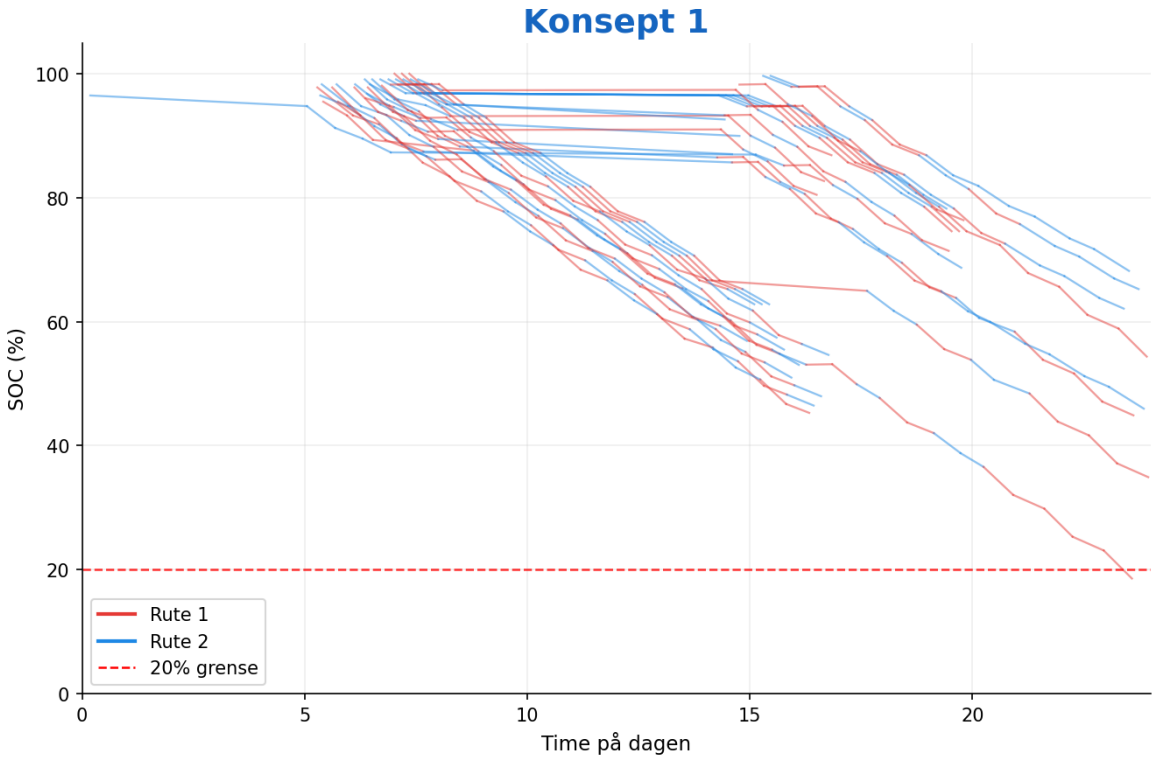
Analysen er avgrenset til korridoren Sluppen–Hesthagen–Studentersamfundet (Figur 65), som trafikkeres av begge metrobussrutene i begge retninger. Rute 3 kjører en annen korridor og inngår ikke i Case 1. Rute 1 og 2 kjører parallelt gjennom Lerkendal, Valøyvegen, Bratsbergvegen, Hesthagen og Studentersamfundet, med 241–245 metrobusspasseringer per dag per segment. Korridorens samlede daglige ladepotensial er beregnet til 7 951 kWh/dag ved full utbygging, tilsvarende 33 % av metrobussenes totale energibehov (24 429 kWh/dag).

En viktig effekt er sambruk, ved at alle 10 segmentene trafikkeres også av øvrige busslinjer. Med mottakerspole på standardflåten kan disse levere ytterligere 4 588 kWh/dag – til sammen 12 539 kWh/dag for hele bussflåten. Dette øker samlet infrastrukturutnyttelse og forbedrer LC.

SOC-simuleringen i Figur 66 viser at kun én av bussene får sin SOC redusert til under 20 % på et tidspunkt i løpet av dagen i Konsept 1, med minimum SOC på 18,6 %. I snitt lades det 16,3 kWh per tur i Konsept 1 for linje 1 og 2, mot et gjennomsnittlig energiforbruk på 33.6 kWh/tur. En sensitivitetstest av ladeeffekten viser at det er tilstrekkelig å øke trådløs ladeeffekt for metrobuss fra 150 kW til omtrent 155 kW for å løfte den gjenværende bussen over 20 %-grensen (minimum SOC for denne bussen stiger fra 18,6 % ved 150 kW til 20,5 % ved 155 kW).



Figur 65 – Kartlagt korridor for Konsept 1 (Sluppen – Hesthagen - Studentersamfundet)



Figur 66 – SOC-simulering for batterielektriske metrobusser på rute 1 og 2 i Konsept 1

Tabell 10 – Nøkkeltall for delsegmenter i Konsept 1

Segment	**Dist (km t/r)**	**Turer/dag**	**kWh/dag**	**LC (NOK/kWh)**
Samfundet → Hesthagen	0,62	241	1 076	0,71
Valøyvegen → Lerkendal	0,26	245	564	0,73
Lerkendal → Hesthagen	0,41	245	796	0,81
Hesthagen → Lerkendal	0,58	241	1 109	0,82
Hesthagen → Samfundet	0,81	245	1 127	0,88
Lerkendal → Valøyvegen	0,44	241	554	1,05
Bratsbergvegen → Valøyvegen	0,47	245	564	1,16
Sluppen → Bratsbergvegen	0,40	245	564	1,24
Bratsbergvegen → Sluppen	0,35	241	554	1,43
Valøyvegen → Bratsbergvegen	0,76	241	1 044	1,45
Sum / snitt	5,10	–	7 951	0,97

Tabell 11 – Sensitivitet for investeringskostnad

Kostnadsnivå	Total investering	Snitt LC (NOK/kWh)
Lav (10 MNOK/km)	51 MNOK	0,8
Middels (12,5 MNOK/km)	64 MNOK	1,0
Høy (15 MNOK/km)	76 MNOK	1,2

6.2. Konsept 2 – Etablering koordinert med planlagte veiprosjekter

6.2.1. Beskrivelse

Konsept 2 er en opportunistisk utbygging hvor trådløs ladeinfrastruktur etableres i kombinasjon med allerede planlagte gateoppgraderinger. Når vei åpnes for graving, kan spoler og kabling legges ned til lavere kostnad. Infrastrukturkostnaden er satt til omtrent 30 % lavere enn for et selvstendig prosjekt fordi kostnadene deles med veiprosjektet.

Tre konkrete korridorer er analysert, til sammen 7,19 km og 62,9 MNOK totalinvestering:

- Haakon VIIs gate (Innherredsveien – Ingemann Torps vei til Haakon VII gate 25 ved Lade idrettsanlegg, 2,34 km).
- Elgeseter gate søndre del (Studentersamfundet til Lerkendal, 3,34 km)
- Innherredsveien vest (Bakke bru til Buran, 1,51 km)

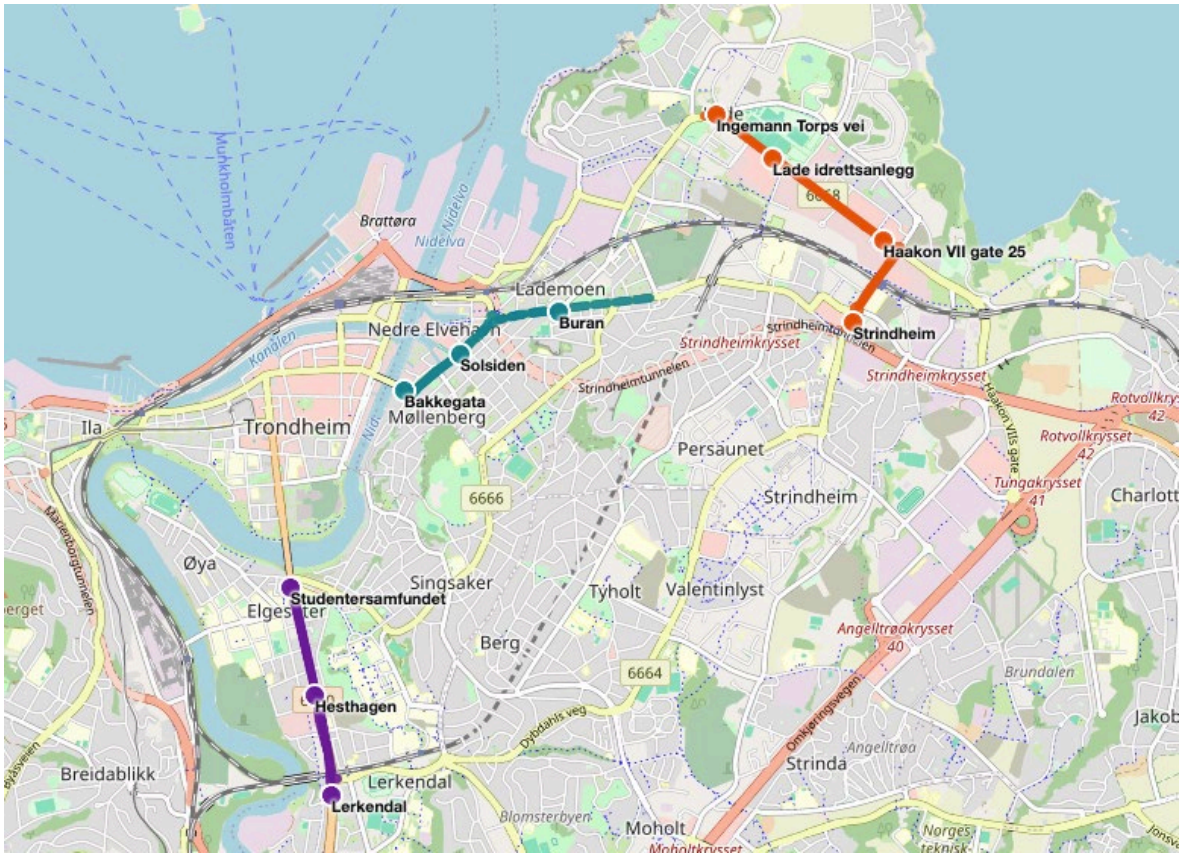
Tabell 12 – Nøkkeltall for delsegmenter i Konsept 2

Korridor	Km t/r	kWh/dag	MNOK	LC (NOK/kWh)
Haakon VIIs gate	2,34	1 766	20,5	2,21
Elgeseter gate søndre del	3,34	8 252	29,3	0,68
Innherredsveien vest	1,51	3 211	13,2	0,78
Sum / snitt	7,19	13 230	62,9	0,91

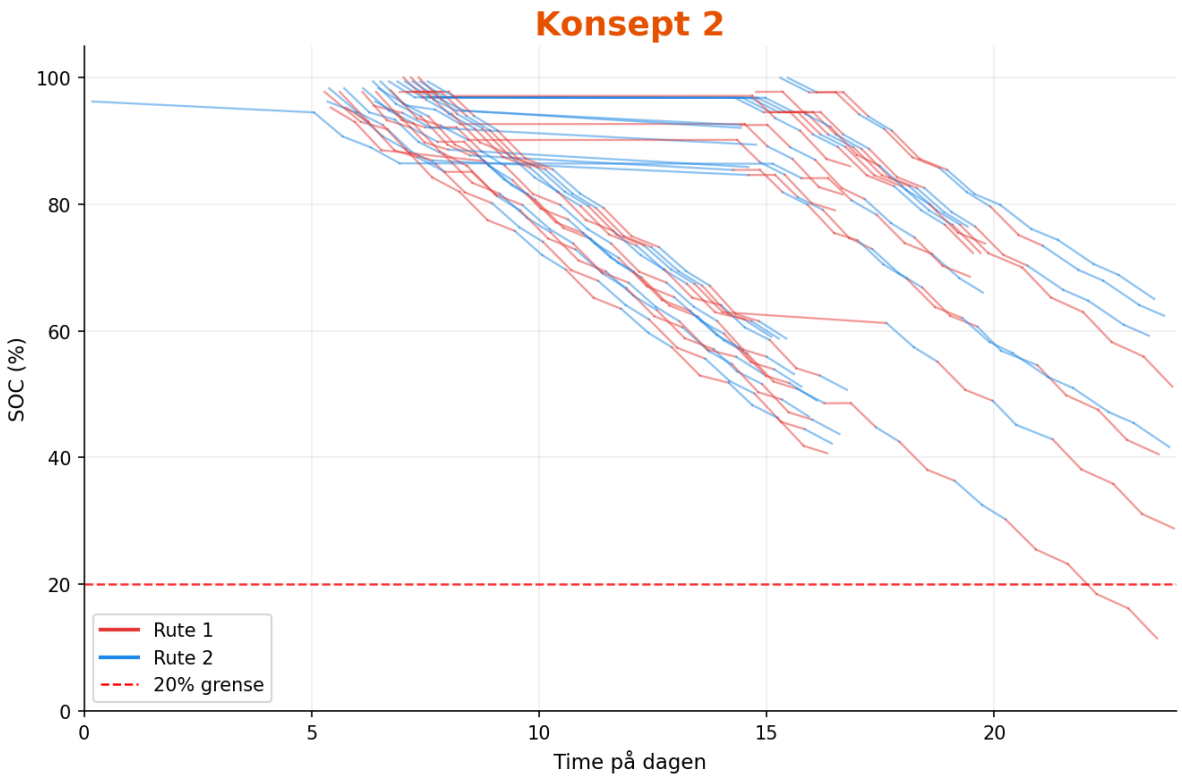
Tallene i Tabell 12 er summen av metrobuss og øvrige busslinjer som passerer korridorene. Fordelt per kjøretøytype går 1 582 av 1 766 kWh/dag i Haakon VIIs gate, 4 108 av 8 252 kWh/dag i Elgeseter gate søndre del og 1432 av 3 211 kWh/dag i Innherredsveien vest til metrobussene – til sammen 7 123 av 13 230 kWh/dag (ca. 54 %). Dette tilsvarer en dekningsgrad på ca. 29,2 % av metrobussenes totale energibehov, mot opptil 33 % for Konsept 1.

Ingen av de tre korridorene trafikkeres av rute 3 (M3), som dermed (i likhet med i Konsept 1) ikke får noen ladenytte av Konsept 2.

SOC-simuleringen i Figur 68 viser at kun én av bussene får sin SOC redusert til under 20 % på et tidspunkt i løpet av dagen, med minimum SOC på 11,4%. I snitt lades det 14,2 kWh/tur på linje 1 og 15,2 kWh/tur på linje 2. En sensitivitetstest viser at trådløs ladeeffekt må økes fra 150 kW til 176 kW for at denne bussen skal holde seg over 20 % (minimum SOC 20,1 % ved 176 kW). Behovet er høyere enn i Konsept 1 fordi korridorene i Konsept 2 gir noe kortere tid på ladestrekning per tur.



Figur 67 – Kartlagte korridorer for Konsept 2 (Haakon VIIs gate, Elgeseter gate søndre del, Innherredsveien vest)

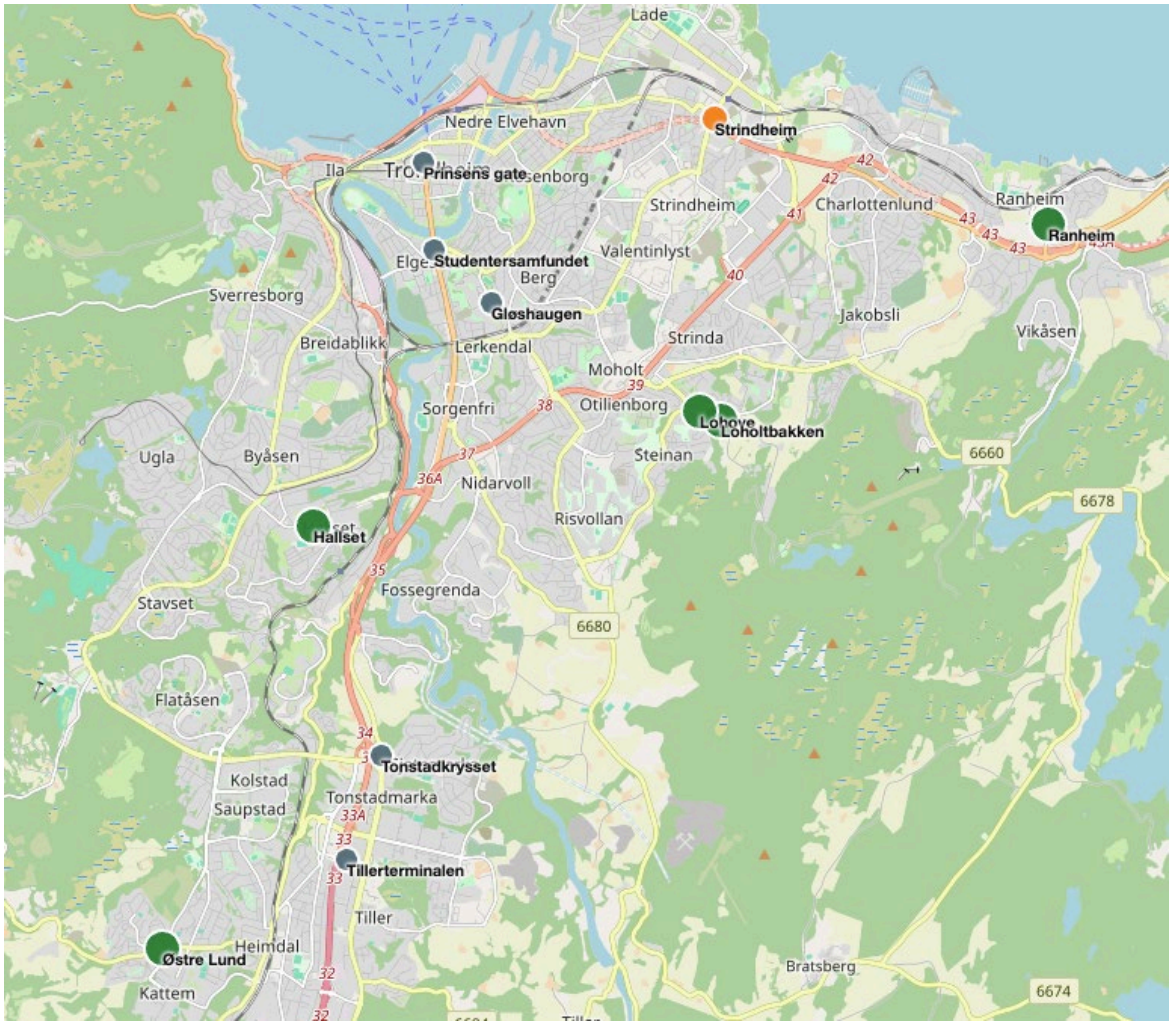


Figur 68 – SOC-simulering for batterielektriske metrobusser på rute 1 og 2 i Konsept 2

6.3. Konsept 3 – Statisk lading på sentrale punkter

6.3.1.Beskrivelse

Konsept 3 omfatter statisk (eller «semi-dynamisk») lading på endestopp og reguleringsplasser (Figur 69). Ladeeffekten er 300 kW med 95 % virkningsgrad. Lading skjer uten behov for endringer i ruteplan. To oppholdstyper er definert: terminaler med 6 minutters snupause (leverer 28,5 kWh per bussbesøk) og mellom- eller knutepunktstopp med 0,5 minutt (leverer 2,38 kWh). Selv om kWh per stopp er langt lavere ved mellomstoppene, kan kumulert bidrag bli betydelig ved høy bussfrekvens (f.eks. 2 300 passeringer/dag ved Studentersamfundet).



Figur 69 – Ladepunkter for Konsept 3 (statisk lading ved terminaler og utvalgte holdeplasser)

Tabell 13 – Nøkkeltall for ladepunkter i Konsept 3

Lokasjon	Type	kWh/stopp	Stopp/dag	kWh/dag
Østre Lund	Terminal	28,5	542	15 447
Hallset	Terminal	28,5	405	11 542
Ranheim	Terminal	28,5	381	10 858
Loholtbakken	Terminal	28,5	355	10 118

Studentersamfundet	Holdeplass	2,38	2 301	5 465
Strindheim	Knutepunkt	15,11 / 2,38	1 747	10 341
Prinsens gate	Holdeplass	2,38	1 746	4 147
Tonstadkrysset	Holdeplass	2,38	1 295	3 076
Tillerterminalen	Holdeplass	2,38	552	1 311
Gløshaugen	Holdeplass	2,38	407	967
Sum	–	–	–	73 271

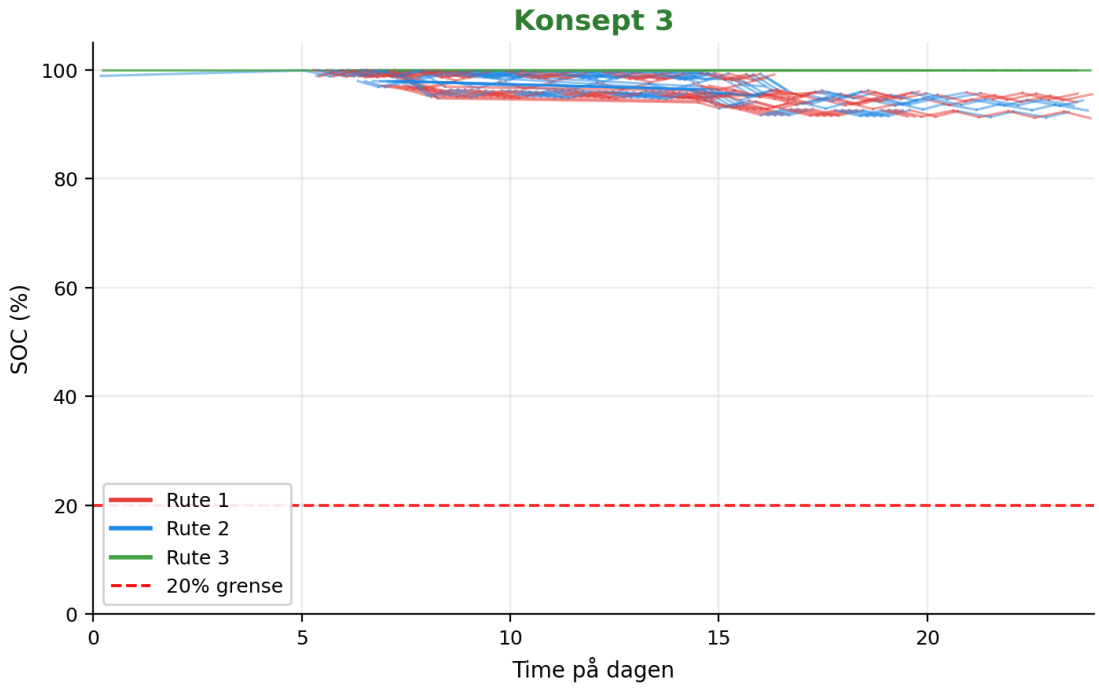
Med én lader per stoppested à 1,0 MNOK er samlet investering 10,0 MNOK for alle 10 ladepunkter. Dette er langt lavere enn Case 1 (64 MNOK) og Case 2 (63 MNOK), samtidig som daglig ladepotensial er 73 271 kWh/dag – nesten syv ganger høyere enn Case 2.

Levelisert kostnad for terminalstoppene er beregnet til 0,04 NOK/kWh. Sammenlignet med Konsept 1 (snitt 1,44 NOK/kWh) er statisk lading 36 ganger rimeligere per levert kWh.

Tabell 14 – Nøkkeltall for Konsept 3 som helhetlig konsept

Nøkkeltall	**Verdi**
Antall ladepunkter	10
Total investering	10,0 MNOK
Daglig ladepotensial	73 271 kWh/dag
Årlig ladepotensial	23,1 GWh/år (315 driftsdager)
Levelisert kostnad (snitt)	0,04 NOK/kWh
Busser med kritisk lav SOC	0 av 47 (eneste scenario som klarer heldagsdrift)

I snitt lades det 33,5 kWh per tur under Konsept 3 (linje 1: 33,9 kWh/tur, linje 2: 33,2 kWh/tur, linje 3: 33,2 kWh/tur). Det er tilnærmet identisk med det gjennomsnittlige energiforbruket på ca. 33,6 kWh/tur, og gjør at Konsept 3 er eneste scenario der ingen busser går tomme for strøm i løpet av driftsdagen.



Figur 70 – SOC-simulering for batterielektriske metrobusser under Konsept 3

6.4. Sensitivitetsanalyse

6.4.1.Kostnader

Kostnadene for ladeinfrastruktur er usikre, særlig for dynamisk trådløs lading, som fortsatt er en umoden teknologi der prisene bør valideres mot leverandørtilbud ved konkret utbygging. Tabell 15 viser investeringsbehov og levelisert kostnad for alle tre konseptene ved lavt, middels og høyt kostnadsnivå, definert som ±20 % rundt kostnadsanslaget som er brukt i hovedanalysen.

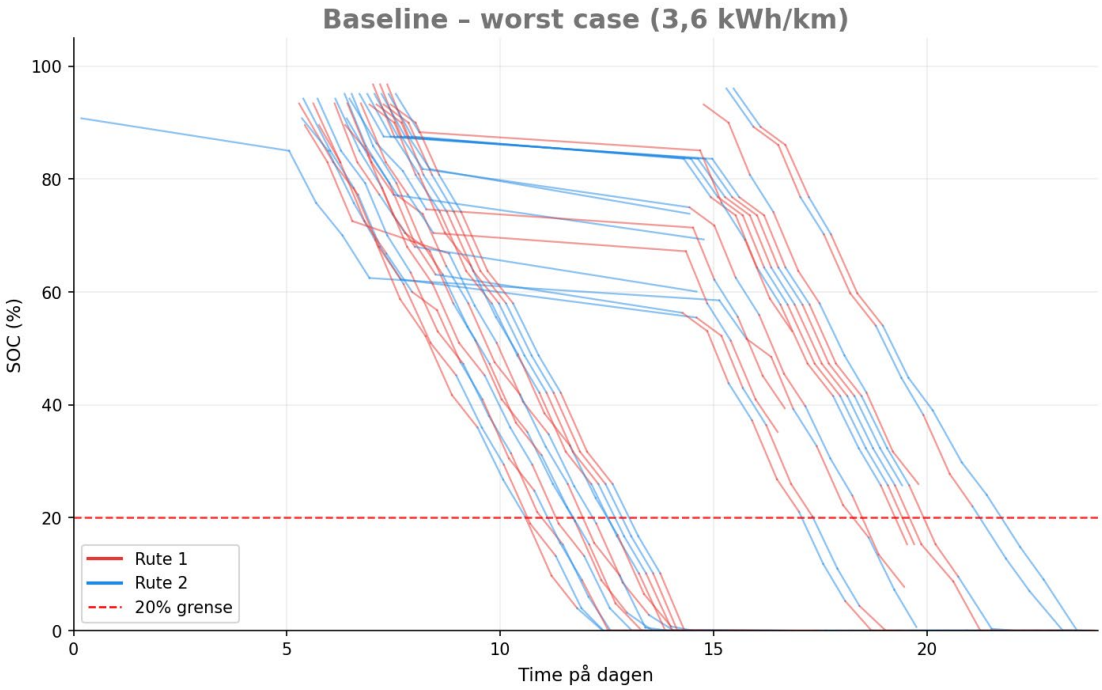
Tabell 15 – Sensitivitetsanalyse investeringskostnader

Konsept	**Kostnadsnivå**	**Investering**	**LC (NOK/kWh)**
Konsept 1 – trådløs metrokorridor	Lav (10,0 MNOK/km)	51 MNOK	0,8
Konsept 1 – trådløs metrokorridor	Middels (12,5 MNOK/km)	64 MNOK	1,0
Konsept 1 – trådløs metrokorridor	Høy (15,0 MNOK/km)	76 MNOK	1,2
Konsept 2 – trådløs gatekorridor	Lav (7,0 MNOK/km)	50 MNOK	0,7
Konsept 2 – trådløs gatekorridor	Middels (8,75 MNOK/km)	63 MNOK	0,9
Konsept 2 – trådløs gatekorridor	Høy (10,5 MNOK/km)	76 MNOK	1,1
Konsept 3 – statisk trådløs terminallading	Lav (0,8 MNOK/lader)	8,0 MNOK	0,03
Konsept 3 – statisk trådløs terminallading	Middels (1,0 MNOK/lader)	10,0 MNOK	0,04
Konsept 3 – statisk trådløs terminallading	Høy (1,2 MNOK/lader)	12,0 MNOK	0,05

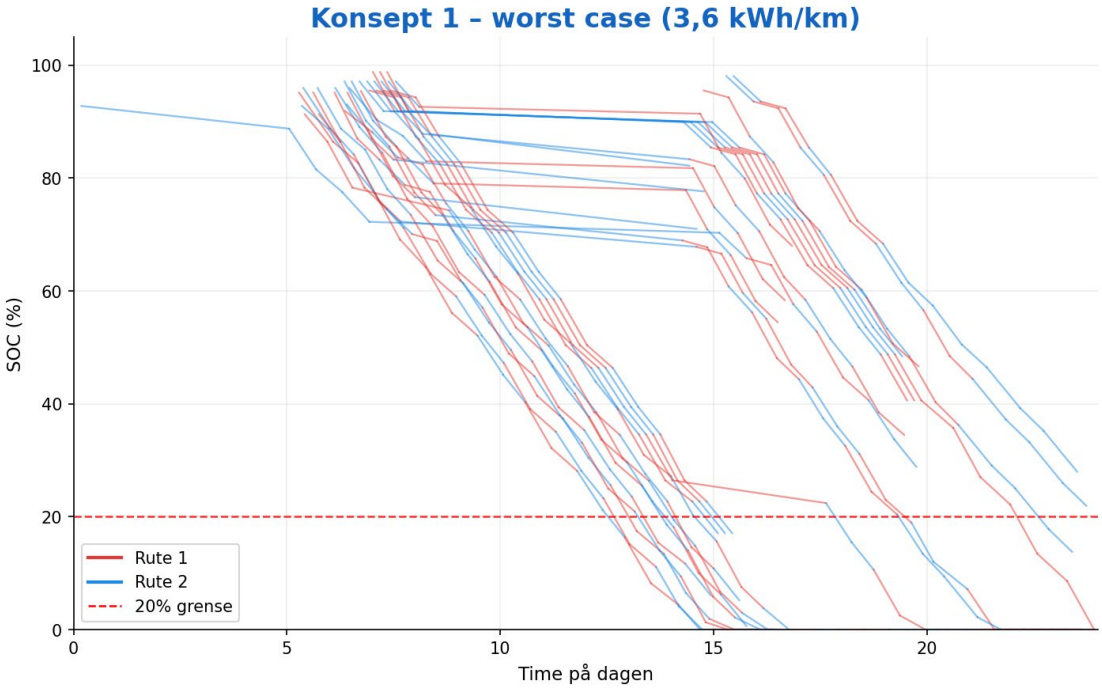
Alle tall for LC er beregnet uten diskontering. Sammenligningen mellom konseptene er relativt uavhengig av dette, men de absolutte kostnadstallene er noe mer konservative enn de ville vært med diskontering inkludert.

6.4.2.«Worst case» energiforbruk

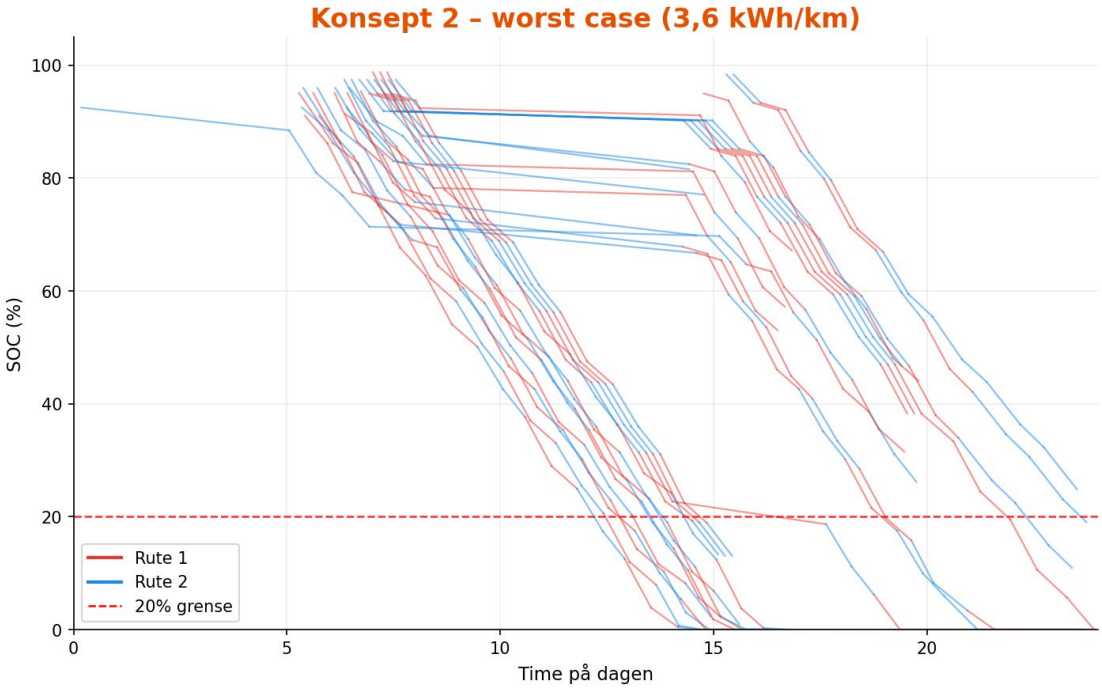
SOC-simuleringen er i tillegg kjørt med et «worst case»-energiforbruk på 3,6 kWh/km i snitt – en faktor 1,67 ganger normalforbruket (2,16 kWh/km). Dette tilsvarer vinterforhold kombinert med høy passasjerbelastning, og illustrerer hvor sårbart driftsopplegget er for økt energibehov. Med ladeenergi basert på rutetid kreves det i worst case en trådløs ladeeffekt for metrobuss på ca. 350 kW i Konsept 1 og ca. 400 kW i Konsept 2 for at ingen av bussene på rute 1 og 2 skal gå tomme, og ca. 400 kW og ca. 460 kW for at alle skal holde seg over 20 % SoC. I Konsept 3 er det bare én av bussene som kommer under 20 % SoC, men også denne ville vært mulig unngå ved en jevnere disponering av bussmateriellet.



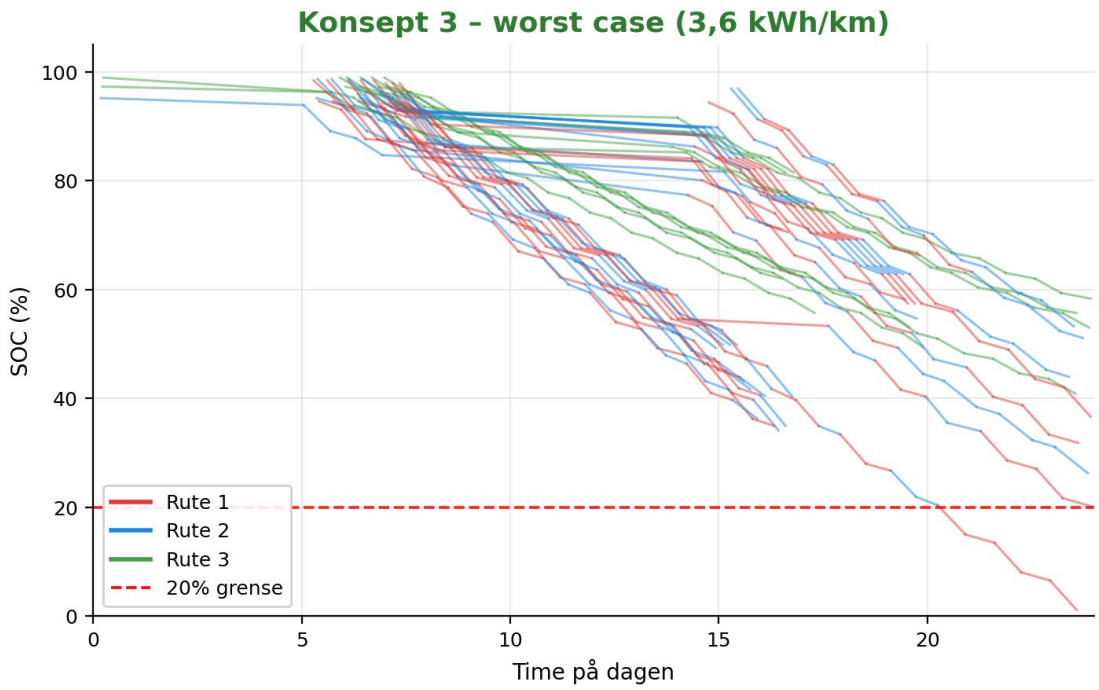
Figur 71 – SOC-simulering ved worst-case energiforbruk for Baseline (worst case, 3,6 kWh/km), 36 metrobusser på linje 1 og 2



Figur 72 – SoC-simulering ved worst-case energiforbruk for Konsept 1 (worst case, 3,6 kWh/km), 36 metrobusser på linje 1 og 2



Figur 73 – SoC-simulering ved worst-case energiforbruk for Konsept 2 (worst case, 3,6 kWh/km), 36 metrobusser på linje 1 og 2



Figur 74 – SoC-simulering ved worst-case energiforbruk for Konsept 3 (worst case, 3,6 kWh/km), alle 47 metrobusser

7. Læringspunkter

7.1. Prosjektgjennomføring

7.1.1.Prosjektorganisering

Prosjektet var eiet av Trfk med AtB engasjert som prosjektleder. Et viktig mål med denne organiseringen var å sikre at mest mulig av kunnskapsoppbygningen og erfaringen som ble opparbeidet i prosjektet ble værende hos de sannsynlige brukerne. Så langt som mulig ble det benyttet intern kompetanse i prosjektering og planlegging, spesielt var de veifaglige miljøene i Trfk sentrale. Ut ifra prosjektets formål og ansvarsfordelingen for kollektivtransport i Trøndelag, hvor Trfk bygger og eier infrastruktur mens AtB planlegger og anskaffer transporttjenester, fremstår dette som en naturlig organisering og den fungerte godt i prosjektet.

Prosjektet har i praksis vært gjennomført som tre delprosjekt satt sammen til ett prosjekt med falles gjennomgående prosjektledelse; først et anskaffelsesprosjekt, så et utbyggingsprosjekt og til slutt et driftsprosjekt. Dette er en modell som har hatt både fordeler og ulemper. På den utfordrende siden har bredden i prosjektet i kombinasjon med at det i liten grad har fantes tidligere erfaring å basere seg på gjort at det har vært krevende å holde én stø kurs. Mangel på tydelige skiller mellom prosjektfasene har gjort at ulike faser i prosjektet har glidd i hverandre. To eksempler på dette er hvordan usikkerhet om endelige tekniske løsninger som strakk seg helt inn i byggefasen og hvordan utfordringer med bussmateriell påvirket muligheter og løsning i driftsfasen. Ideelt sett ville det trolig vært hensiktsmessig med tydeligere skiller mellom prosjektfasene, hvor viktige premisser og parametere for neste fase ble låst slik at man slapp å ta med mye usikkerhet eller alternativer inn i neste prosjektfase.

Fordelene med organiseringen har vært at den har sikret kontinuiteten både i innsikt i prosjektet og relasjonene til eksterne involverte. Dette har vært viktig for å kunne håndtere et prosjekt hvor det har vært nødvendig å gjøre mange endringer underveis, og hvor gjennomføring har vært helt avhengig av tillit og en felles forståelse for de overordnede målene.

7.1.2.Tidsplan

Tidsplanen for prosjektet var gitt av at prosjektet måtte være ferdig konkludert senest Q2 2026 for å kunne bli hensyntatt i konkurransegrunnlaget for nye busskontrakter i Trondheim med oppstart 2029. Videre var det nødvendig å ha mulighet til å teste teknologien gjennom to vintre. Dette tilsa at infrastruktur og bussmateriell for trådløs lading måtte være på plass senest Q3 2024.

Tilbakemeldingene fra leverandørene i markedsdialogen i forkant av prosjektet var at en leveringstid på ett år fra kontraktsignering til start bygging var ambisiøst, men mulig. Den viktigste driveren for leveringstid var at infrastruktur for dynamisk trådløs lading ikke var er hyllevare og i noen grad måtte tilpasses hvert enkelt prosjekt. Dette gjorde at det var behov for tid til utvikling, engineering og testing før produksjonen kunne starte. Omfang og tidsbruk kan variere med hvor likt/ulikt prosjektet er tidligere prosjekter, men ønsker om å utfordre og drive teknologiutviklingen framover – som er typisk for pilotprosjekter inklusive dette – driver opp utviklingsbehov og tidsbruk.

På grunn av pilotprosjektets begrensede omfang var ikke produksjonstid i seg selv noen viktig driver for leveringstiden. Ved en framtidig større etablering bør det forventes at produksjonstid vil være viktigere for mulig framdrift.

Finansiering av prosjektet ble sikret med tilslag på støtte fra ENOVA i mars 2023. I praksis tilsa det at prosjektet hadde tre måneder – fram til sommeren 2023 – på å anskaffe teknologien. Det ble ikke vurdert å være mulig å avklare alle praktiske forhold rundt etableringen – som eksakt plassering av infrastrukturen, bussleverandør og -modell, nettilkobling mm. før konkurranseutlysningen, og en rekke sentrale avklaringer ble skjøvet over for avklaring i leveringstiden. Dette medførte betydelig risiko i prosjektet, hvor bl.a. planavklaringer, nettilgang og bussmateriell var uavklart på anskaffelsestidspunktet. Dette var håndterbart fordi prosjektet var av begrenset omfang og at det ikke var driftskritisk og dermed hadde stor fleksibilitet i hvor etableringen kunne skje. Ved en større etablering vil det være avgjørende å ha bedre tid til forarbeider slik at alle potensielt tidkrevende forhold av betydning for plasseringen av infrastrukturen, som planavklaringer og nettilgang, er avklart før anskaffelsen.

7.1.3.Anskaffelse

Som forklart i delkapittel 3.2.1 var anskaffelsen av den dynamiske trådløse ladeteknologien preget av en veldig stram tidsplan. Overholdelse av denne ble gjort mulig av at leverandørmarkedet er lite og oversiktlig, og at det allerede var gjennomført en åpen markedsdialog som gjorde at prosjektet hadde god oversikt.

Med få tilbydere og godt kjente forskjeller i løsningsvalg var det spesielt krevende å skrive en tilstrekkelig presis kravspesifikasjon som samtidig var nøytral og åpen nok til å sikre konkurranse. Fra kunnskapsnivået Trfk og AtB hadde ved oppstart av prosjektet var det helt avgjørende med bistand fra fagpersoner i SINTEF for å få på plass presise tekniske krav. Prosjektet hadde også stor nytte av innspill som kom fra leverandørene på et høringsutkast av kravspesifikasjonen.

Leverandørene hadde begrenset erfaring med offentlige anskaffelser i Norge fra tidligere, og det var derfor nødvendig å bruke tid og ressurser på å sikre at alle involverte hadde forstått hvilke rammer anskaffelsen foregikk innenfor.

Et poeng som har blitt fremhevet i ettertid av anskaffelsen var hvordan man best setter opp et priskriterium for evaluering av tilbud. Det er ulike måter dette kan gjøres på:

- Pris alene vil i utgangspunktet vær nøytralt og rettferdig, forutsatt at det er mulig å sammenligne «epler og epler». I praksis vil det kreve at de ulike leverandørene tilbyr (tilnærmet) samme ytelser og systemavgrensinger. Likhet i systemavgrensinger kan løses gjennom tydelig spesifisering av hva som skal inngå i prisingen, men krav om samme ytelser kan virke begrensende på konkurransen eller hemme videre teknologiutvikling.
- Pris per kW ladeeffekt kan være nøytralt og rettferdig forutsatt at behovet for tilført energi og plassering av infrastrukturen er avklart og at andre forhold ved ytelsen – som sikkerhet, muligheter for samtidighet mm. – er likt. Plassering og lengde anbefales som utgangspunkt å være avklart før en større anskaffelse av teknologien, men utfordringer kan oppstå der hvor andre forhold ved ytelsen – som begrensninger grunnet sikkerhet – gir begrensninger på mulig plassering eller utnyttelse.

- Pris per kWh levert til buss kan også være nøytralt og rettferdig, men vil i praksis enten kreve at veldig mange detaljer om plassering og driftsopplegg er avklart eller at alt dette spilles over til leverandør.

I pilotprosjektet var priskriteriet som ble evaluert pris alene uten at effekt eller energi ble regnet inn. Minimumskrav til øvrig ytelse ble sikret gjennom skal-krav til bl.a. minimumseffekt. Ulempen med denne løsningen var at den ikke gav noe incentiv til å overoppfylle minimumskravet til ladeeffekt. Alt annet likt vil en dobling av ladeeffekt gi en dobling av tilført energimengde til buss. Det vil enten kunne brukes til å bygge færre meter med dynamisk trådløs lading, eller til å redusere behovet for batterier i bussene eller annen ladeinfrastruktur. Pris per kW ladeeffekt vil fange opp effekten av at det evt. kan bygges færre meter med høyere effekt, mens pris per kWh levert også kan fange opp effekten av andre mulige innsparinger.

I pilotprosjektet hadde pris alene fordelene at det var enkelt og tydelig å formidle og evaluere. Ved en større etablering hvor også kostnadseffektivitet i driftsfasen er en del av målet og totaløkonomien bør det stilles opp evalueringskriterier som gir incentiver til å nå høyest mulig ladeeffekt og lavest mulig kWh pris innenfor eventuelle begrensninger gitt av sikkerhet og nett.

7.1.4.Prosjektering

Prosjekteringen av anlegget ble i all hovedsak gjennomført av veifaglige ressurser i Trfk med basert på innspill og tekniske krav fra teknologileverandør. Dette var en organisering som fungerte godt og som sikret at både tekniske krav og standarder til vei og krav teknologien stilte ble ivaretatt.

En av de viktigste positive erfaringene fra prosjekteringsfasen var effektiviteten i korte beslutningslinjer og tett samarbeid mellom de involverte aktørene. Prosjektet hadde et begrenset omfang, noe som gjorde det mulig å jobbe iterativt og løse utfordringer fortløpende. Samspillet mellom byggherre, leverandør og entreprenør fungerte godt, spesielt i avklaringer knyttet til tekniske grensesnitt mellom veg og ladeinfrastruktur.

Et sentralt læringspunkt fra prosjekteringsfasen er at pilotprosjekter og prosjekter som omhandler førstegangsetablering av ny teknologi stiller andre krav til informasjonsflyt og avklaringer enn ordinære veiprosjekter. I ordinære veiprosjekter er mange premisser normalt avklart gjennom håndbøker, standarder, normaler og etablerte prosjekteringsrutiner. I dette prosjektet var flere av premissene derimot under utvikling parallelt med prosjekteringen. Dette gjorde prosjekteringen mer iterativ og stilte større krav til løpende avklaringer mellom byggherre, teknologileverandør, entreprenør og rådgivere. I fremtidige prosjekter bør det etableres tydelige krav og rammer for informasjonsdeling tidlig i prosjektet, sikret av konfidensialitetsavtaler og rutiner for lagring og systematisk merking av sensitiv dokumentasjon. Av hensyn til tillit og forståelse bør avtaler inngås direkte med alle involverte parter, også involverte underleverandører og underentreprenører.

Et annet viktig forbedringspunkt er knyttet til standardisering og metodikk i prosjekteringen. Prosjektet var i stor grad preget av utvikling av løsninger underveis. Dette lå i prosjektets natur som pilotprosjekt, men det gav utfordringer med begrenset tilgang på etablerte standarder og normaler for denne typen teknologi. Dette gjaldt både dimensjonering, toleranser og krav til utførelse. For fremtidige prosjekter, spesielt i større skala, vil det være en fordel å utvikle mer standardiserte krav og maler. Der det er mulig bør dette være bransjestandarder som virker på tvers av teknologileverandører. Der hvor bransjestandarder ikke foreligger vil det være viktig at viktige parametere låses tidlig i prosjekteringsfasen for å redusere behovet for reprosjekteringer og risikoen for misforståelser.

7.1.5.Utbygging

Utbyggingen ble utført av Mesta som hovedentreprenør med underentreprenører der hvor Mesta så behov. Mesta ble kontrahert gjennom en eksisterende rammeavtale for drift- og vedlikehold av Trfks veiinfrastruktur. Denne løsningen ble gjort mulig av at kostnadene til utbyggingen var relativt moderate, og hadde fordelen at det ikke var nødvendig å lyse ut noen egen konkurranse om entreprenør, med alle utfordringene det ville omfattet av tidsbruk og skriving av tydelig kravspesifikasjon. Bruken av en eksisterende avtale gjorde også at prosjektet flyttet inn i et sett med ferdig regulerte priser på timer, maskiner mm.

På grunn av usikkerhet rundt kompleksiteten i det å bygge ut dynamisk trådløs lading ble utbyggingen gjennomført med enhetspriser. Dette var enkelt for alle involverte, og som første av sitt slag for entreprenøren og i Norge er det sannsynlig at det sparte prosjektet for store risikopåslag. Gitt prosjektets begrensede omfang og varighet ble det også vurdert å være begrenset risiko for at kostnadene skulle dra

helt i vei. Et viktig læringspunkt fra utbyggingen var at etablering av dynamisk trådløs lading ikke skiller seg vesentlig fra annen veibygging i kompleksitet eller risiko. De største usikkerhetene og komplikasjonene i utbyggingsfasen av prosjektet skyldtes unøyaktigheter og mangler i tegningsunderlag (før-situasjon) og svikt i kommunikasjonen fra prosjektledelse til utførende. Begge deler er godt kjente risikoer og utfordringer som ikke ble forårsaket eller vesentlig forverret av at dynamisk trådløs lading inngikk som en del av prosjektet. Ved en eventuell større etablering bør det være fullt mulig å gjennomføre utbyggingen som en utførelsesentreprise (NS 8405 eller 8406) eller totalentreprise (NS 8407).

En kilde til utfordringer i byggefasen var at dybden i organisasjonen – fra prosjektledelsen via Mestas prosjektleder og byggeleder til utførende – ble stor. I tilfeller hvor dynamisk trådløs lading stilte spesielle krav til for eksempel materialbruk eller utførelse hendte det at viktige detaljer ble borte på vei gjennom organisasjonen. De tydeligste eksemplene på dette var leveranse av betong med for stor fragmentstørrelse og asfaltlegger med for liten sporvidde. Både for å sikre framdrift og oppdage misforståelser var det avgjørende å ha en representant med nødvendige fullmakter som var godt satt inn i prosjektet på stedet. Igjen så var dette greit håndterbart med prosjektets begrensede omfang og kompleksitet, men det kunne fort vært vanskeligere å oppdage og fått større konsekvenser ved et større prosjekt.

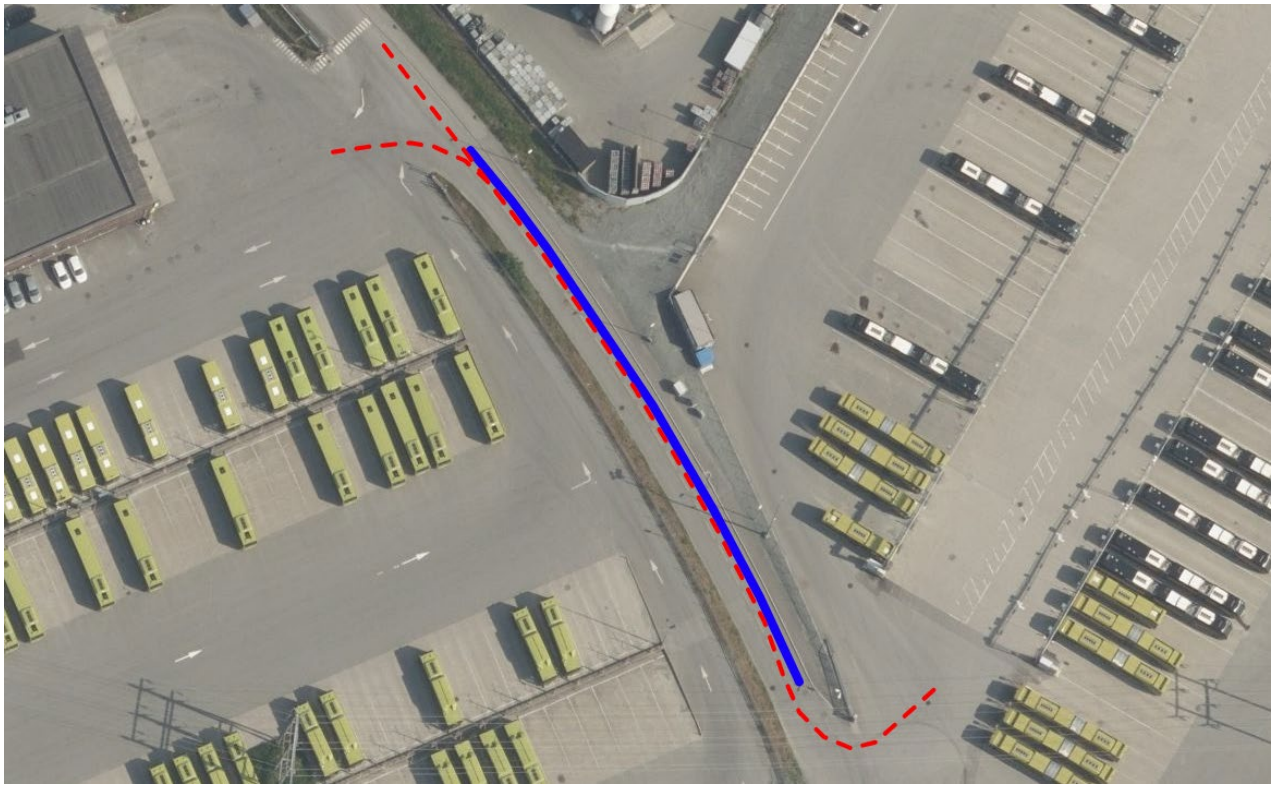
Ved en større etablering anbefales det å ta en detaljert gjennomgang av alle trinn av arbeidene med alle som skal være utførende på plass. Dette bør gjøres seint nok til at alt av detaljer og prosjekteringsgrunnlag er klart, men tidlig nok til at det fortsatt er mulig å gjøre justeringer basert på innspill fra de utførende. Det bør også vurderes å bruke BIM-baserte løsninger for prosjektering og produksjon av underlag. Dette vil kunne forenkle og tydeliggjøre informasjon og kommunikasjon.

Av mer praktisk art ser prosjektet at det er et potensiale for effektivisering i flere ledd av utbyggingen. Det aller viktigste ble testet i etableringen av den statiske ladeplassen med grunne ladesegmenter, hvor det ikke lenger var nødvendig å gå dypt ned i underbygningen til veien. Det reduserer både tidsbruk og risiko i forarbeidene. Under etablering vil det kunne være potensiale for å spare mye tid på å finne bedre løsninger for utplassering av ladesegmenter, tildekking/liming av ladesegmentene til under- og overliggende asfaltlag og utrulling av kabler fra ladesegmenter til MU. Alt dette var i dette prosjektet manuelle og tidkrevende prosesser med et stort og lavthengende potensiale for effektivisering. Gevinsten fra effektivisering vil øke med størrelsen til prosjektet.

7.1.6. Drift

Bussene som inngikk i pilotprosjektet ble kjørt av Vy; Først ved en liten gruppe sjåfører som kjørte dedikert vintertesting og så ved at bussene inngikk i rutetrafikk.

Før vintertestene i prosjektet ble det gjennomført grundig opplæring av sjåførene som skulle delta i testkjøringen. En halv dag ble satt av til innføring i prosjektet og teknologien og veiledet prøvekjøring. For fører bestod bruken av systemet av to handlinger – først aktiveres ladesystemet i bussen med å trykke inn en knapp og så kjøres bussen sentrert over ladesegmentene for å oppnå mest mulig effektiv lading. Tilbakemeldingene fra sjåførene var at systemet var enkelt og intuitivt i bruk, men at sentreringen over ladesegmentene på deler av strekningen var uvant. Dette skyldtes dels at svingbuene inn- og eventuelt også ut av ladestrekningen ble veldig krappe hvis bussen skulle holdes sentrert fra start til slutt, og dels at den aktuelle delen av Kvenildstrøa er en kort, smal og oversiktlig veistrekning hvor det i utgangspunktet ikke er naturlig å legge bussen helt mot høyre hvis det ikke er motgående trafikk (Figur 75). Dette ble forsterket av at det ikke var midtlinjemarkering i Kvenildstrøa før prosjektet, og at sjåførene derfor hadde som etablert vane å kjøre mer sentrert i veibanen. Under vintertestingen ble hvordan sjåførene plasserte bussen i veibanen fulgt opp og korrigert fortløpende, men ved en større etablering bør detteløses gjennom planlegging. For eksempel ved å bruke registreringer av hvordan bussene er plassert i veibanen under vanlig kjøring som grunnlag for plasseringen av ladesegmenter.



Figur 75 – Plassering av ladeinfrastrukturen i Kvenildstrøa (blå strek) og typisk sporing for buss ved vanlig kjøring på strekningen (rød stiplet strek).

Som en del av oppfølgingen av resultatene fra vintertestingen ble det utviklet et system for å hjelpe sjåførene med å plassere bussen rett i veibanen. Systemet leser av mottakernes plassering i det magnetiske feltet, og viser om bussen er for langt til venstre, til høyre eller godt sentrert grafisk i dashbordet (Figur 76). Systemet fungerer godt og har stor nøyaktighet så lenge bussen er innenfor det magnetiske feltet. På strekninger uten midtmarkering og på veier dekket av snø eller is vil det ha potensiale til å være et nyttig hjelpemiddel. Implementeringen i dashbordet er mer å anse som et proof of concept enn en funksjonell løsning for sjåførene. For at systemet skal bli et hjelpemiddel for sjåfør under kjøring bør visningen videreutvikles slik at sjåfør ikke trenger å se bort ifra veien for å ha nytte av systemet – for eksempel som en head-up display eller annen AR-løsning. Teknisk bør det være fullt gjennomførbart – lignende visninger finnes bl.a. i filassistent systemer i både busser og mindre kjøretøy – men visningen og nytten må også vurderes opp imot den totale informasjonsmengden fører mottar.



Figur 76 – Førerstøttesystem med indikator for bussens sideveisplassering ift. ladefeltet i bussens dashbord. I dette eksempelet er bussen plassert for langt til venstre i veibanen.

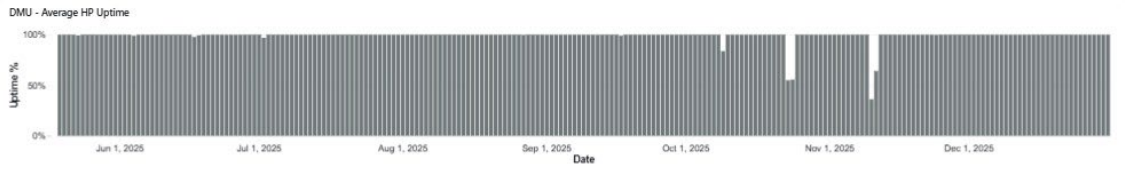
Basert på erfaringene fra opplæring av sjåførene som kjørte vintertestene ble opplæringen av sjåførene som skulle bruke bussene med teknologien i vanlig rutekjøring kraftig nedskalert og begrenset til en opplæringsfilm støttet av en skriftlig-visuell trinn-for-trinn guide i bussene. Prosjektet fikk ikke tilbakemeldinger på at det var utilstrekkelig. I perioden med rutekjøring ble ladeeffekt og bussens plassering ift. ladefeltet registrert for hver passering, men resultatene ble ikke brutt ned på sjåførnivå og det ble ikke gjort noen oppfølging for å korrigere hvordan sjåførene plasserte bussen i veibanen. Et resultat av dette var at en stor andel av passeringene foregikk med mindre gunstig plassering av bussen i veibanen. Som utdypet over er hovedgrunnen til det at veistrekningen hvor ladeinfrastrukturen var plassert blir opplevd som en internvei på bussdepotet hvor det sjelden er motgående trafikk og det derfor er naturlig å plassere bussen mer sentrert i veibanen enn på en vanlig vei. Ved framtidig bruk ser det ut som en god løsning å inkludere en kort opplæring i systemet som et punkt i annen opplæring som uansett gjennomføres – som i nye bussmodeller eller busslinjer.

Den tekniske stabiliteten til buss-siden av ladesystemet har vært svært god i driftsperioden. Det var noen mindre hendelser med bussene tidlig i rutekjøringen, men disse var trolig forårsaket av at bussene hadde lengre svingradius enn normale 12 meter busser og ellers ikke noen sammenheng med systemene som var installert i prosjektet. Mottakerne under bussen ble montert slik at de lå ca. 5 millimeter høyere enn bunnrammen til bussen (Figur 4). I oppstarten av prosjektet var det knyttet spenning til om dette ville være tilstrekkelig til å beskytte mottakerne mot å ta nedi fartshumper, stein og andre objekter i veibanen, isklumper etc. I rutekjøringen ble det ikke observert noen skader på mottakerne. Dette antas dels å skyldes god og hensynsfull kjøring av sjåførene, og dels at konstruksjonen med mottakere plassert nedsenket i brønn med noen millimeter beskyttelse rundt fungerte godt i bruk.

Siden teknologien var ny for bussprodusenten ønsket man en kontrollert og gradvis opptrapping av tillat SoC-intervall for trådløs lading. I starten av prosjektet tillot bussprodusenten kun trådløs lading opp til 90 % SoC. I prosjektet gav det noen praktiske problemer siden ladestrekningen var plassert i utkjøringen fra depotet. Etter noen måneder testing og validering med gode resultater ble det enighet om at grensen for mottak av trådløs lading kunne heves til 100 % SoC uten at det var noen risiko for at batteriet ville ta skade. Så fort dialogen om problemet kom ordentlig i gang gikk det raskt og greit å finne en løsning, men det ville spart prosjektet for tid og penger hvis også denne typen testing kunne vært gjennomført på fabrikk før bussene ble sendt til Norge.

7.2. Ladeteknologi

Driftsstabiliteten til ladeinfrastrukturen har vært svært god. I perioden med rutekjøring – fra 19. mai til 31. desember – har tilgjengeligheten vært over 99 %. Nedetiden i perioden har vært forårsaket av oppgraderinger og testaktiviteter, bl.a. installasjonen av infrastrukturen for statisk trådløs lading. Det har ikke vært noen indikasjoner på at værforhold påvirker driftsstabiliteten. Dette er et ventet resultat siden ladeinfrastrukturen ikke omfatter væreksponerte eller bevegelige deler. Den eneste vær-parameteren som fra teorien vil påvirke ladeinfrastrukturen er temperatur, men temperaturvinduet for normal drift er så vidt at for høye eller lave temperaturer ikke er noen relevant problemstilling i Trondheim. Det har heller ikke vært indikasjoner på at veibanen har blitt svekket eller utsatt for økt fysisk slitasje som følge av den trådløse ladeinstallasjonen. Siden utbyggingen har strekningen i Kvenildstrøa hatt mer enn 150 daglige passeringer av dobbelt-leddete metrobusser (24 meter, 25,5 tonn egenvekt) – samlet over 100 000 passeringer – uten at veibanen viser tegn på sporutvikling eller andre skader.



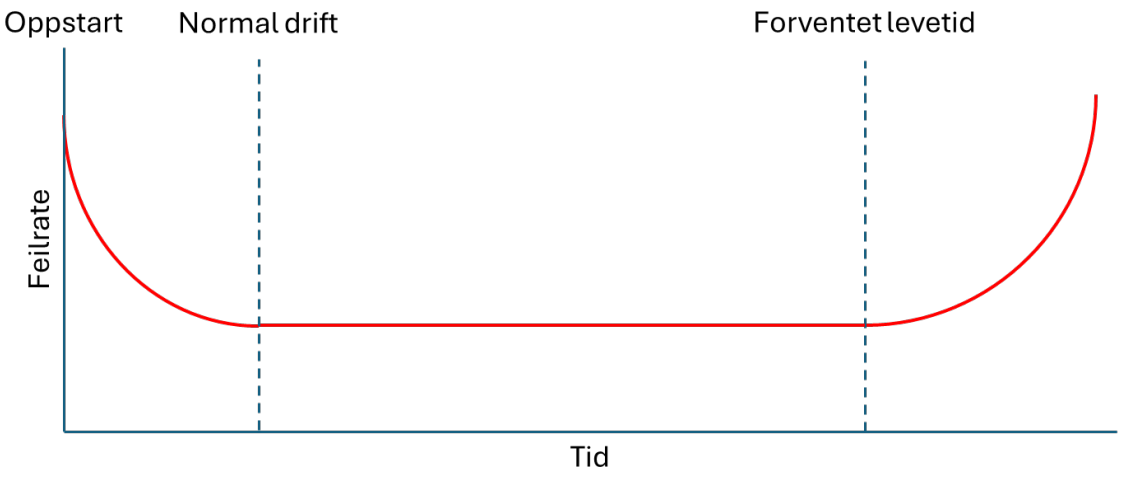
Figur 77 – Oppetid til ladeinfrastrukturen i perioden med rutekjøring fra 19. mai 2025 til 31. desember 2025

Den eneste ikke-planlagte nedetiden til ladeinfrastrukturen fra den var ferdig bygget i slutten av juni 2024 og ut 2025 har vært forårsaket av strømbrudd. Med prosjektets begrensede varighet har det ikke vært mulig å teste eller få erfaring med den langsiktige driftsstabiliteten.

Vi opplevde ikke problemer med bruk av ladeinfrastrukturen under vinterforhold. Fravær av væreksponerte deler i kombinasjon med at fører ikke trenger å gå ut av bussen for å aktivere eller koble til systemet vurderes som en av de store fordelene med teknologien. På dager hvor sein brøyting gjorde at det bygget seg opp mye snø og is i veibanen ble det registrert en reduksjon i ladeeffektiviteten, men som testingen med endret bakkeklaring viste ble størstedelen av reduksjonen forårsaket av at det ble krevende å plassere bussen riktig i veibanen når veimarkeringen forsvant og kjørespor og brøytekanter presset bussene mer sentrert i veibanen. Et førerstøttesystem som beskrevet i 7.1.6 og vist i Figur 76 kan trolig avhjelpe dette problemet noe, men det viktigste vil være å sikre godt vintervedlikehold av busstraseene.

Et annet forhold av interesse er levetiden til systemet. Det viktigste vil her være levetiden til ladesegmentene som ligger under asfalten. Disse vil det ikke være mulig å reparere, og å skifte ut enkeltsegmenter vil kreve mye jobb med fjerning av asfalt og stor risiko for å skade kablene til andre ladesegmenter. Siden ladesegmentene er koblet i parallell vil ikke feil i ett ladesegment påvirke andre ladesegmenter. For pilotstrekningen ville for eksempel feil på ett ladesegment bety at den mulige ladingen ble redusert med 1/52-del. For statiske installasjoner vil den relative betydningen av hvert ladesegment være større. Dette gjør at installasjoner under lokk med enkel tilgang for vedlikehold og utskiftning er godt egnet for statiske anvendelser. For installasjoner under asfalt vil det derfor være viktig med lang forventet levetid for å ha lavest mulig sannsynlighet for feil som forårsaker redusert lading eller dyr feilretting i bruk.

Fra teorien vil feilsannsynligheten til elektriske komponenter ha tre faser (Figur 78); En oppstartsfase med høy, men raskt synkende feilsannsynlighet forårsaket av feil eller unøyaktigheter i produksjonen. En normal driftsfase med tilfeldig fordelte feil. Og en sluttfase med raskt økende feilsannsynlighet når komponentene har nådd forventet levetid og trenger vedlikehold eller utskiftning. Siden elektriske komponenter ikke utsettes for mekanisk slitasje er det vanlig å anta at feilsannsynligheten i den normale driftsfasen er upåvirket av tid.



Figur 78 – Stilisert fremstilling av feilraten gjennom livsløpet til elektriske komponenter.

Når ladesegmentene ble testet under byggingen ble ett ladesegment forkastet og skiftet ut. Dette skyldtes ikke at ladesegmentet ikke fungerte, men det var usikkerhet ved om funksjonen var optimal. Ut over dette har det ikke vært feil på komponenter i løpet av prosjektperioden.

Et vanlig mål for ikke-reparerbare komponenters forventede levetid er mean time to failure (MTTF). MTTF vil normalt være et designkriterium til komponenter, men knyttet til et sett med driftsbetingelser. Når driftsbetingelsene – for eksempel belastning, ambienttemperatur eller luftfuktighet – endres kan også MTTF endres. Fra teknologileverandøren er det antydet at ladesegmentene skal ha en forventet levetid som minst tilsvarer vanlige intervaller mellom tungt vedlikehold av veier.

Ved å følge antakelsene over er det mulig å beregne forventet systemytelse etter et gitt antall år. Det eneste kjente om feilfrekvensen er at det etter oppstart ikke er observert feil i 52 ladesegmenter etter 1,5 års drift.

Feilraten for systemet blir da:

$$\lambda_{tot} < \frac{1}{1{,}5}$$

Dette gir et høyeste forventet antall feil etter t år:

$$N_{feil}(t) < \frac{1}{1{,}5} = 0{,}667t$$

Med 52 antatt identiske og uavhengige komponenter gir det en minste forventet ytelse på:

$$Y(t) > 1 - \frac{N_{feil(t)}}{52} = 1 - 0{,}01282t$$

Dette betyr at ytelsen til systemet i gjennomsnitt kan forventes å synke med mindre enn 1,28 % per år som følge av feil på ladesegmenter. Etter 15 års drift tilsvarer det en gjenværende systemytelse på minst 80,8 %, og etter 25 år på minst 68 %.

Merk at forutsetningene som ligger til grunn for beregningene er svært usikre. Hvis faktisk tid før første feil er 2,5 år vil for eksempel forventet gjenværende systemytelse etter 15 år være 92,3 %. Det er også mulig at antakelsen om at feilraten er flat i driftsfasen er for enkel. For eksempel kan det hende at sykling mellom aktive segmenter (varme) og inaktive segmenter (kjøling) gir en tids- eller bruksavhengig slitasje. Levetiden til kabler og koblinger er heller ikke tatt med i beregningen. Feil på en nedstøpt kabel eller kobling mellom et ladesegment og styringsenheten vil redusere systemytelsen på samme måte som feil i et ladesegment. I utgangspunktet er de forventede levetidene til kabler og koblinger minst like lange som til ladesegmentene, men dette har ikke vært mulig å teste i prosjektet.

Opprinnelig var det planen at prosjektet etter en innkjøringsfase skulle ta over fullt driftsansvar for infrastrukturen og de tekniske systemene. I løpet av prosjektet ble dette gått bort ifra med begrunnelse at det ville være for krevende både mht. kapasitet og kompetanse til å kunne forsvares innenfor et prosjekt som var begrenset både i omfang og varighet. Det ble også klart at trådløs lading – spesielt dynamisk – er svært avansert teknologi som det vil være krevende å finne kompetanse om utenfor

teknologileverandørene og enkelte forskningsmiljøer. Hvordan ansvaret for drift og vedlikehold best bør organiseres, derunder hva som kan løses lokalt, bør være et tema ved en eventuell større etablering.

7.3. Bussmateriell

Prosessen med å få tak i busser til bruk i prosjektet, inklusive de ulike alternativene det ble jobbet med underveis, er beskrevet i 3.2.2.

Basert på erfaringene fra prosjektet framstår det som at ettermontering av teknologien i busser som allerede er i drift er en lite hensiktsmessig løsning. Praktiske og organisatoriske hindre gjorde at prosjektet ikke fikk gått i dybden på tekniske muligheter, men også fra et driftsmessig perspektiv framstår det som klart at utbyttet av teknologien vil bli størst der hvor ladeteknologi og bussmateriell kan sees i sammenheng. Dette gjelder ikke minst hvis man ønsker å utnytte mulighetene trådløs lading gir for å redusere batteristørrelsen i busser. I framtiden kan det også være et alternativ at bussmateriell spesifiseres slik at det kan utnytte eksisterende trådløse ladeinstallasjoner.

I prosjektet løste busstilgangen seg fint med at det åpnet seg mulighet for å legge til trådløs lading i kravspesifikasjonen til to nye busser som ble bestilt som del av en endringsordre. Med hensyn til målet for prosjektet om å teste teknologien under mest mulig realistiske driftsbetingelser var dette en svært god og effektiv løsning. Et kompliserende element som fulgte av dette, var at det ikke er normalt å legge føringer på bussoperatørs valg av bussleverandør(er) ut over at bussmateriellet må oppfylle en overordnet kravspesifikasjon. Det begrensede bussantallet i prosjektet gjorde også at bussleverandørs tidligere erfaring med integrasjon av teknologien ikke var noe som ble vektlagt ved bussoperatørs valg av bussleverandør. Dette gjorde at bussleverandøren som ble valgt ikke hadde noe etablert samarbeid med teknologileverandøren i prosjektet, og heller ikke tidligere erfaring med integrasjon av teknologien i buss. Arbeidet med å få integrert teknologien og få testet og godkjent nødvendige endringer i bussene ble derfor omfattende og med uforutsigbar framdrift. Ut over at det ble nødvendig å øke busslengden fra 12 meter til 13 meter oppsto det ingen større problemer i arbeidet med integrasjon eller testing. Problemet med å få plass til tre mottakere under 12 meter buss har senere blitt løst i en leveranse til et annet prosjekt, så mye tyder på at dette handlet mer om tilgjengelig tid og ordrestørrelse enn fysiske begrensninger.

Hvis det er klart at trådløs ladeteknologi skal ligge til grunn for en større fremtidig anskaffelse vil det være naturlig at tidligere erfaring med teknologien enten inngår som et skal-krav i kravspesifikasjonen for bussmateriell eller som et evalueringskriterium. Ettersom flere lignende prosjekter gjennomføres, vil stadig flere bussprodusenter få erfaring med integrasjon av teknologien. I dialogmøter med bussoperatørene er det likevel en tydelig tilbakemelding at de ved siden av usikkerhet om økonomi anser busstilgang, derunder spørsmål om merkostnader og leveranseevne, som den viktigste terskelen for å gi tilbud basert på trådløs ladeteknologi.

Bussene som ble benyttet i prosjektet gjennomgikk alle nødvendige tester av strukturell integritet og sikkerhet på fabrikk. Ved fabrikken var det ikke tilgang til infrastruktur for dynamisk trådløs lading, så testing av teknologien i bruk måtte gjøres på plass i Norge. Etter at alle nødvendige tester av selve bussmateriellet var gjennomført ble utstyret for trådløs lading demontert før transport til Norge. Etter import ble utstyret igjen montert, og funksjonen til den trådløse ladingen testet. Prosjektet opplevde ingen store utfordringer med funksjonen, men det var behov for en god del mindre justeringer før funksjonen var optimal. I enkelte tilfeller, blant annet når det var behov for å gjøre endringer i styringsprogramvaren til batteriet, krevde dette samarbeid og tidvis også fysisk tilstedeværelse fra teknologileverandør, bussleverandør og batterileverandør. Arbeidet krevde derfor en god del tid og koordinering. Ved en større bussleveranse vil det være en stor fordel hvis også testing og optimalisering av den trådløse ladingen kan gjennomføres på fabrikk før transport.

Alle praktikaliteter og formalia ved transport, import og nødvendige godkjenninger ble håndtert av bussleverandør og bussoperatør med bistand fra teknologileverandør for produksjon av teknisk underlag. Det oppsto ingen uforutsette problemer under import eller ved godkjenning av bussmateriellet. Dette indikerer at hvis jobben med testing og dokumentasjon gjøres ordentlig og av kompetente aktører så innebærer ikke import og godkjenning av bussmateriell med mulighet for trådløs lading større risiko enn for annet bussmateriell.

8. Konklusjoner og anbefalinger

8.1. Overordnet vurdering av teknologien

Pilotprosjektet har demonstrert at trådløs lading av buss er teknisk mulig å etablere og drifte under norske forhold. Teknologien har fungert stabilt gjennom pilotperioden, med over 99 % oppetid, og erfaringene fra både testkjøring og ordinær rutekjøring indikerer at teknologien i svært liten grad påvirkes av vær, temperatur eller normale vinterforhold. Dette er et viktig funn, fordi funksjon under snø, is, kulde, fukt og salting var blant de viktigste usikkerhetene prosjektet skulle belyse.

Selv om krevende værforhold ikke ser ut til å ha merkbar negativ effekt, kan oppbygning av snø og is i veibanen redusere ladeeffekten noe ved å øke avstanden mellom kjøretøy og ladesegmenter og ved å gjøre det vanskeligere for sjåfør å plassere kjøretøyet riktig i veibanen. Dette peker på at godt vintervedlikehold av veiene og tydelig veimerking er viktig for å opprettholde optimal funksjon. Ved en etablering i større skala kan det også være mulig å etablere førerstøttesystemer som viser sjåfør plasseringen av ladesegmentene selv om ikke veimarkeringen er synlig. En prototype av et slik system, hvor magnetfeltet til ladesegmentene fortløpende leses av og brukes til å gi sjåføren informasjon om bussens plassering ble utviklet og demonstrert i prosjektet.

Sikkerheten vurderes som godt ivaretatt. Målinger og tester av elektromagnetiske felt og elektromagnetisk kompatibilitet har ikke avdekket forhold som tilsier at teknologien utgjør en HMS-risiko og ikke kan brukes i bymiljøer og til kollektivtransport. Håndtering av magnetiske fremmedobjekter i ladefeltet er likevel et område som krever særlig oppmerksomhet, spesielt ved statisk lading hvor ladesegmenter kan være aktive over lengre tid. Systemer for deteksjon av magnetiske objekter på ladeinfrastruktur-siden og for detektering av varme på buss-siden reduserer risikoen betydelig, men det vil være en liten restrisiko knyttet til magnetiske objekter med liten termisk masse, spesielt i kombinasjon med isolerende brennbare materialer. Hvilken risiko dette utgjør, og hva som kan være konsekvenser av uønskede hendelser bør inngå som en del av en ROS-analyse ved større etableringer. For dynamisk lading reduseres denne risikoen av at hvert segment normalt bare er aktivt i svært korte tidsrom, men også her bør det stilles tydelige krav til sikkerhetsfunksjoner og risikovurdering.

Pilotprosjektet har vist at utbygging av trådløs ladeinfrastruktur i vei ikke skiller seg vesentlig fra annen veibygging mht. risiko, utstyr eller kompetanse. Utfordringene som oppsto under utbygging i prosjektet var knyttet til feil eller mangler i teknisk dokumentasjon av eksisterende vei og annen infrastruktur og til koordinering og kommunikasjonsflyt gjennom prosjektorganisasjonen. Førstnevnte er generiske og kjente utfordringer som i varierende grad er til stede ved alle veiprosjekt, mens sistnevnte skal være mulig å redusere ved større bevissthet om viktigheten av tett koordinering og kommunikasjon.

I prosjektet ble det tydelig at aktivitetene som kreves for å etablere dynamisk trådløs lading i stor grad overlapper med aktiviteter som utføres ved tyngre veivedlikehold og veifornyelser. Der det er mulig, vil det være mye å spare – både i tid og kostnader – på å koordinere utbygging av dynamisk trådløs lading med andre veiprosjekter. For anvendelser innenfor kollektivtransport vil imidlertid dette øke kompleksiteten i prosjektgjennomføringen, viktigst ved å skape avhengigheter mellom tidslinjene for veiprosjekter og anskaffelse av kollektivkontrakter.

Utbygging av infrastruktur for statisk lading, for eksempel på busstopp eller reguleringsplasser, ble demonstrert å være realistisk gjennomførbart på én dag per ladeplass med god planlegging. Tidsbruk for etablering av nettilknytning kommer i tillegg. Dette gjør det mulig å etablere med minimale konsekvenser samtidig som kollektivtransporten er i drift. I pilotprosjektet var den maksimale varigheten ved statisk lading begrenset for å unngå overoppheting av ladesegmentene. Ved installasjon av permanent infrastruktur for statisk lading bør det legges opp til aktiv kjøling av ladesegmentene slik at tidsbegrensninger unngås. Dette er teknologi som finnes tilgjengelig på markedet.

Overordnet fremstår teknologien på buss-siden som teknisk gjennomførbar og godt integrerbar i ordinært bussmateriell. Erfaringene viser samtidig at integrasjonen krever tett samspill mellom bussleverandør, teknologileverandør, operatør og oppdragsgiver. I dette prosjektet, hvor bussantallet var lavt og både bussleverandør, operatør og oppdragsgiver var uten tidligere erfaring med integrasjon av teknologien ble prosessen opplevd som krevende, men det er all grunn til å tro at dette vil bedre seg med mer erfaring. Basert på erfaringene fra prosjektet fremstår det som en klar anbefaling at integrasjon gjennomføres på fabrikk som en integrert del av byggingen av bussmateriellet. Dette gir tilgang til kompetanse og mulighet for raske endringer og justeringer under bygging, samtidig som det garanterer for kvalitet i sluttproduktet.

I driftsfasen fungerte teknologien god og stabilt, med oppetider på nivå med eller høyere enn andre ladeteknologier. Det oppsto noen mindre skader på bussmateriellet i løpet av pilotprosjektet, men disse skyldtes typiske hendelser som mindre kollisjoner og var ikke forårsaket av den trådløse ladeteknologien. Det ble ikke registrert noen skader på mottakerplatene eller andre deler av den trådløse ladeteknologien i løpet av pilotprosjektet. Veibanen i den berørte strekningen i Kvenildstrøa viser ingen tegn på økt fysisk slitasje etter mer enn 100 000 passeringer av dobbelt-leddete metrobusser (24 meter, 25,5 tonn egenvekt).

8.2. Vurdering av oppnåelse av prosjektmål

Prosjektet har hatt som hovedmål å gjøre Trfk og AtB i stand til å vurdere om trådløs lading er et alternativ for storskala bruk i kollektivtransport i Trondheim fra 2029, og å spre kunnskap og interesse for teknologien blant bussoperatører, bussprodusenter, offentlige myndigheter og andre mulige brukere. I prosjektet er det etablert fysisk infrastruktur for både dynamisk og statisk trådløs lading, teknologien er testet i vinterforhold, sikkerhet er undersøkt, teknologien er integrert i busser, og løsningen er prøvd ut i ordinær rutetrafikk. Dette gir et vesentlig bedre beslutningsgrunnlag enn det som forelå før prosjektstart.

Resultatene tilsier at trådløs lading kan være et teknisk mulig alternativ for kollektivtransport i Trondheim, særlig dersom teknologien brukes målrettet på strekninger eller punkter der energibehovet er høyt, trafikkgrunnlaget er stort og infrastrukturen kan deles av flere busslinjer og andre kjøretøygrupper. Analysene av mulige bruksområder viser at dynamisk trådløs lading kan gi betydelige bidrag til energibehovet på de mest krevende metrobusslinjene. Statisk trådløs lading fremstår som enklere å etablere, men uten det samme potensialet for sambruk med andre kjøretøygrupper. Statisk trådløs lading har imidlertid noen store fordeler over andre aktuelle ladeteknologier i at til- og frakobling skjer svært raskt og uten at sjåfør trenger å forlate bussen og at det er mulig å etablere uten installasjoner over bakkeplan på eller i umiddelbar nærhet til vei eller fortau. Dette kan gjøre teknologien til et godt alternativ i trange miljøer, på steder som trafikkeres av flere typer kjøretøyer eller hvor tilgjengelig ladetid er begrenset.

Kunnskapsspredning har vært høyt prioritert i prosjektet. Prosjektet og teknologien er gjort kjent gjennom profilering på bussene som har vært brukt i prosjektet, et stort antall presentasjoner på konferanser og for interessenter i inn- og utland, studentoppgaver, kontakt med veieiere og andre sektormyndigheter, involvering av fagmiljøer og mediesaker på nett, papir, radio og TV.

Samtidig er det noen spørsmål prosjektet ikke fullt ut kan besvare. Pilotprosjektet har hatt kort og begrenset omfang, med kort ladestrekning og få kjøretøy. Det gir ikke et fullstendig grunnlag for å fastslå levetidskostnader, vedlikeholdsbehov over lang tid eller hvordan teknologien vil fungere som en stor, integrert del av et helhetlig kollektiv- eller mobilitetssystem.

På bakgrunn av dette vurderes prosjektets hovedmål som i stor grad oppnådd. Prosjektet har gitt et godt grunnlag for å vurdere teknologien som teknisk mulig og operasjonelt relevant, og det har bidratt til betydelig kunnskapsbygging og synliggjøring. De viktigste gjenværende usikkerhetene ligger ikke i om teknologien kan fungere, men i om den kan etableres, eies, driftes og finansieres på en kostnadseffektiv og konkurransenøytral måte i større skala. Videre arbeid bør derfor rettes mot økonomi, standardisering, driftsmodell, eierskap, bussintegrasjon i flåter av kjøretøy og dokumentasjon av langsiktig holdbarhet.

Tabell 16 – Oppsummering - vurdering av måloppnåelse for sentrale prosjektmål

Spørsmål	Vurdering av måloppnåelse
Teknisk funksjonalitet og stabilitet	Høy
Funksjon i kaldt og fuktig klima	Høy
Sikkerhet	Høy
Kunnskapsspredning	Høy
Praktisk bruk	Høy
Praktisk gjennomførbarhet	Middels – høy
Bussintegrasjon	Middels - høy

Standardisering og interoperabilitet	Middels
Modell for eierskap og drift	Middels
Økonomi ved storskala bruk	Middels - lav
Langsiktig holdbarhet	Middels - lav

8.2.1.Teknisk funksjonalitet og stabilitet

Måloppnåelsen vurderes som høy. Ladeinfrastrukturen har fungert stabilt gjennom pilotperioden, og tilgjengeligheten i perioden med rutekjøring har vært over 99 %. Det er ikke registrert tekniske feil som tilsier at selve ladeteknologien er uegnet for videre bruk. Prosjektet har også vist at både dynamisk og statisk trådløs lading kan etableres og brukes i praksis i realistiske miljøer. Enkelte justeringer og optimaliseringer har vært nødvendige, særlig i grensesnittet mellom buss, batteristyring og ladesystem, men dette vurderes som normale innkjøringsutfordringer for et pilotprosjekt med ny teknologi.

8.2.2.Funksjon i kaldt og fuktig klima

Måloppnåelsen vurderes som høy. Et sentralt spørsmål ved prosjektstart var om teknologien ville fungere under norske vinterforhold med kulde, snø, is, fukt og salting. Erfaringene tilsier at selve ladeinfrastrukturen i liten grad påvirkes av slike forhold, blant annet fordi det ikke finnes bevegelige eller værutsatte deler i veibanen. Prosjektet har likevel vist at vinterforhold indirekte kan påvirke ladeeffektiviteten. Oppbygging av snø og is i hjulsporene kan øke avstanden mellom ladesegmenter og mottakere, og snødekke kan gjøre det vanskeligere for sjåføren å plassere bussen riktig over ladefeltet. Dette svekker ikke vurderingen av teknologien som vinteregnet, men viser at godt vintervedlikehold, tydelig veimerking og eventuelt førerstøttesystemer er viktige for å oppnå optimal ytelse i drift.

8.2.3.Sikkerhet

Måloppnåelsen vurderes som høy. Målinger av elektromagnetiske felt og elektromagnetisk kompatibilitet har ikke avdekket forhold som tilsier at teknologien ikke kan brukes i kollektivtransport eller i bymiljø. Prosjektet har også gjennomført tester knyttet til fremmede objekter i ladefeltet. Disse viser at risikoen kan håndteres, men at området krever oppmerksomhet, særlig ved statisk lading hvor ladesegmenter kan være aktive over lengre tid.

8.2.4.Kunnskapsspredning

Måloppnåelsen vurderes som høy. Prosjektet har bidratt til betydelig synliggjøring av trådløs lading gjennom profilering av bussene, presentasjoner, møter med interessenter, medieomtale, studentoppgaver og dialog med fagmiljøer, veieiere, myndigheter og leverandører. Dette har vært viktig fordi teknologien fortsatt er lite kjent i norsk kollektivtransport. Prosjektet har dermed ikke bare bygget intern kunnskap hos Trfk og AtB, men også bidratt til å øke forståelsen for teknologien hos aktører som kan være relevante i fremtidige anskaffelser, utbygginger eller reguleringer.

8.2.5.Praktisk bruk

Måloppnåelsen vurderes som høy. Bussene har vært brukt i ordinær rutetrafikk, kjørt av vanlige sjåfører og inngått i operatørens daglige drift. Dette har gitt verdifull erfaring med hvordan teknologien fungerer utenfor kontrollerte testforhold. Tilbakemeldingene tyder på at systemet er enkelt å bruke for sjåfør, og at opplæring kan gjennomføres med begrenset omfang når løsningen er godt tilrettelagt. Prosjektet har samtidig vist at overtakelse av fullt driftsansvar for ladeinfrastrukturen krever kompetanse og kapasitet som ikke uten videre kan forutsettes hos lokale aktører. I pilotprosjektet ble driftsansvaret derfor liggende hos teknologileverandør. Dette viser at driftsmodell og kompetanseoverføring er temaer som må vurderes før en eventuell større utrulling.

8.2.6.Praktisk gjennomførbarhet

Måloppnåelsen vurderes som middels til høy. Prosjektet har vist at det er praktisk mulig å bygge trådløs ladeinfrastruktur i vei, og at selve byggearbeidene i stor grad ligner ordinær veibygging. Utfordringer som oppsto under bygging var i hovedsak knyttet til kjente forhold fra andre veiprosjekter, som usikkerhet om grunnforhold, mangelfull dokumentasjon av eksisterende infrastruktur og behov for god koordinering

mellom byggherre, entreprenør og teknologileverandør. Samtidig var pilotinstallasjonen etablert i et relativt enkelt miljø ved depot, med begrenset trafikk, få berørte aktører og stor fleksibilitet. Gjennomførbarheten i tette bymiljøer vurderes derfor som mer usikker, særlig der det er mange kabler og rør i grunnen, begrenset anleggsareal, høy trafikkbelastning og krevende krav til fremkommelighet under bygging. Erfaringer fra pilotprosjektet gir et godt utgangspunkt for å vurdere kompleksiteten og mulige utfordringer og risikoer ved større installasjoner.

8.2.7. Bussintegrasjon

Måloppnåelsen vurderes som middels til høy. Prosjektet har vist at integrasjon av mottakerplater, styringssystemer og kommunikasjon mot ladeinfrastruktur er teknisk mulig, og at busser med trådløs ladefunksjonalitet kan godkjennes og brukes i ordinær trafikk. Samtidig viste arbeidet at integrasjon i bussmateriell kan være krevende når bussleverandør og teknologileverandør ikke har etablert samarbeid eller tidligere erfaring med hverandre. På grunn av utfordringer med tilgang til bussmateriell har ikke pilotprosjektet gitt fullgod kunnskap om ettermontering i eksisterende bussmateriell. Måloppnåelsen vurderes derfor som god, men ikke fullstendig.

8.2.8. Standardisering og interoperabilitet

Måloppnåelsen vurderes som middels. Prosjektet har gitt økt innsikt i hvilke tekniske grensesnitt som er viktige for trådløs lading, og har gitt Trfk og AtB et bedre grunnlag for å delta i videre dialog om krav, standarder og regulering, og har gitt mulighet til å fremme våre krav og behov inn i pågående prosesser. Samtidig er standardisering for dynamisk trådløs lading av tunge kjøretøy fortsatt noe umoden. Det gjenstår arbeid før det kan legges til grunn at kjøretøy fra ulike bussleverandører kan bruke ladeinfrastruktur fra ulike teknologileverandører uten leverandørspesifikke tilpasninger. Manglende interoperabilitet kan gi risiko for teknologisk innlåsing, svakere konkurranse og høyere kostnader ved senere utvidelser eller leverandørbytte.

8.2.9. Modell for eierskap og drift

Måloppnåelsen vurderes som middels. Prosjektet har identifisert flere sentrale spørsmål knyttet til eierskap, drift, vedlikehold, ansvar, finansiering, sikkerhet, tilgjengelighet og dataflyt. Det er særlig viktig at ladeinfrastruktur i vei kan ha lengre levetid enn én busskontrakt, og at infrastrukturen potensielt kan brukes av flere operatører eller kjøretøygrupper. Dette taler for at offentlig eierskap, koordinering eller finansiering kan være relevant. Samtidig har prosjektet ikke etablert eller testet en varig drifts- og forretningsmodell. I pilotperioden har mye av den tekniske oppfølgingen ligget hos teknologileverandør, og det er fortsatt uklart hva som bør håndteres lokalt, hva som bør ligge hos leverandør, og hvordan ansvar kan og bør fordeles mellom veieier, kollektivmyndighet, operatør, teknologileverandør og eventuelle andre aktører. Området krever derfor videre avklaring.

8.2.10. Økonomi ved storskala bruk

Måloppnåelsen vurderes som middels til lav. Prosjektet har gitt bedre oversikt over kostnadsposter, kostnadsdrivere og mulige effektiviseringsgevinster ved etablering av både dynamisk og statisk trådløs lading. Analysene viser at teknologien kan være mest interessant der infrastrukturen får høy brukstid, der den kan deles av flere linjer eller kjøretøygrupper, eller der den reduserer behov for busser, batterikapasitet eller arealkrevende ladeinfrastruktur. Samtidig er kostnadsgrunnlaget fortsatt usikkert. Pilotprosjektet har hatt lite omfang, få kjøretøy og kort ladestrekning, og gir derfor ikke et sikkert grunnlag for å fastslå investeringskostnader, driftskostnader eller samlet lønnsomhet ved fullskala bruk. Leverandørmarkedet er også lite, og kostnadsutviklingen vil avhenge av standardisering, volum, konkurranse og internasjonal etterspørsel.

8.2.11. Langsiktig holdbarhet

Måloppnåelsen vurderes som middels til lav. Det er ikke registrert feil eller skader som gir grunn til å stille spørsmål ved teknologiens holdbarhet i pilotperioden. Ladesegmentene har fungert stabilt, og det er ikke observert skader på mottakerplatene under bussene i ordinær rutekjøring. Det er heller ikke registrert tegn til skader eller økt slitasje i veibanen etter at ladeinfrastrukturen ble etablert. Samtidig har prosjektet hatt begrenset varighet sammenlignet med forventet levetid for ladeinfrastruktur i vei. Prosjektet kan derfor ikke gi sikre svar på levetid, feilrate over tid, vedlikeholdsbehov, påvirkning fra tung trafikk, spordannelse, asfaltvedlikehold eller utskifting av enkeltkomponenter. Prosjektet gir positive indikasjoner, men ikke tilstrekkelig grunnlag for sikker vurdering av langsiktig holdbarhet.

8.3. Muligheter, usikkerheter og risikoer

8.3.1. Muligheter

Trådløs lading kan på sikt åpne for nye måter å utforme energiforsyningen i mobilitetssystemet på. I stedet for at lading må skje ved egne ladepunkter med dedikert areal, kan energitilførselen i større grad bygges inn i den infrastrukturen kjøretøyene allerede bruker. Dette kan være særlig relevant i et framtidig transportsystem med høyere grad av automatisering, der kjøretøy kan planlegge, posisjonere seg og lade uten manuell håndtering av kabler, pantografer eller annet fysisk ladeutstyr. Fordi trådløse ladeteknologier er modulære, kan de i prinsippet tilpasses mange ulike kjøretøytyper. Samme ladeinfrastruktur kan dermed betjene flere segmenter, for eksempel busser, minibusser, varetransport, renovasjonskjøretøy, taxi eller andre flåter med forutsigbare kjøremønstre. Slik flerbruk kan øke brukstiden, forbedre kostnadseffektiviteten og redusere behovet for parallelle ladesystemer for ulike aktører.

Teknologien kan også gi bedre utnyttelse av knappe byarealer. Lading kan skje mens kjøretøy står på holdeplass, venter ved reguleringspunkt, passerer gjennom prioriterte korridorer eller bruker arealer som uansett inngår i transportnettet. Dette kan redusere behovet for store depotarealer, synlig ladeutstyr og arealkrevende snuplasser med høyeffektladere. Samtidig kan en mer integrert og jevnt fordelt energitilførsel gi større fleksibilitet i ruteplanleggingen og gjøre det mulig å dimensjonere kjøretøyene mer etter faktisk transportbehov enn etter maksimal rekkevidde mellom depotladinger. Trådløs lading kan slik bli en mulig byggestein i et mer automatisert, arealeffektivt og delt nullutslippssystem for urban mobilitet.

En viktig mulig gevinst er at bussene ikke nødvendigvis må utstyres med batterier som dekker hele energibehovet gjennom en lang driftsdag basert på depotlading alene. Dersom energi kan tilføres underveis i rute, enten gjennom dynamisk lading på utvalgte strekninger eller gjennom effektiv statisk lading på holdeplasser, terminaler og reguleringspunkter, kan batteripakkene i større grad dimensjoneres etter energibehovet mellom ladepunktene. Det kan gjøre det mulig å bruke mindre og lettere batterier. Lavere batterivekt gir lavere totalvekt og lavere aksellast, noe som kan være viktig i et bussnett der enkelte traseer går på veier med lavere bruksklasse. Redusert aksellast kan både gjøre det enklere å benytte elektriske busser på veier som ellers ville vært krevende for tunge batteribusser, og bidra til mindre slitasje på veier med høy busstrafikk. Over tid kan dette gi lavere behov for dekkevedlikehold, mindre spordannelse og lavere livsløpskostnader for veiinfrastrukturen, særlig på strekninger der mange tunge busser passerer daglig.

Mindre batterier vil også redusere materialbruken i bussene. Batteriproduksjon er blant de mest ressurs- og utslippsintensive delene av produksjonen av elektriske kjøretøy, med behov for materialer som litium, nikkel, mangan, kobolt, grafitt, aluminium og kobber, avhengig av batterikjemi. For elbusser kan batteripakken utgjøre en betydelig andel av klimagassutslippene fra selve kjøretøyproduksjonen. Som et illustrerende eksempel vil en 12-meters elbuss med en batteripakke på rundt 350 kWh, og et utslippsestimat for batteriproduksjon på 60–100 kg CO_2e per kWh batterikapasitet, ha et batterirelatert produksjonsutslipp på om lag 21–35 tonn CO_2e. Dersom samlede produksjonsutslipp for bussen antas å ligge i størrelsesorden 60–90 tonn CO_2e, kan batteriet alene stå for omtrent en tredel til nær halvparten av produksjonsutslippene. Tallene vil variere med batterikjemi, produksjonsland, energimiks i batteriproduksjonen og hvilke utslippsposter som inkluderes, men eksempelet viser at redusert batteristørrelse kan gi en reell klimaeffekt allerede før bussen tas i bruk.

Dynamisk trådløs lading kan i tillegg gi fordeler for kraftsystemet ved at energitilførselen fordeles over større deler av driftsdøgnet, i stedet for å konsentreres i korte perioder med høyt effektuttak. Ved tradisjonell depotlading fylles mye av energibehovet normalt opp i løpet av natten. Dette kan være gunstig dersom det finnes ledig nettkapasitet, men i store flåter kan det samtidig gi høye samtidige effekttopper når mange busser lades innenfor samme tidsvindu. Hurtiglading med høy effekt på dagtid kan redusere behovet for store batterier og lang nattlading, men flytter belastningen til konsentrerte ladepunkter med svært høyt effektuttak i korte perioder. Slike løsninger kan utløse behov for kraftig lokal nettilknytning, høyere anleggsbidrag, større effektledd og eventuelt behov for stasjonære batterier eller andre tiltak for effektdemping.

Dynamisk trådløs lading gir en annen lastprofil. Når ladingen skjer mens bussene uansett er i bevegelse gjennom utvalgte korridorer, fordeles energitilførselen på mange passeringer, flere kjøretøy og normalt mange timer gjennom dagen. På systemnivå kan dette gi lavere maksimal samtidig effekt enn løsninger der mange busser hurtiglades på samme sted, og det kan redusere behovet for å dimensjonere depottilknytningen for hele flåtens energibehov. Dynamisk lading kan også kombineres med styring mot

nettbelastning, slik at effekt reduseres i perioder med høy belastning og økes når kapasiteten er bedre. Teknologien kan dermed bidra til å flate ut ladebehovet over døgnet, redusere lokale effekttopper og gjøre elektrifisering av krevende busslinjer mindre avhengig av store enkeltpunkter for lading.

8.3.2. Usikkerheter og risikoer

Erfaringene fra pilotprosjektet viser at trådløs lading av buss er teknisk mulig, at teknologien kan fungere stabilt under norske forhold, og at både sikkerhet, praktisk bruk og integrasjon i bussmateriell i hovedsak lar seg håndtere. Samtidig viser gjennomgangen i delkapittel 8.1 og vurderingen av måloppnåelse i delkapittel 8.2 at de viktigste gjenværende spørsmålene ikke først og fremst handler om hvorvidt teknologien virker, men om den kan etableres, eies, driftes og finansieres på en robust og kostnadseffektiv måte i større skala. Risikoene knytter seg derfor særlig til marked, standardisering, tilgang til bussmateriell, eierskap og faktisk nytteverdi ved fullskala bruk.

Den mest grunnleggende markedsrisikoen er at leverandørmarkedet for trådløs lading til tunge kjøretøy fortsatt er lite og umodent. Pilotprosjektet har vist at det finnes leverandører med teknologi som fungerer i praksis, men antallet aktuelle aktører er begrenset, særlig for dynamisk trådløs lading. Dette kan gi svak konkurranse, usikre kostnadsnivåer og økt risiko for leverandøravhengighet. Risikoen blir særlig viktig dersom ladeinfrastrukturen skal inngå som en kritisk del av kollektivtransporten, fordi feil, forsinkelser, manglende videreutvikling eller sviktende leveranseevne hos én leverandør da kan få direkte betydning for driftssikkerhet, kostnader og handlefrihet i senere anskaffelser. Det er derfor viktig at eventuell videre bruk av teknologien innrettes slik at konkurranse, leverandørmangfold og mulighet for framtidig utskifting ivaretas best mulig.

Tilgang til bussmateriell. Prosjektet viser at mottakerplater, styringssystemer og kommunikasjon mot ladeinfrastruktur kan integreres i bussmateriell, og at busser med slik funksjonalitet kan testes, godkjennes og brukes i ordinær rutetrafikk. Samtidig viste prosjektet at integrasjonen kan bli krevende når bussleverandør, batterileverandør og teknologileverandør ikke har etablert samarbeid eller tidligere erfaring sammen. Arbeidet kan da kreve ekstra engineering, testing, programvaretilpasninger og koordinering på tvers av flere aktører. Ved større anskaffelser bør trådløs ladefunksjonalitet derfor tas inn tidlig i kravspesifikasjonene for bussmateriell, og det bør vurderes krav eller evalueringskriterier knyttet til dokumentert erfaring med integrasjon, testing og godkjenning. Det bør også tilstrebes at mest mulig av testingen og optimaliseringen skjer på fabrikk før bussene leveres, slik at risikoen for forsinkelser og kostbare tilpasninger i driftsfase reduseres.

Standardisering og interoperabilitet er tett knyttet til både markedsrisiko og bussintegrasjon. For at trådløs lading skal kunne bli en robust del av et kollektivsystem, må det på sikt være mulig å bruke kjøretøy og ladeinfrastruktur fra ulike leverandører uten omfattende leverandørspesifikke tilpasninger. Dersom standardene ikke er tilstrekkelig modne, kan infrastrukturen føre til teknologisk innlåsing, svakere konkurranse og høye byttekostnader. Dette gjelder ikke bare de fysiske grensesnittene mellom vei og kjøretøy, men også kommunikasjon, sikkerhetsfunksjoner, feilhåndtering, datautveksling, betalings- og avregningsmodeller og krav til dokumentasjon. Pilotprosjektet har gitt et bedre grunnlag for å forstå disse grensesnittene, men har ikke avklart dem fullt ut.

Langsiktig holdbarhet og vedlikeholdsbehov er fortsatt ikke tilstrekkelig dokumentert. Pilotprosjektet har gitt positive indikasjoner: ladesegmentene har fungert stabilt, tilgjengeligheten har vært høy, og det er ikke registrert skader på mottakerplatene under bussene i ordinær rutekjøring. Likevel har prosjektperioden vært kort sammenlignet med forventet levetid for ladeinfrastruktur i vei. Det er derfor fortsatt usikkerhet knyttet til feilrate over tid, påvirkning fra tung trafikk, spordannelse, asfaltvedlikehold, eventuell vanninntrenging mm. Ved større etableringer bør levetid, garantiansvar, vedlikeholdsstrategi og konsekvenser av delvis funksjonsbortfall derfor vurderes grundig før beslutning.

Den siste hovedusikkerheten gjelder faktisk nytte og lønnsomhet. Per i dag vil trådløs lading ha størst verdi der den bidrar til å løse problemer som ikke kan håndteres like godt eller rimelig med konvensjonelle ladeløsninger. Det kan være der teknologien reduserer behovet for ekstra busser, gjør det mulig å bruke mindre batterier, sikrer elektrisk drift på særlig energikrevende linjer, reduserer behovet for arealkrevende ladeinfrastruktur, demper lokale effekttopper i strømnettet eller gir høy brukstid gjennom sambruk med flere linjer eller kjøretøygrupper. Dersom slike gevinster ikke realiseres, kan infrastrukturen bli kostbar sammenlignet med depotlading, pantograflading eller andre former for høyeffektlading. Lønnsomheten vil derfor avhenge sterkt av riktig plassering, høy utnyttelse, samordning med ruteplan og nettforhold, og av at investeringene kan sees i sammenheng med andre gevinster enn bare levert energi.

8.3.3. Kostnader og lønnsomhet

Kostnadene for trådløs ladeteknologi kan forventes å falle dersom teknologien beveger seg fra enkeltstående pilotprosjekter til mer standardisert og seriepreget implementering. Dagens kostnadsnivå preges av lave volumer, prosjektspesifikke løsninger, betydelige utviklings- og engineeringkostnader, spesialtilpasning av både infrastruktur og kjøretøy, samt behov for tett leverandøroppfølging i prosjektering, bygging og drift. I en tidlig fase vil derfor en stor del av kostnadene ikke være knyttet til selve material- og produksjonskostnaden, men til utvikling, testing, godkjenning, prosjekttilpasning og risikohåndtering. Ved økende volum kan disse kostnadene fordeles på flere prosjekter og komponenter, samtidig som produksjonen av ladesegmenter, kraftelektronikk, mottakere til kjøretøy og styringssystemer kan industrialiseres. Dette er et mønster man kjenner fra andre grønne teknologier, som solceller, batterier, elbusser, ladeinfrastruktur og vindkraft, der kostnadene i starten var høye og sterkt preget av pilotering, men falt betydelig etter hvert som volumene økte, leverandørkjeder ble profesjonalisert, standarder kom på plass og installasjonsmetodene ble mer rutinepregede.

Samtidig er utsiktene til kostnadsreduksjoner mer usikre enn for teknologier som retter seg mot store globale forbrukermarkeder eller brede industrimarkeder. Trådløs lading for tunge kjøretøy, og særlig dynamisk trådløs lading, vil i overskuelig framtid først og fremst være rettet mot profesjonelle aktører med store og forutsigbare transportbehov. Det kan for eksempel være kollektivmyndigheter, bussoperatører, havner, terminaler, logistikkaktører, renovasjonsselskaper, industriparker eller veieiere med ansvar for tungtransportkorridorer. Dette betyr at markedet trolig ikke vil bestå av et stort antall små og standardiserte enkeltkjøp, men heller av relativt få, store og komplekse prosjekter med behov for lokal tilpasning. For dynamisk trådløs lading vil dette være særlig tydelig, fordi teknologien normalt krever inngrep i vei, koordinering med veieier og nettselskap, integrasjon mot kjøretøyflåter og forutsigbar bruk over lang tid for å bli lønnsom.

Hvor raskt kostnadene kan falle vil derfor henge tett sammen med hvordan trådløs lading klarer seg i konkurransen med andre ladeteknologier. Depotlading, pantograflading, kabelbasert hurtiglading, større batterier og kombinasjoner av disse vil utvikle seg parallelt. Dersom disse alternativene blir stadig billigere, mer effektive og enklere å etablere, kan markedet for trådløs lading bli begrenset til nisjer der teknologien har særlige fordeler. Som utdypet i delkapittel 8.3.1 kan dette være der arealtilgang er knapp, fysisk tilkobling er upraktisk, høy automatiseringsgrad er viktig, mange kjøretøy passerer samme korridor, lading må skje uten å påvirke ruteplanen, eller dynamisk energitilførsel kan redusere behovet for store batterier og ekstra kjøretøy. Hvis trådløs lading viser seg å gi lavere samlet systemkostnad i flere slike anvendelser, kan teknologien få større gjennomslag og et bedre grunnlag for industrialisering, standardisering og kostnadsfall.

Dette gjør markedsutviklingen usikker. Kostnadsreduksjoner kan ikke vurderes isolert ut fra teknisk læring eller produksjonsvolum alene, men må sees i sammenheng med om teknologien vinner tilstrekkelig mange reelle konkurranser mot alternative ladeløsninger. Dersom få aktører velger trådløs lading, vil volumene forbli små, leverandørmarkedet smalt og kostnadene høye. Dersom flere større prosjekter gjennomføres internasjonalt, kan det derimot gi leverandørene grunnlag for mer standardiserte produkter, bedre installasjonsmetoder, sterkere leverandørkjeder og lavere enhetskostnader. Utviklingen kan derfor bli selvforsterkende i begge retninger: begrenset etterspørsel kan holde kostnadene oppe, mens noen få store og vellykkede prosjekter kan bidra til å redusere risiko, øke konkurransen og gjøre teknologien mer attraktiv for nye brukere.

8.3.4. Modell for utbygging, eierskap og drift

Et eventuelt større el-vei-prosjekt der trådløs ladeinfrastruktur inngår som en nødvendig del av et ordinært kollektivtilbud, reiser andre problemstillinger enn et avgrenset pilotprosjekt. I en pilot kan teknologien testes innenfor en begrenset ramme, med høyere aksept for midlertidige løsninger, særskilt oppfølging og uavklarte grensesnitt. I ordinær drift vil infrastrukturen derimot få direkte betydning for regularitet, beredskap, kostnader, kontraktsoppfølging og ansvarsdeling mellom transportmyndighet, operatør, veieier, teknologileverandør og eventuell driftsleverandør.

Sentrale spørsmål er hvem som skal eie infrastrukturen, hvem som skal ha ansvar for drift og vedlikehold, hvordan feil og avvik skal håndteres, hvem som skal ha tilgang til data, og hvordan risiko skal fordeles mellom partene. Det må også vurderes hvordan infrastrukturen skal forvaltes over tid, ettersom levetiden for tiltak i vei kan være lengre enn én busskontrakt og fordi løsningen potensielt kan få betydning for flere brukere enn kollektivoperatøren alene.

En viktig problemstilling er risikoen for leverandørlåsing og monopolisering. Dersom ladeinfrastrukturen, styringssystemene, dataformatene, reservedelene eller kjøretøyintegrasjonen blir leverandørspesifikke, kan det offentlige få begrenset handlefrihet ved senere utvidelser, oppgraderinger eller bytte av leverandør. Denne risikoen er særlig relevant i et marked med begrenset modenhet med få aktuelle leverandører og rask teknologiutvikling. Samtidig må organiseringen gi tilstrekkelig tydelig ansvar for oppetid, feilretting og sikker drift, slik at ansvaret ikke fragmenteres mellom mange aktører.

En annen problemstilling er hvordan infrastrukturen kan bidra til å utvikle etterspørsel og marked over tid. Trådløs ladeinfrastruktur har et «høna eller egget»-preg: det er krevende å etablere infrastruktur uten brukere, men også krevende å rekruttere brukere før infrastrukturen finnes. Kollektivtransporten kan fungere som en ankerkunde som gir grunnlag for investering, men dersom infrastrukturen planlegges for sambruk, kan den på sikt også være relevant for andre kjøretøygrupper, for eksempel renovasjon, taxi, varetransport eller annen tungtransport. Organiseringsmodellen bør derfor ikke bare støtte dagens kollektivbehov, men også gi mulighet for proaktiv utvikling av etterspørsel, standardisering og konkurranse. Valg av organiseringsmodell bør derfor være et sentralt tema i forarbeidene til et eventuelt større prosjekt. Forarbeidene bør blant annet avklare hvilke roller offentlige aktører skal ha, hvilke deler av infrastrukturen som bør eies eller kontrolleres offentlig, og hvilke krav som må stilles for å sikre konkurranse, interoperabilitet og handlingsrom for videre utvikling.

Én mulig løsning er å organisere prosjektet som en helhetlig funksjonsleveranse. Det innebærer at én kontraktspart får ansvar for prosjektering, bygging, teknologi, drift og vedlikehold av ladeinfrastrukturen over en definert periode. Fordelen med en slik modell er at den kan gi klare grensesnitt og tydelig ansvar for tilgjengelighet, feilretting og samlet ytelse. Dette kan være særlig attraktivt i en tidlig fase, fordi oppdragsgiver slipper å koordinere mange tekniske avhengigheter mellom vei, installasjon, strømforsyning, kjøretøy, styringssystemer og operativ drift. Modellen kan også gi leverandøren insentiv til å optimalisere løsningen som helhet. Ulempen er at en helhetlig funksjonsleveranse kan forsterke risikoen for leverandørlåsing. Dersom én leverandør kontrollerer teknologi, drift, data og videreutvikling, kan infrastrukturen i praksis utvikle seg til et lokalt monopol. Dette kan svekke konkurransen i senere faser og gjøre det krevende å skifte leverandør eller åpne infrastrukturen for andre brukere. En slik modell bør derfor bare vurderes dersom det stilles tydelige krav til åpne grensesnitt, datatilgang, dokumentasjon, interoperabilitet, rettigheter ved kontraktslutt og mulighet for tredjeparts drift eller videreutvikling.

En alternativ løsning er en delt modell der veieier beholder ansvar for tiltak i og på vei, mens en teknologileverandør eller egen driftsleverandør får ansvar for ladesystemet som teknisk installasjon. Denne modellen gir bedre samsvar med ordinær forvaltning av offentlig vei og kan styrke offentlig kontroll over forhold som trafikksikkerhet, vinterdrift, vedlikehold, graving, levetid og koordinering med andre veiprosjekter. Den kan også gjøre det lettere å skille mellom langsiktig infrastrukturforvaltning og mer teknologispesifikke tjenester som kan konkurranseutsettes på nytt. Samtidig gjør en delt modell grensesnittene mer krevende. Feil kan oppstå i samspillet mellom vei, strømforsyning, ladeinstallasjon, kommunikasjon, kjøretøy og operativ drift. Det må derfor være svært tydelig hvem som har ansvar for feilretting, beredskap, tilgjengelighet, HMS, garanti og kostnader ved avvik. Modellen krever høyere bestillerkompetanse og mer aktiv koordinering fra offentlig side, men kan gi bedre langsiktig handlingsrom dersom det er ønskelig å beholde muligheten til å bytte teknologi- eller driftsleverandør over tid.

En tredje løsning er en mer offentlig styrt modell, der offentlige aktører tar en aktiv rolle som eier, koordinator eller tilrettelegger for felles infrastruktur. Dette gir størst mulighet til å drive proaktiv utvikling av etterspørsel, leverandørmarked og standardisering. Det offentlige kan bruke kollektivtransporten som ankerkunde, samtidig som infrastrukturen planlegges for sambruk og framtidig utvidelse. Modellen kan også motvirke at én leverandør eller én operatør får kontroll over kritisk infrastruktur, og gjøre det enklere å se investeringene i sammenheng med byutvikling, arealknapphet, energisystem, nullvekstmål og øvrig transportpolitikk. Ulempen er at en offentlig styrt modell krever mer kapasitet, kompetanse og risikovilje hos offentlige aktører. Eier eller koordinator må kunne følge opp teknologiutvikling, kontrakter, data, sikkerhet, drift, vedlikehold og sambruk mellom aktører. Dersom dette ikke organiseres godt, kan resultatet bli uklare roller, langsomme beslutninger og svake insentiver for innovasjon og kostnadseffektiv drift.

8.4. Anbefaling om veien videre

Trådløs lading bør tas med videre som et mulig virkemiddel i elektrifiseringen av busstilbudet i Trondheim, men anbefales ikke gjøres til et krav i kommende bussanskaffelser. Erfaringene fra pilotprosjektet viser at teknologien er tilstrekkelig moden til å være et reelt alternativ i videre planlegging og i kommende konkurranser. Det anbefales derfor at konkurransegrunnlaget for busskontraktene fra 2029 åpner for løsninger basert på trådløs lading, men at teknologien konkurrerer med andre elektrifiseringsløsninger på funksjon, kostnad, risiko, leveranseevne og gjennomførbarhet.

Bakgrunnen for anbefalingen er at prosjektet i det alt vesentligste har besvart de viktigste tekniske spørsmålene som lå til grunn for piloteringen. Trådløs lading av buss er demonstrert som teknisk mulig å etablere og bruke under norske forhold. Ladeinfrastrukturen har hatt høy oppetid, funksjonen har vært stabil, og erfaringene fra testkjøring, vintertesting og ordinær rutetrafikk tilsier at verken kulde, fukt, snø eller salting i seg selv er barrierer for teknologien. Sikkerhet er også undersøkt gjennom målinger av elektromagnetiske felt, vurderinger av elektromagnetisk kompatibilitet og tester av fremmede objekter i ladefeltet. Samlet sett gir dette grunnlag for å konkludere med at teknologien fungerer og at de mest grunnleggende HMS- og driftsrisikoene kan håndteres gjennom krav, testing og sikkerhetsfunksjoner.

Samtidig viser prosjektet at en eventuell videre bruk bør være målrettet. Trådløs lading vil være best egnet der teknologien gir systemnytte utover å levere energi til bussene. Dette kan være på linjer eller punkter med særlig høyt energibehov, begrenset mulighet for ordinær depot- eller endepunktlading, knapphet på areal, behov for korte og automatiserte ladeoperasjoner, eller der infrastrukturen kan utnyttes av mange kjøretøy over store deler av driftsdøgnet. Analysene av metrobusslinjene viser at dynamisk trådløs lading kan bidra med betydelige energimengder i korridorer med høy busstetthet, men også at plassering, ladeeffekt og sambruk er avgjørende for nytten. Statisk trådløs lading fremstår på sin side som enklere å etablere og kan være særlig interessant på holdeplasser, terminaler og reguleringspunkter der lading kan skje uten synlig ladeutstyr over bakken og uten manuell til- og frakobling. Dette kan gjøre det mulig å etablere lading på steder hvor andre ladeteknologier ikke er praktisk mulig å få til.

Videre arbeid bør derfor starte med å konkretisere hvilke anvendelser i Trondheim som mest sannsynlig kan gi en merverdi sammenlignet med andre ladeløsninger. Dette bør omfatte oppdaterte energi- og SOC-analyser for aktuelle linjer, vurdering av ruteplan, reguleringstid, arealtilgang, nettkapasitet, bruksklasse på vei, mulighet for redusert batteristørrelse og potensial for sambruk med andre kjøretøygrupper. Korridorer med høy busstetthet og planlagte gate- eller veiprosjekter bør vurderes særskilt, fordi koordinering med annet veiarbeid kan redusere anleggskostnader og gjennomføringsrisiko. Tilsvarende bør sentrale omstignings- og reguleringspunkter vurderes med tanke på statisk eller semi-dynamisk trådløs lading, særlig der ordinær ladeinfrastruktur vil være arealkrevende eller visuelt og praktisk vanskelig å innpasse.

Tilgang til bussmateriell bør være et eget fokusområde i videre arbeid. Pilotprosjektet viser at integrasjon av mottakerplater, styringssystemer og kommunikasjon mot ladeinfrastruktur er teknisk mulig, og at busser med trådløs ladefunksjonalitet kan godkjennes og brukes i ordinær trafikk. Samtidig viste prosjektet at integrasjonen kan bli krevende hvis bussleverandør, teknologileverandør og batterileverandør ikke har etablert samarbeid eller tidligere erfaring sammen. Ved en eventuell større anskaffelse bør trådløs ladefunksjonalitet derfor beskrives tidlig i kravspesifikasjonen dersom det ønskes åpnet for teknologien. Det bør vurderes krav eller evalueringskriterier knyttet til dokumentert integrasjonserfaring, fabrikkbasert testing, typegodkjenning, serviceopplegg og ansvar for samspill mellom buss og ladeinfrastruktur.

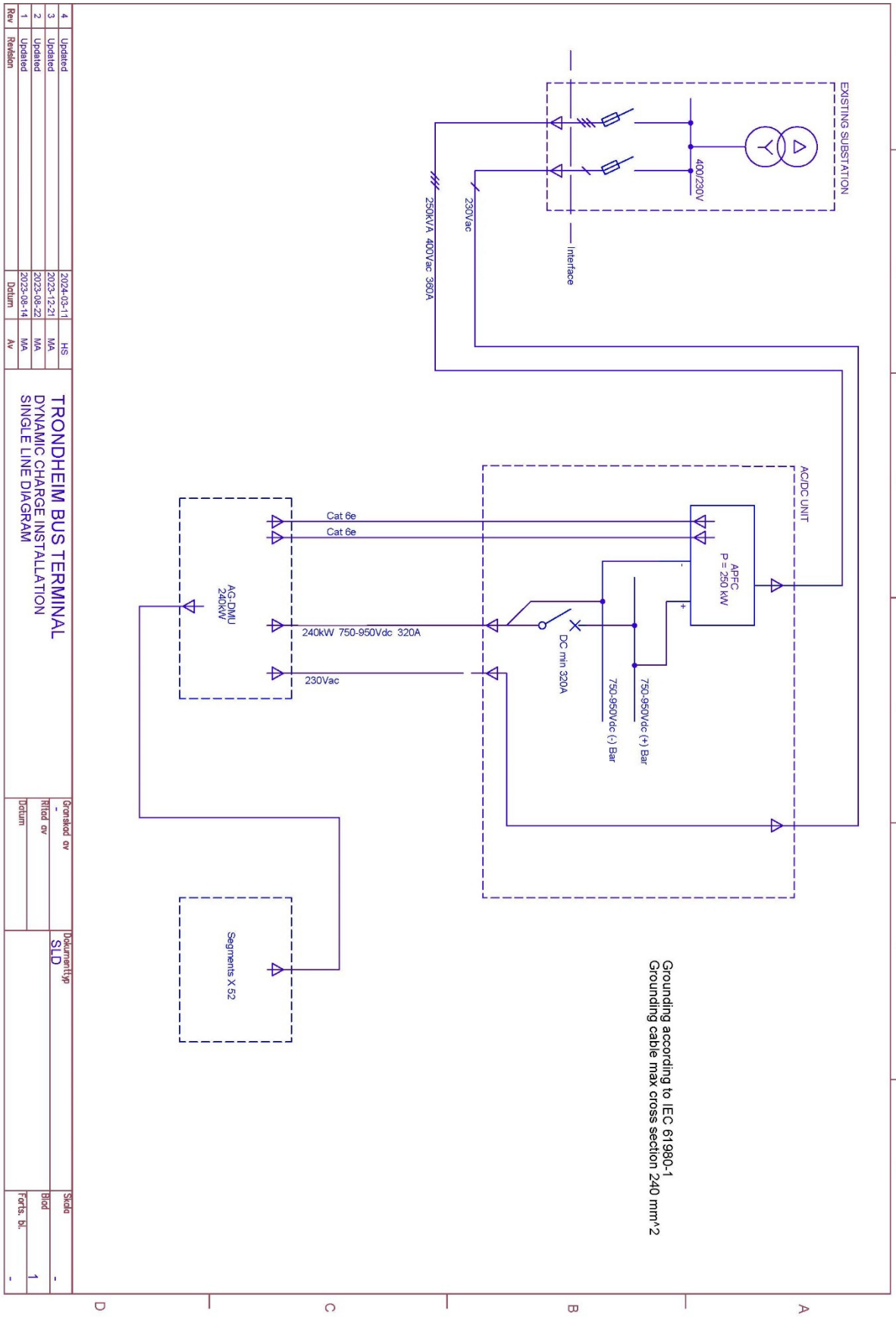
Eierskap, drift og finansiering må avklares før det eventuelt tas beslutning om større investeringer. Ladeinfrastruktur som bygges i offentlig vei må forventes å ha lengre levetid enn én busskontrakt og kan potensielt brukes av flere operatører og kjøretøygrupper. Dette taler for at infrastrukturen ikke uten videre bør legges fullt ut på én operatør i én kontraktsperiode. Offentlig eierskap, offentlig koordinering eller en særskilt modell for felles infrastruktur kan redusere risiko for operatørene, gjøre det lettere å legge til rette for sambruk og redusere faren for teknologisk eller kommersiell innlåsing.

Det anbefales at Trfk og AtB fortsetter å følge markeds- og teknologiutviklingen for trådløs lading. Leverandørmarkedet er fortsatt lite, og det er usikkerhet knyttet til bl.a. kostnader og standardisering. Det vil derfor være viktig å holde kontakten med teknologileverandører og andre aktører som prosjektet har etablert dialog med. Denne kontakten bør brukes til å følge utviklingen internasjonalt og til å få oppdatert kunnskap om kostnadsnivå, tekniske ytelser, status for arbeid med standardisering og interoperabilitet mm.

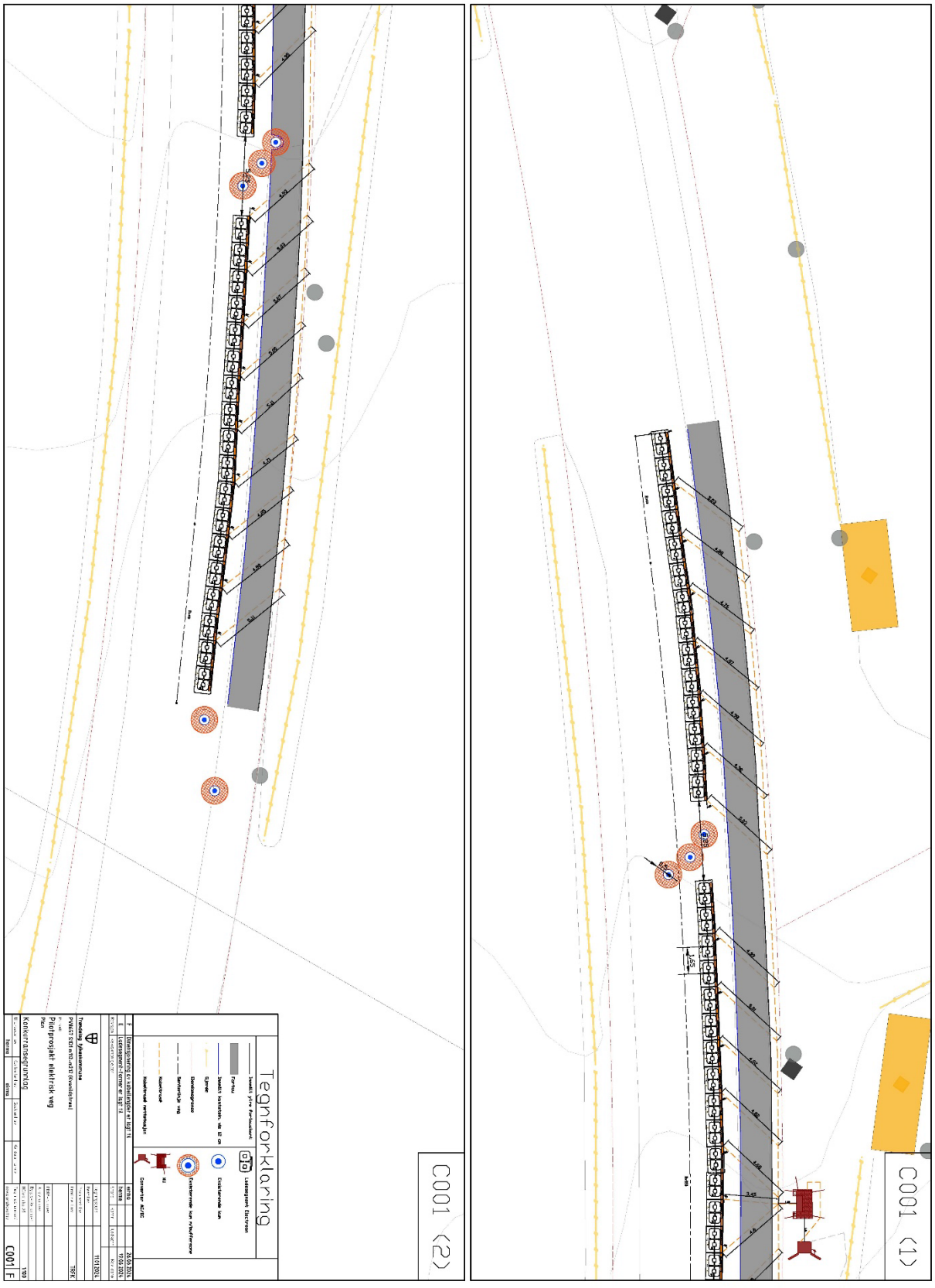
Konklusjonen er derfor at trådløs lading har kommet langt nok til å være et relevant og troverdig alternativ for elektrifisering av bussdrift i Trondheim. Teknologien bør holdes åpen i videre planlegging og i kommende konkurranser. For Trfk og AtB innebærer dette at trådløs lading bør videreføres som et strategisk handlingsrom - en teknologi som kan tas i bruk der den gir tydelig merverdi - men som må konkurrere med andre modne og framvoksende løsninger for utslippsfri kollektivtransport.

9. Vedlegg

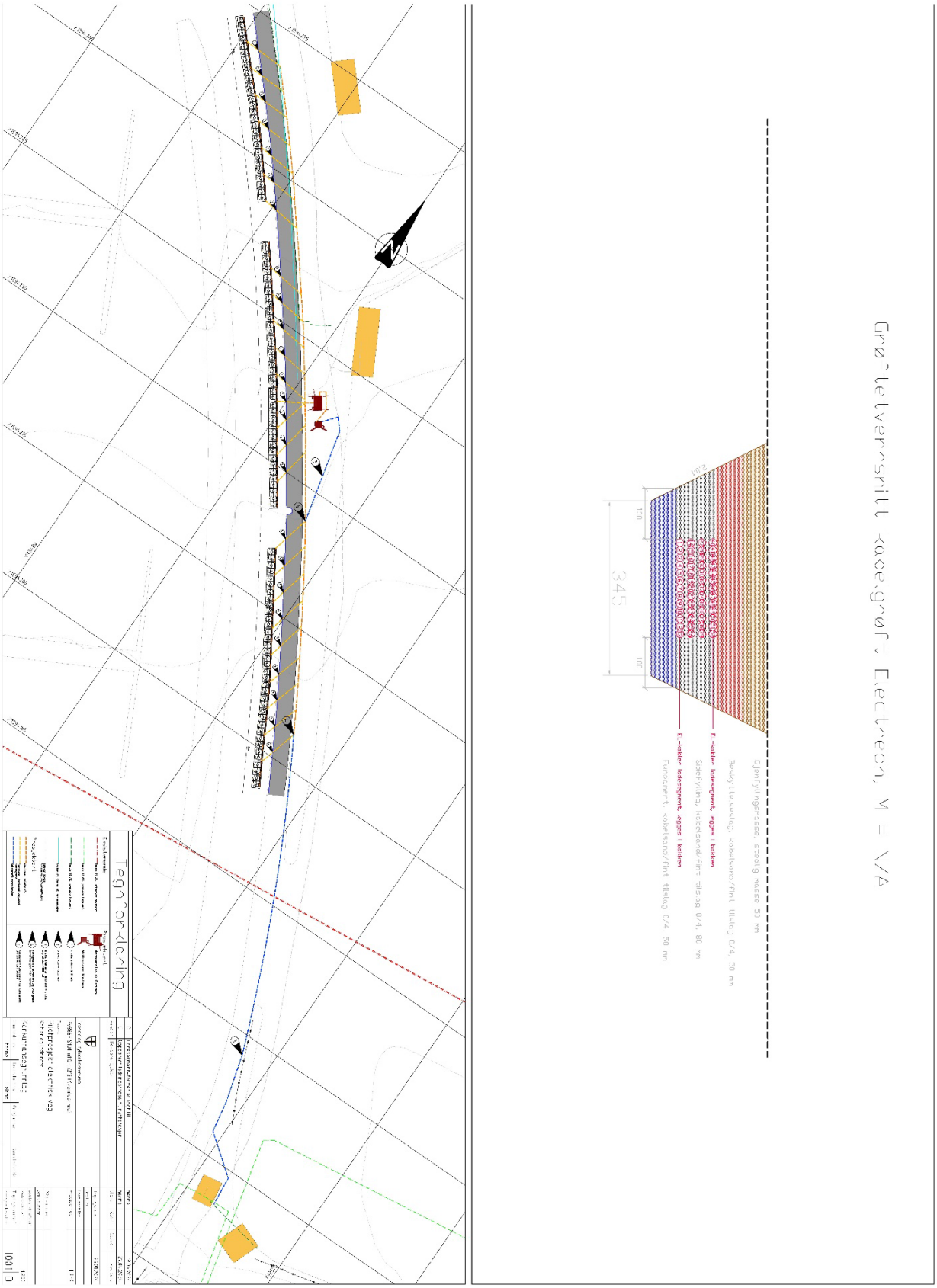
9.1. SLD installasjon for dynamisk trådløs lading



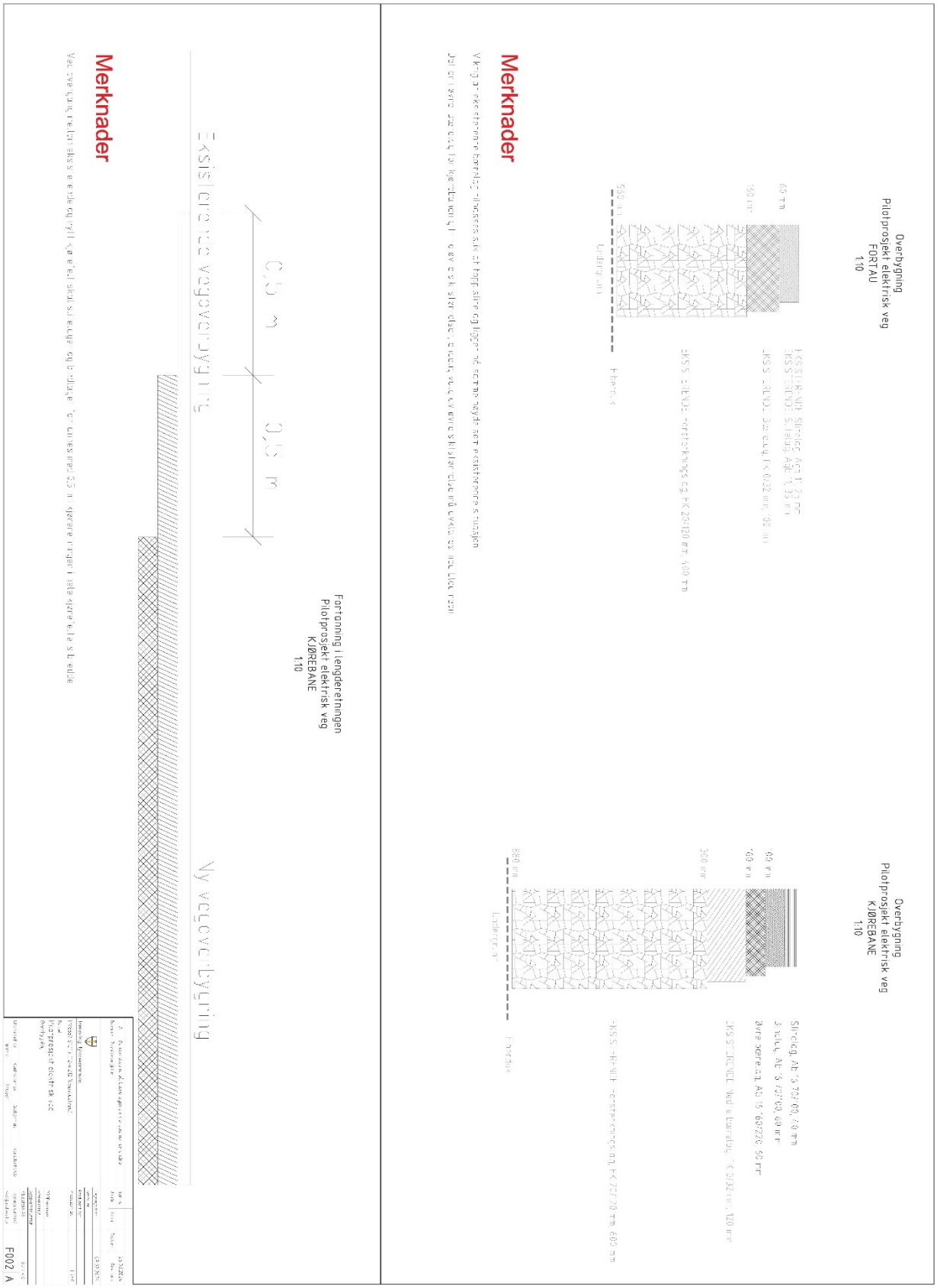
9.2. Oversiktstegning installasjon for dynamisk trådløs lading



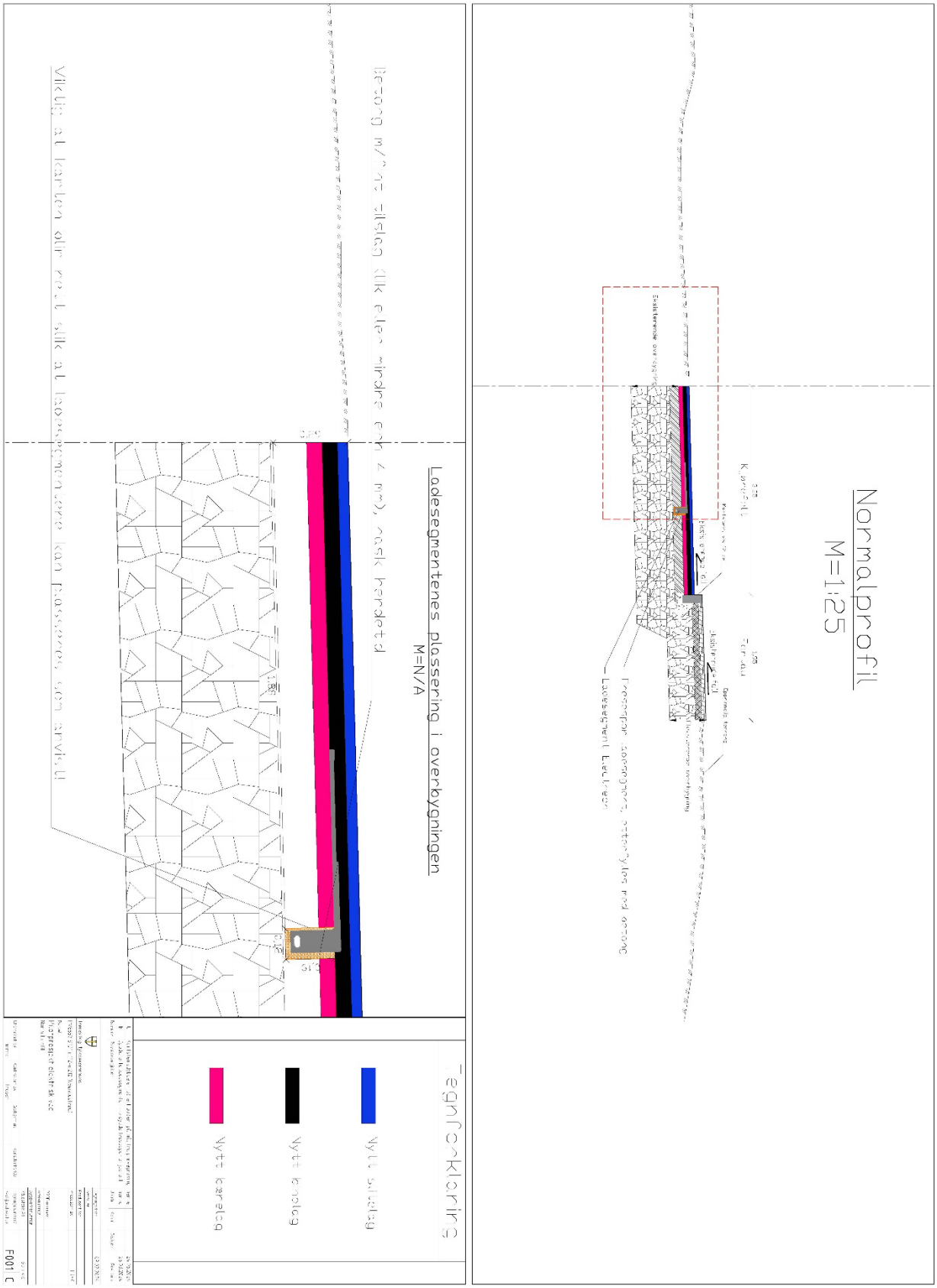
9.3. Tegning av kabelgrøfter



9.4. Tegning av oppbygning av vei



9.5. Tegning av veiprofil med plassering av ladesegmenter



9.6.

9.7. Måleresultater fra delkapittel 5.3

Tabell – Målinger benyttet som utgangspunkt for Figur 38 i delkapittel 5.3.

Test ID	Dx (cm)	Dy (mm)	Pin (kW)	Pout (kW)	Eff (%)	IsStable
0	45	1255	116.7	102.8	88.09	1
1	45	1331	116.3	101.2	87.02	1
2	45	1388	116.8	98.6	84.42	1
3	45	1493	120.4	105.1	87.29	1
4	45	1560	121.2	105.7	87.21	0
5	45	1638	40.1	34.75	86.66	0
6	45	1689	1.7	0	0.00	0
7	45	1500	120.45	105.2	87.34	1
8	45	1395	117.3	98.5	83.97	1
9	45	1368	116.65	99.6	85.38	1
10	45	1331	116.4	101.2	86.94	1
11	45	1313	116.5	101.9	87.47	1
12	45	1189	116.6	102.7	88.08	1
13	45	1160	116.7	102.55	87.87	1
14	45	1073	116.7	99.75	85.48	1
15	45	1012	118.2	100.2	84.77	1
16	45	964	120.1	104.4	86.93	1
17	45	877	120.95	105.55	87.27	1
18	45	794	39.8	34.25	86.06	0
19	45	739	1.7	0	0.00	0
20	37	1075	116.75	99.4	85.14	1
21	37	849	120.2	102.65	85.40	1
22	37	693	1	0	0.00	0
23	37	772	1	0	0.00	0
24	37	961	119.6	102.5	85.70	1
25	37	1091	116.5	100.15	85.97	1
26	37	1209	116.65	102.5	87.87	1
27	37	1384	116.85	98	83.87	1
28	37	1526	120.65	104.9	86.95	0
29	37	1702	1	0	0.00	0
30	20	768	1	0	0.00	0
31	20	909	118.1	91	77.05	1
32	20	1167	116.8	98.3	84.16	1
33	20	1326	116.9	97.5	83.40	1
34	20	1499	118.1	94	79.59	1
35	20	1640	49.3	39.2	79.51	0
36	16	967	38.1	24.1	63.25	0
37	16	784	1	0	0.00	0
38	16	897	77.45	51.5	66.49	0
39	16	1100	115.2	85.1	73.87	0
40	16	1276	78	63.3	81.15	0
41	16	1457	77.4	51	65.89	0
42	16	1668	1	0	0.00	0
43	54	883	120.4	102.8	85.38	1
44	54	541	77.3	50	64.68	0
45	54	727	39.2	28.2	71.94	0
46	54	897	120.45	103.1	85.60	1
47	54	1075	116.75	96.5	82.66	0
48	54	1234	116.65	102.5	87.87	1
49	54	1426	117.6	97.5	82.91	0
50	54	1706	79	60	75.95	0
51	58	792	39.2	31.3	79.85	0
52	58	979	78.95	65.6	83.09	0
53	58	1163	116.5	100.3	86.09	1
54	58	1328	116.7	100.2	85.86	1
55	58	1557	79.9	66.8	83.60	0
56	58	1721	49.5	38.2	77.17	0
57	64	803	39.5	26	65.82	0
58	64	1038	115.2	78.5	68.14	0
59	64	1290	117.1	96	81.98	0
60	64	1529	116	80	68.97	0
61	64	1752	1	0	0.00	0

Three coils active

Two coils active

One coil active

No charging

Unstable charging

9.8. Metodebakgrunn for kapittel 6

All rutedata er hentet fra AtBs rutedatabase i NeTEx-format (Network Timetable Exchange), som er den europeiske standarden for kollektivtransportdata. Datasettet består av to hoveddeler:

- Tiamat stoppsted-eksport (ca. 40 MB XML): Inneholder alle StopPlace-, Quay- og ScheduledStopPoint-elementer med koordinater (WGS84), navn og ID-koblinger mellom nasjonalt stoppreister (NSR:Quay:XXXXX) og AtBs interne ID-er (ATB:Quay:XXXXX).
- 737 per-linje NeTEx-filer: Inneholder ServiceJourney-elementer med TimetabledPassingTime og stopprekkefølge for alle ruter i AtBs nett.

Datakilde	**Antall elementer**	**Kommentar**
Tiamat stops-eksport	9 666 holdeplasser	NSR- og ATB-ID-er, koordinater, navn
Rute-XML-filer	737 filer	Én fil per rutelinje
Totalt antall ServiceJourney	21 487	Alle driftsdagvarianter
Etter hverdagsfilter	5 983	Dominant DayType per rutefil
Metrobuss (rute 1, 2, 3)	727	Avganger på representativ hverdag
Stoppsegmenter i cache	1 479	Unike fra-til-par med NVDB-data

9.8.1. Filter for ruter per hverdag

NeTEx-filer inneholder ofte flere varianter av samme rute: skoledager, ikke-skoledager, helligdager osv. For å unngå dobbelttelling og få et representativt hverdagsbilde, benyttes "dominant DayType"-metoden:

1. For hver av de 737 rutefilene leses alle DayType-elementer.
2. Kun DayType-elementer med egenskapsverdien "Weekdays" (eller tilsvarende hverdagsbetegnelse) beholdes som kandidater.
3. For hvert DayType telles antall ServiceJourney som refererer til det.
4. Den DayType med høyest antall ServiceJourney velges som "dominant" for rutefilen.
5. Kun ServiceJourney som tilhører den dominante DayType inkluderes i analysen.

Dette gir 5 983 av 21 487 kjøringer (27,9%), og er et representativt hverdagssett uten duplikater mtp skole- og ferievarianter.

9.8.2. Mapping av holdeplasser

En utfordring i databehandlingen er at rute-XML-filer refererer til holdeplasser som ATB:ScheduledStopPoint:XXXXX_Y (der _Y er en retningsindikator), mens Tiamat-filen lagrer koordinater under ATB:Quay:XXXXX via "imported-id" KeyValue-felt. Koordinatoppslag krever en tre-trinns mapping:

- Trinn 1: ATB:ScheduledStopPoint:XXXXX_Y → strip suffix → ATB:Quay:XXXXX
- Trinn 2: ATB:Quay:XXXXX → slå opp i Tiamat KeyValue[imported-id] → NSR:Quay:ZZZZZ
- Trinn 3: NSR:Quay:ZZZZZ → hent koordinater fra Quay-elementets Centroid

Denne mappingen oppnår en treffrate på 99,2% for alle stoppreferanser i hverdagsdatasettet. De resterende 0,8% er stopp som enten mangler i Tiamat-eksporten eller har feilaktige ID-er, og ekskluderes fra energiberegningene.

9.8.3. Energimodell – SINTEF SME2C

Energiberegning per stoppsegment utføres med SINTEFs SME2C-modell (SINTEF Multimodal Energy and Emission Calculation Model). SME2C er en fysikkbasert simuleringsmodell tilgjengelig som REST-API. Modellen beregner energiforbruk for hvert stoppsegment basert på faktisk veggeometri fra NVDB og kjøretøyspesifikasjoner.

SME2C returnerer "engineConsumptionKwH" som er netto energiforbruk fra batteri etter rekuperering. Veggeometri hentes fra NVDB-API for hvert stoppsegment. Totalt er 1 479 unike stoppsegmenter i beregningene, med 100% SME2C-dekning for hverdagskjøringene etter at mapping er utført.

9.8.4. Kjøretøydefinisjoner

Analysen benytter tre kjøretøydefinisjoner som sendes til SME2C-APIet. Parameterne er basert på tekniske datablader for typiske busser i AtBs flåte og SINTEFs anbefalte standardverdier:

Parameter	**12m standard buss**	**18m leddbuss**	**24m metrobuss**	**Enhet**
Vekt (kjøretøy)	13 500	18 000	26 000	kg
Gjsn. passasjerlast	1 875	3 750	5 625	kg
Total beregnet masse	15 375	21 750	31 625	kg
Batteripakke	350	550	800	kWh
Nyttbar batterikapasitet	360	440	640	kWh (80% av total)
Frontareal	8,42	9,30	10,50	m²
Luftmotstandskoeff.	0,70	0,70	0,70	–
Rullefriksjonskoeff.	0,007	0,007	0,007	–
Motorvirkningsgrad	0,90	0,90	0,90	–
Regenereringsvirkningsgrad	0,70	0,70	0,70	–
Tilleggslast	5 000	5 000	2 000	W

Flåtemiksen for ordinære ruter er antatt å være 70% 12m og 30% 18m leddbuss. Metrobussruter (1, 2 og 3) kjøres utelukkende med 24m leddbusser. Tilleggslasten for 24m metrobuss er satt til 2 000 W (mot 5 000 W for de kortere) fordi 24m-bussene antas å ha dieselvarmer for kupéoppvarming, som ikke trekker fra batteriet.

9.8.5. Levelisert kostnad (LC)

For å sammenligne lønnsomheten av ulike infrastrukturtiltak benyttes levelisert kostnad (LC), uttrykt i NOK per levert kWh over infrastrukturens levetid. Formelen er:

$$LC\ [NOK/kWh] = (C_{infra} \times (1 + r_{vedl} \times n)) / (E_{dag} \times n_{dager} \times n_{år})$$

Symbol	**Beskrivelse**	**Verdi**
C_infra	Infrastrukturkostnad for segmentet	dist_km × MNOK/km
r_vedl	Årlig vedlikeholdskostnad (andel av investering)	2 %
n	Infrastrukturens levetid	25 år
E_dag	Daglig ladet energi fra segmentet	kWh/dag (beregnet)
n_dager	Driftsdager per år	315 dager
n_år	Levetid i år	25 år

En lavere LC-verdi indikerer at segmentet er mer kostnadseffektivt, dvs. at investeringen i trådløs infrastruktur gir mer ladet energi per krone. Segmenter med mange busser per dag og kort distanse vil typisk ha lav LC. Segmenter som er lange med få passeringer vil ha høy LC.

Eksempel på LC-beregning for et tilfeldig segment:

```
Segment: 0,5 km, 80 passeringer/dag, 1,87 kWh/km, 100 kW, 92% virkningsgrad, 32,5 km/t
gjennomsnittshastighet.
→ Ladetid per buss: 0,5 km / 32,5 km/t × 60 min = 0,92 min
→ Ladet energi per buss: 100 kW × (0,92/60) h × 0,92 = 1,41 kWh
→ E_dag = 80 × 1,41 = 112,8 kWh/dag
→ C_infra = 0,5 km × 7,5 MNOK/km = 3,75 MNOK
→ LC = (3 750 000 × 1,50) / (112,8 × 315 × 25) = 6,33 NOK/kWh
```

9.8.6. Forutsetninger og parametere

Parameter	**Verdi**	**Kommentar**
Driftsdager per år	315	Estimert fra AtB
Induktiv ladeeffekt	150 kW for Metrobuss, 100 kW for øvrige	
Induktiv virkningsgrad	92 %	
Statisk ladeeffekt	300 kW	
Statisk virkningsgrad	95 %	
Infrakostnad induktiv T1	10/12,5/15 (lav/høy/middels) MNOK/km	Dedikert metrobusskorridor. 30% lavere for delt veiinfrastruktur
Kostnad statisk lader	1 000 000 NOK	Per lader, installert inkl. nettilknytning
Levetid induktiv infrastruktur	25 år	Forventet teknisk levetid
Vedlikeholdskostnad	2 %/år	Av investeringskostnad
Gjennomsnittshastighet induktiv	Basert på rutetid	Gir realistisk ladetid per segment
Terminalopphold	6 min	Snupause ved endestasjoner
Holdeplassopphold	0,5 min	30 sekunder for andre stopp
Start-SOC simulering	100 %	Fulladet fra depot om morgenen
Min akseptabel SOC	20 %	Kritisk grense i SOC-simuleringen