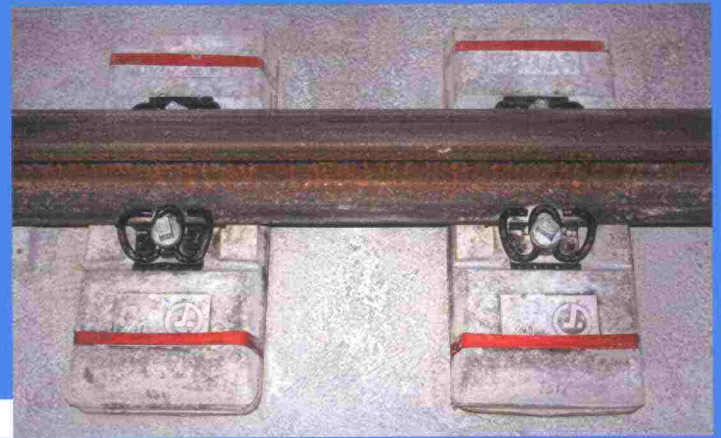


Kehäradan kiintoraideselvitys



Ratahallintokeskuksen
julkaisu A 17/2008

Kehäradan kiintoraideselvitys

Helsinki 2008

Ratahallintokeskus

Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 17/2008

ISSN 1455-2604

ISBN 978-952-445-263-2

Verkkajulkaisu pdf (www.rhk.fi)

ISSN 1797-6995

ISBN 978-952-445-264-9

Kannen ulkoasu: Proinno Design Oy, Sodankylä

Kansikuva: Markku Nummelin

Paino: Kopijyvä Oy, Kuopio

Helsinki 2008

Kehäradan kiintoraideselvitys. Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki 2008. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 17/2008. 88 sivua ja 2 liitettä. ISBN 978-952-445-263-2, ISBN 978-952-445-264-9 (pdf), ISSN 1455-2604, ISSN 1797-6995 (pdf)

TIIVISTELMÄ

Kehärata on valtakunnallisesti merkittävä pääkaupunkiseudulle suunniteltu poikittainen kaupunkiliikenteen raideyhteys, joka yhdistää Vantaankosken radan Helsinki-Vantaan lentoaseman kautta pääraataan. Rata alittaa lentoaseman Viinikkalan avoleikkausvaihtoehdon mukaisessa linjauksessa noin seitsemän kilometriä pitkässä kaksoistunnelissa, johon liittyvät Aviapoliksen, Lentoaseman ja Ruskeasannan asemat sekä raiteenvaihtopaikka. Tämän tutkimuksen päätarkoituksena oli selvittää kiintoraideratkaisun soveltuvuus Kehäradan tunneliosuudelle perinteisen sepelitukikerroksellisen raiteen sijaan. Lisäksi selvityksen yhteydessä on lyhyesti arvioitu kiintoajojohdon ja pohjaimen käyttömahdollisuuksia tunneliosuudella.

Kiintoraideratkaisussa perinteinen sepeliraide korvataan yleensä betoni- tai asfalttilaatalle tehtävällä raiteella. Kiintoraiteen etuina ovat pidempi käyttöikä, alhaisempi kunnossapitotarve ja suurempi käytössä oleva ratakapasiteetti. Pienemmän rakennepaksuuden sekä paremman pysyvyyden ansioista kiintoraiteella voidaan saavuttaa säästöjä tunneleissa poikkileikkauksen ja siltarakenteen suhteen. Sepeliraiteeseen verrattuna kiintoraideinvestointi on kalliimpi ja mahdollisen vioittumisen edellyttämät korjaustoimenpiteet ovat raskaampia ja kalliimpia toteuttaa. Kiintoraiteen soveltuvuus tulee selvittää hankekohtaisesti laadittavan elinkaarikustannuslaskelman perusteella.

Kiintoraiteen suunnittelun lähtökohdat määräytyvät mm. liikennöintisuunnitelman, rata-geometrian, tunneliolosuhteiden sekä teknisten järjestelmien perusteella. Rakennesuunnittelun lähtökohtana on, että rakenteen komponentteihin ei muodostu pysyviä kuormista, muuttuvien ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta tai junaliikenteestä määriteltäviä suurempia pysyviä tai hetkellisiä muodonmuutoksia. Keskeinen vaatimus on rakenteen suunniteltu käyttöikä. Eurokoodistandardit sekä RHK:n tai UIC:n ohjeet eivät täysin kata kiintoraidejärjestelmään sisältyvien erikoisrakenteiden suunnittelussa tarvittavaa ohjeistusta, minkä seurauksena ohjeita on yhdisteltävä rakennesuunnittelua varten.

Kiintoraideratkaisun lähtökohdiksi asetettiin Suomessa käytössä oleva betoniratapölkky (BP99/B97) sekä jousto-ominaisuuksien osalta vaihtoehtoisesti ranskalaisen Sateban SAT S 312 -järjestelmä ja saksalaisen Vosslohin System 304 -kiinnitysjärjestelmä. Selvityksessä kiintoraiteen rakenne jaettiin raiteeseen, sen paikalleen sitovaan pintalaataan ja pohjalaataan.

Selvityksessä laadittiin kaksi vaihtoehtoista kiintoraideratkaisua. Rakenne 1 koostuu raudoitettusta raiteen paikalleen sitovasta pintalaatasta sekä maakosteasta betonista valmistettavasta pohjalaatasta. Rakenne perustetaan puhdistetun kallionpinnan tai tiivistetyn murskekerroksen varaan. Rakenne 2 toteutetaan esivalmistetuista elementeistä valmistettavasta tai liukuvaluna tehtävästä raudoitettusta betonikaukalosta, joka perustetaan tiivistetyn murskekerroksen varaan. Raide sidotaan paikalleen kaukalon täyttävällä teräskuitubetonista tehtävällä pintalaatalla.

Selvityksessä tarkasteltiin myös tunnelipoikkileikkauksen pienentämismahdollisuuksia. Ratasuunnitelman mukaisen sepeliradan tunnelipoikkileikkaus on teknisten järjestel-

mien sallimassa minimissä, minkä seurauksena kiintoraiteen käyttö ei salli poikkileikkauksen kaventamista. Kiintoraideratkaisujen rakennepaksuus vaihtelee 480–630 mm välillä, minkä ansiosta kalliopohjaa voidaan nostaa sepelirataan verrattuna. Maksimissaan tunnelipoikkileikkausta voidaan pienentää noin 4 m². Kiintoajojohdon avulla tunnelipoikkileikkausta voidaan lisäksi pienentää noin 2 m².

Kiintoraiteen erityisrakenteita ovat vaihteet sekä siirtymärakenteet kiinto- ja sepeliraiteen välillä. Kiintoraidevaihteelle YV60-300-1:9 laadittiin linjakaavio SAT S 312 -järjestelmään perustuvalla rakenteella. Vaihteessa voidaan pienin muutoksin käyttää tavanomaisia betonivaihdepölkkyjä. Teräsosat ovat samat kuin tavanomaisissa vaihteissa, minkä ansiosta vaihteen kokoaminen sekä kunnossapito voidaan toteuttaa pääosin samoin menetelmin kuin sepeliraiteen vaihteella. Pysyvyyden ansiosta kiintoraidevaihte ei tarvitse tuentaa sepeliraiteeseen asennetun vaihteen tavoin, mikä on merkittävä etu kunnossapidon kannalta. Siirtymärakennetta tarvitaan tasaamaan kiinto- ja sepeliraiteen välistä painumaeroa, joka riippuu merkittävästi kiintoraiteen runkomelun eristyksen edellyttämistä jousto-ominaisuuksista. Siirtymärakenteelle suunniteltiin alustavat ratkaisut SAT S 312 ja System 304 -järjestelmiin perustuvia kiintoraideratkaisuja varten.

Rakenteen suunnittelun yhteydessä on huomioitava rakenteilla saavutettava runkomelun eristys. Kehäradan tunneliosuuden alueella on pääasiassa toimistorakennuksia, joille runkomelun enimmäistaso L_{ASmax} on 40 dB. Tunnelin itäpäässä Ruskeasanan asuinalueella enimmäistaso on 30 dB. SAT S 312 -järjestelmällä riittävä eristys on mahdollista saavuttaa 30 dB tasoon asti. System 304 -järjestelmällä runkomeluneristys on vähäisempi, mutta sillä voidaan saavuttaa riittävä runkomelun eristys 40 dB enimmäistason alueilla. Molemmissa ratkaisuissa on huomioitava kiskoon kohdistuva painuma, joka kasvaa suhteessa saavutettuun eristystasoon.

Betonipölkkyyn perustuvan kiintoraiteen rakentaminen on tarkoituksenmukaista tehdä ylhäältä alaspäin. Tällöin kiskoista ja pölkkyistä koottu raide perustetaan tilapäisten tukirakenteiden avulla pohjalaatan päälle ja raide säädetään suunniteltuun geometriseen asemaan. Raide sidotaan paikalleen pintalaatan avulla. Työn laatuvaatimukset on asetettava tiukoiksi ja työn valvonta on toteutettava huolellisesti. Kunnossapidon päätehtävä on kiskon, kiinnitysosien, ratapölkkyjen ja värähtelyä vaimentavien osien kunnan tarkkailussa.

Kiintoraiteen kustannuslaskennan pohjaksi otettiin kaksi rakennevaihtoehtoa, joita tarkasteltiin SAT S 312 ja System 304 -järjestelmiin perustuvilla ratkaisuilla. Kiintoraiteen investointikustannus on tarkastelluilla rakenteilla asennuspituudesta riippuen edullisimmalla rakenteella 486 000–503 000 €/rd-km suurempi kuin sepeliraiteella. Kiintoraiteen kunnossapidon todettiin olevan noin 7 000 €/rd-km/vuosi edullisempaa kuin sepeliraiteella, jolloin investoinnin takaisinmaksuajaksi muodostuu 69–72 vuotta huomioiden kunnossapidossa saavutettavat säästöt.

Kiintoraide on vaativa erikoisrakenne, jollaisia ei ole Suomessa vielä toteutettu Kehäradan kokoisissa ratahankeissa. Käyttökokemusten puutteen takia kiintoraiteen hankintamenettelyyn tulee kiinnittää erityistä huomiota. Vaihtoehdoissa vastuu kokonaisratkaisusta vaihtelee tilaajan ja urakoitsijan välillä. Perusratkaisuja ovat 1) tilaajan hyväksymät tuotteet, jossa määritellään hyväksytyt kiintoraideratkaisut, 2) tilaajan

suunnitelman tai 3) urakoitsijan suunnitelmien mukaisen rakenteen toteuttaminen sekä 4) palvelusopimusmalli, jossa tilaaja ostaisi urakoitsijalta ratakapasiteettia.

Selvityksen perusteella Kehäradan tunneliosuudelle suositeltava rakennevaihtoehto on perinteinen sepelirata, koska kiintoraiteella ei saavuteta riittäviä säästöjä tai etuja suhteessa suurempaan investointikustannukseen. Kiintoajojohto kannattaa asentaa Kehäradan tunneliosuudelle, koska sen avulla on mahdollista parantaa merkittävästi tunneliturvallisuuutta järjestelmän paremman palonkestävyyden ansiosta. Pohjaimet kannattaa asentaa Kehäradan rautatietunneliin asennettaviin vaihteiden pölkkyihin, koska niiden avulla voidaan vähentää vaihteiden kunnossapitotarvetta. Lisäksi tulisi selvittää pohjaimen käyttömahdollisuudet runkomelun vaimennuselementtinä Avia-poliksen ja Lentoaseman toimistoalueilla.

SAT S 312 -järjestelmään perustuvan kiintoraiteen selkeitä etuja ovat parempi runkomelun eristys sekä pölkyn vaihtomahdollisuus. System 304 -kiinnitysjärjestelmään perustuva ratkaisu on halvempi toteuttaa, mutta pölkyn ankkurointi peruslaattaan on ongelmallinen eikä ratkaisulla voida todennäköisesti saavuttaa 30 dB runkomelualueilla vaadittavaa eristystä. Kiintoraideratkaisun käyttö kannattaa selvittää uusilla rataosuuksilla, joilla ratakapasiteetin käyttöaste on alusta pitäen suuri tai joiden varrella on laajoja 30 dB enimmäistason runkomelualueita.

Utredning av ballastfritt spår på Ringbanan. Banförvaltningscentralen, Bannätsavdelningen. Helsingfors 2008. Banförvaltningscentralens publikationer A 17/2008. 88 sidor och 2 bilagor. ISBN 978-952-445-263-2, ISBN 978-952-445-264-9 (pdf), ISSN 1455-2604, ISSN 1797-6995 (pdf)

SAMMANDRAG

Ringbanan är en tvärgående spåranslutning för stadstrafik i huvudstadsregionen med riksomfattande betydelse. Banan sammanbinder Vandafors-banan med stambanan via Helsingfors-Vanda flygplats. Banan löper under flygplatsen i Vinikby schaktalternativ i en ca sju kilometer lång dubbel tunnel med anslutning till stationerna Aviapolis, Flygplatsen och Rödsand samt en spårbytesplats. Utredningens huvudsakliga syfte var att utreda lämpligheten av ett ballastfritt spår för Ringbanans tunnelavsnitt i stället för ett traditionellt spår med makadamballast. Därtill har man i samband med utredningen i korthet bedömt möjligheterna att använda fast kontaktledning och sliperunderlägg i tunnelavsnittet.

Vid lösningen med ballastfritt spår ersätts det traditionella makadamspåret med spår som byggs på betong- eller asfaltplatta. Fördelarna med det ballastfria spåret är längre livslängd, mindre underhållsbehov och större bankapacitet. Tack vare mindre konstruktionstjocklek samt bättre beständighet kan man uppnå inbesparingar med ballastfritt spår i tunnlar när det gäller tvärsektioner och brokonstruktioner. Jämfört med makadamspåret är investeringen för ballastfritt spår dyrare och eventuella reparationer av skador är tyngre och dyrare att genomföra. Det ballastfria spårets lämplighet bör utredas separat för varje projekt utgående från en kalkyl som beräknar kostnaderna under livscykeln.

Utgångspunkterna för planeringen av ett ballastfritt spår bestäms bl.a. på basis av trafikplanen, bangeometrin, omständigheterna i tunnlar samt av tekniska system. Utgångspunkten för konstruktionsplaneringen är att konstruktionens komponenter inte utsätts för större bestående eller tillfälliga formförändringar till följd av varaktig last, påverkan av föränderliga miljöförhållanden eller av tågtrafiken än vad som är tillåtet. Ett centralt krav är konstruktionens planerade livslängd. Eurokodstandarderna samt Banförvaltningscentralens eller UIC:s anvisningar täcker inte helt de direktiv som behövs vid planeringen av specialkonstruktionerna i systemet med ballastfritt spår, varför anvisningarna måste sammanställas för konstruktionsplaneringen.

Som utgångspunkt för lösningen med ballastfritt spår valdes en betongsliper som används i Finland (BP99/B97) samt som alternativ det franska systemet av Sateba SAT S 312 för sina elastiska egenskapers skull samt det tyska befästningssystemet Vossloh System 304. I utredningen delades det ballastfria spårets konstruktion upp i spåret, ytplattan som binder spåret på plats samt den bärande bottenplattan.

I utredningen utarbetades två alternativa lösningar med ballastfritt spår. Konstruktion 1 består av en armerad ytplatta som binder spåret på plats samt av en bottenplatta tillverkad av jordfuktig betong. Konstruktionen byggs på rengjord bergyta eller på ett komprimerat lager stenkross. Konstruktion 2 genomförs av antingen glidformsgjutet armerat betongmateriel eller förtillverkade betongelement, som byggs på ett komprimerat lager stenkross. Spåret befästs på plats med en ytplatta av stålfiberbetong som fyller tråget.

I utredningen granskades även möjligheten att minska tvärsektionen i tunnlar. Makadamspårets tunneltvärsektion enligt banplanen ligger vid tillåtet minimum för tekniska system, varför användningen av ett ballastfritt spår inte tillåter en inskränkning av tvärsektionen. Det ballastfria spåret konstruktionstjocklek varierar mellan 480–630 mm, varför berggrunden kan höjas i jämförelse med makadamspåret. Tvärsektionen i tunnlar kan högst minskas med ca 4 m². Med hjälp av en fast kontaktledning kan tvärsektionen i tunnlar dessutom minskas med 2 m².

Det ballastfria spårets specialkonstruktioner utgörs av växlar samt av övergångskonstruktioner mellan det ballastfria spåret och makadamspåret. För den ballastfria spårväxeln YV60-300-1:9 uppgjordes ett linjeschema med en konstruktion som bygger på systemet SAT S 312. I växeln kan man med små justeringar använda traditionella betongväxelsliprar. Ståldelarna är de samma som vid vanliga växlar, varför konstruerandet och underhållet av växeln kan genomföras huvudsakligen med samma metoder som vid makadamspårets växel. Tack vare sin stabilitet behöver det ballastfria spårets växel inte riktas på samma sätt som en makadamspårväxel, vilket utgör en betydande fördel med tanke på underhållet. Övergångskonstruktionen behövs för att jämna ut sättningsskillnaden mellan det ballastfria spåret och makadamspåret, vilket till stor del beror på de elastiska egenskaperna hos det ballastfria spåret som fordras för att isolera stomljudet. För övergångskonstruktionen planerades preliminära lösningar för det ballastfria spåret baserade på systemen SAT S 312 och System 304.

I samband med planeringen av konstruktionen måste man ta hänsyn till den isolering av stomljudet som åstadkoms med hjälp av konstruktionerna. I området kring tunnelavsnittet på ringbanan finns huvudsakligen kontorsbyggnader för vilka stomljudet får vara högst L_{ASmax} 40 dB. I tunnelns östra ända vid Rödsands bostadsområde är högsta tillåtna nivå 30 dB. Med SAT S 312-systemet är det möjligt att uppnå en isoleringsnivå på 30 dB. Med System 304-systemet är stomljudsisoleringen mindre, men med det är det möjligt att uppnå en tillräcklig stomljudsisolering på områden där högst 40 dB är tillåtet. I båda lösningarna bör man beakta rälsens sättning som växer i proportion till uppnådd stomljudsisolering.

Det är ändamålsenligt att bygga det på betongslipar baserade ballastfria spåret uppifrån och ner. Då befästs spåret uppbyggt av räler och sliprar med hjälp av en tillfällig stöd-konstruktion på bottenplattan och spåret justeras i sin geometriska position. Spåret befästs på plats med hjälp av ytplattan. Arbetet kräver stränga kvalitetskrav och övervakningen måste ske noggrant. Underhållets huvudsakliga syfte är att övervaka rälsens, befästningsdelarnas, sliprarnas och de vibrationsdämpande delarnas skick.

Som grund för kostnadskalkylen för det ballastfria spåret användes två konstruktionsalternativ som granskades med lösningar baserade på systemen S 312 och System 304. Investeringskostnaden för det ballastfria spåret är med de granskade konstruktionerna 486 000–503 000 €/spår-km större än för makadamspåret beroende på genomförd sträcka. Underhållet för det ballastfria spåret konstaterades vara ca 7 000 €/spår-km/år förmånligare än för makadamspåret, varvid investeringens återbetalningstid blir 69–72 år med hänsyn till inbesparingarna i underhållet.

Det ballastfria spåret är en krävande specialkonstruktion som inte tidigare har genomförts i Finland i projekt av samma storleksklass som Ringbanan. På grund av erfarenhetsbristen bör särskild vikt fästas vid förfarandet vid anskaffningen av ballast-

fritt spår. I de olika alternativen varierar helhetsansvaret mellan beställaren och entreprenören. Grundalternativ är 1) produkter godkända av beställaren där de godkända lösningarna med ballastfritt spår definieras, genomförande av konstruktionen enligt 2) beställarens plan eller enligt 3) entreprenörens plan samt 4) serviceavtalsmodell där beställaren köper bankapacitet av entreprenören.

På basis av utredningen är det rekommenderade konstruktionsalternativet för Ringbanans tunnelavsnitt traditionellt makadamspår eftersom man med ballastfritt spår inte uppnår tillräckliga inbesparingar i förhållande till den större investeringskostnaden. Det lönar sig att installera en fast kontaktledning i Ringbanans tunnelavsnitt eftersom den bidrar till att förbättra säkerheten i tunneln betydligt tack vare bättre brandtålighet. Sliperunderlägg bör läggas under växelsliparna i Ringbanans järnvägstunnel eftersom de bidrar till att minska behovet av växelunderhåll. Därtill bör man utreda möjligheterna att använda sliperunderlägg som isoleringselement mot stomljud vid kontorsområdet i Aviapolis och Flygplatsen.

Klara fördelar med ballastfritt spår baserat på systemet SAT S 312 är bättre isolering av stomljud samt bättre möjligheter till sliperbyte. Lösningen som baserar sig på befästningssystemet System 304 är förmånligare att genomföra, men förankringen av slipern i grundplattan är problematisk och man kan troligtvis inte uppnå gränsvärdet 30 dB i områden som kräver stomljudsisolering. Det är skäl att utreda användningen av ballastfritt spår på nya banavsnitt där bankapacitetens nyttjandegrad från början är hög eller vid vilka det finns stora områden som kräver stomljudsisolering med ett gränsvärde på 30 dB.

Slab Track Study for the Ring Rail Line. Finnish Rail Administration, Rail Network Department. Helsinki 2008. Publications of the Finnish Rail Administration A 17/2008. 88 pages and 2 appendices. ISBN 978-952-445-263-2, ISBN 978-952-445-264-9 (pdf), ISSN 1455-2604, ISSN 1797-6995 (pdf)

SUMMARY

The Ring Rail Line is an internationally important railway connection planned to the Helsinki Metropolitan Area. It connects the existing Vantaankoski urban line to the Kerava urban line through the Helsinki-Vantaa Airport. The railway goes under the Airport in Viinikkala open-cut alternative in a seven kilometer long double tunnel, which includes the stations of Aviapolis, Lentoasema (Airport) and Ruskeasanta. Also a crossing place is planned in the tunnel. In this study the main task was to investigate the suitability of a slab track system for the tunnel section of the Ring Rail Line as an alternative for a traditional ballasted track. In addition, the possibilities of an overhead conductor rail and “under sleeper pad” solutions were shortly investigated.

In slab track solution, the traditional ballasted track is usually replaced by a track based on concrete or asphalt slab. The advantages of slab track include longer duration, lower maintenance needs and bigger available network capacity. The smaller structural thickness and better permanency allow savings in tunnel cross-section and with bridges. Compared to ballasted track, the investment costs are higher and reparation measures due to possible failures are heavier and more expensive to execute. The suitability of slab track is investigated with a project-specific life cycle cost analysis.

In the planning of a slab track system, the traffic plan, the railway geometry, the tunnel conditions and the technical systems have their influence. The basic principle of structural planning of slab track is that greater permanent or temporary deformations than specified must not occur to slab track components due to permanent loads, changing environmental conditions or train traffic. The central requirement is the planned lifetime of the structure. The Eurocode standards and e.g. the guidelines of Finnish Rail Administration or UIC do not fully cover guidelines for special structures included in slab track systems. Therefore guidelines must be integrated from different sources for the structural planning.

For the slab track solution the Finnish standard concrete sleeper was set as a starting point. Regarding the needed elasticity and ground-borne noise damping properties, alternatively Sateba’s “SAT S 312” system and Vossloh’s “System 304” fixation system were chosen. In the study the slab track structure was divided to the track, the surface slab binding it and the base slab.

In the study, two alternative slab track solutions were defined. Structure 1) is composed of a reinforced surface slab fixing the track and a base slab made of zero-slump concrete. The structure is founded on a cleaned rock surface or on a compressed layer of crushed stone. Structure 2) is produced from a reinforced concrete trough made either from prefabricated elements or by slip casting. The trough is based on a compressed layer of crushed stone. The track is fixed with a surface slab made from steel fibre reinforced concrete.

With slab track the possibilities of reducing the tunnel cross-section were investigated. The width of a cross-section with ballasted track is at the allowed minimum of the technical systems. Thus the cross-section cannot be narrowed with the slab track. Structural thickness of defined slab track solutions varies between 480–630 mm which allows lifting of the rock bottom compared to ballasted track. At the maximum, the cross-section of the tunnel can be reduced by 4 m² while founded on cleaned rock surface. The overhead conductor rail allows an additional reduction of 2 m².

Slab track requires special attention with switches and transition structures between slab track and ballasted track. In the study a line drawing was made for a slab track switch with a structure based on the SAT S 312 system. Here standard concrete sleepers can be used with minor changes. The steel parts are the same as with switches for ballasted track, and thus the assembly and maintenance can be carried out with mainly the same methods. The main advantage is that the slab track switch doesn't require tamping. Transition structures are needed to even out the settling differences between slab track and ballasted track. The differences depend on the elasticity properties of the slab track. To the transition structures, preliminary solutions were planned for SAT S 312 and System 304 slab track systems.

Interlinked with planning of the structure, an important factor is the isolation of ground-borne noise, which can be reached with the structures. In the area of the tunnel section of the Ring Rail Line, there are mainly office buildings, in which the maximum ground-borne noise level L_{ASmax} allowed is 40 dB. At the eastern end of the tunnel, in the residential area of Ruskeasanta, the maximum level is 30 dB. With SAT S 312 system, sufficient isolation is possible to reach up to the 30 dB level. With System 304, ground-borne noise isolation is less efficient but sufficient for areas with ground-borne noise level of 40 dB. With both systems the rail deflection, which increases in proportion to the achieved ground-borne noise isolation, must be taken into account.

For a slab track based on concrete sleepers the suitable way of building is the "top-down" method. Here the track, pre-assembled of rails and sleepers, is founded with provisional supporting structures on the base slab, and the track is adjusted to the planned geometric status. The track is fixed with a surface slab. The quality requirements for building a slab track have to be set tightly and supervision of the work must be organized properly. The main task of the maintenance is controlling the condition of rails, fixation elements, sleepers and vibration-dampening elements.

As a basis for the cost calculation of slab track two alternative structures were chosen. These were examined together with solutions based on the SAT S 312 system and System 304. Investment costs for slab track structure with System 304 are, depending on its length, between 486 000 and 503 000 € / track-km higher than for ballasted track. The maintenance of slab track was confirmed to be about 7 000 € / track-km / year more advantageous than for ballasted track. Therefore the amortization period of the investment would be between 69–72 years.

Slab track is a demanding special structure, which has not yet been realized in Finland in large-scale railway investments. Thus considerable attention must be put on the acquisition method of slab track. In the alternatives, the responsibility of the overall solution varies between the client and the entrepreneur. Basic solutions are 1) products approved by the client, where acceptable slab track solutions are defined, 2) realization

of a structure according to the plans of the client or 3) the entrepreneur, and 4) a model of service contract, where the client would buy railway capacity from the entrepreneur.

Because sufficient savings or advantages compared to the greater investment costs are not reached, the structure solution recommended to the tunnel section is traditional ballasted track. The overhead conductor rail is recommended to be installed in the tunnel section, because it considerably improves tunnel safety by its better fire resistance. Under sleeper pads are recommended to be installed to switches in the tunnel section to reduce maintenance. In addition, possibilities of under sleeper pads as a ground-borne noise dampening element in the office areas of Aviapolis and the airport should to be investigated.

Clear advantages of a slab track with the SAT S 312 system are better isolation of ground-borne noise and the possibility to change sleepers. Slab track based on the System 304 is cheaper to realize, but the anchoring of the sleeper into the base slab is problematic, and also the ground-borne noise isolation properties are lower. Slab track solutions should be investigated on new railway sections, where the demand for network capacity would be heavy from the start or on which there are wide areas with ground-borne noise level requirement of 30 dB.

ALKUSANAT

Kehäradan kiintoraideselvitys toteutettiin keväällä 2008 osana Kehäradan rata-suunnitelmaa. Työ tehtiin Ratahallintokeskuksen Rataverkko-osaston ohjauksessa Pöyry Infra Oy:n, Oy VR-Rata Ab:n rautatiesuunnittelun sekä Akukon Oy:n ja Vibkon Oy:n toimesta. Ratahallintokeskuksesta työryhmään kuuluivat ohjausryhmän puheenjohtajana tekninen johtaja Markku Nummelin sekä ylitarkastajat Maija Salonen, Tuomo Viitala ja Soile Tissari.

Kiintoraideselvityksen projektipäällikkönä toimi dipl.ins. Niko Tunninen tukenaan dipl.ins. Seppo Suhonen Pöyry Infra Oy:stä. Rakenne- ja tunnelisuunnittelun osaluilta selvityksen laadintaan osallistuivat dipl.ins. Mikko Inkala, dipl.ins. Jukka Salminen ja tekn. lis. Juhani Karri. Projektisihteerinä toimi kauppatiet. maist. Marko Nyby, joka vastasi myös kiintoraiteen kustannuslaskennasta.

Oy VR-Rata Ab:n rautatiesuunnittelusta selvitystä olivat tekemässä tekn. lis. Timo Cronvall, dipl.ins. Risto Ollila sekä ins. Jari Pollari.

Runkomelun vaimennukseen liittyvistä asiantuntijatehtävistä vastasivat Timo Peltonen Akukon Oy:stä ja Mats Backholm Vibkon Oy:stä. Tunnelin LVISAT-järjestelmien sovittamisesta kiintoraiteen suhteen asiantuntijoina toimivat dipl.ins. Matti Venelampi ja dipl.ins. Osmo Taulu Pöyry Building Services Oy:stä.

Työ toteutettiin yhteistyössä komponenttivalmistajien kanssa. Ranskalaisen Sateban SAT S 312 -järjestelmän edustajana toimi tuotantopäällikkö Markku Järveläinen Parma Oy:stä. Edilon)(sedran tuotteisiin liittyen mukana olivat Mats Frantzich sekä Ossi Welin. Vosslohin tuotteiden osalta mukana olivat Markku Salo Salomar Oy:stä sekä Winfried Bösterling ja Jörg Happe Vossloh Fastening Systems GmbH:sta. Runkomelun vaimennuksessa käytettävistä elementeistä tietoa saatiin Christian Berner Oy:ltä, josta mukana oli Tuomas Laitinen.

Työn yhteydessä järjestettiin kiintoraiteen rakenneseminaari huhtikuussa 2008. Työn perusteella laadittiin loppuraportti, jonka kokoamisesta vastasi Pöyry Infra Oy muun suunnitteluryhmän tuella.

Helsingissä, joulukuussa 2008

Ratahallintokeskus
Rataverkko-osasto

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	11
SAMMANDRAG.....	11
SUMMARY	11
ALKUSANAT.....	12
TERMISTÖÄ	16
1 JOHDANTO	17
1.1 Taustaa	17
1.2 Tutkimuksen sisältö	17
1.3 Tutkimusalueen rajaus	18
1.4 Tutkimuksen tavoitteet.....	18
2 KIINTORAIDERATKAISUT MAAILMALLA	19
2.1 Kiintoraiteen kuvaus ja rakennerratkaisujen luokittelu.....	19
2.2 Kiintoraiteen hyötyjä ja haittoja.....	21
2.3 Kiintoraiteen kustannukset.....	22
2.4 Kiintoraiteen rakennevaihtoehtoja.....	23
2.4.1 Rheda 2000 -rakenne	23
2.4.2 Züblin.....	27
2.4.3 Bögl	28
2.4.4 Shinkansen.....	30
2.4.5 SAT S 312 -järjestelmään perustuva kiintoraideratkaisu	31
2.4.6 Sonnevile LVT ja LVT-HA -rakennerratkaisut	33
2.4.7 Edilon Embedded Block System	35
2.4.8 Upotetut kiskojärjestelmät (Embedded Rail Systems)	37
3 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTIEN MÄÄRITTÄMINEN	39
3.1 Kehäradan tunneliosuus ja ratageometria	39
3.2 Kehäradan liikennöinti sekä rataan kohdistuva kuormitus	40
3.3 Kehäradan tunnelipoikkileikkaus.....	40
3.4 Tunnelin olosuhteiden sekä louhintamenetelmän asettamat lähtökohdat.....	41
3.5 LVISAT-järjestelyt	43
4 RAKENTEEN SUUNNITTELU.....	44
4.1 Rakenteellisen mitoituksen suunnitteluperusteet.....	44
4.1.1 Yleistä.....	44
4.1.2 Suunnittelun ja mitoituksen ohjeet	45
4.2 Kiintoraiteen asennusvälit.....	45
4.3 Kiintoraiteen rakenne ja komponentit.....	46
4.3.1 Yleistä	46
4.3.2 SAT S 312 -järjestelmä.....	46
4.3.3 Joustava kiskonkiinnitys (System 304)	48
4.3.4 Kantavan ja sitovan rakenteen toteutusvaihtoehdot	50
4.3.5 Perustaminen tunnelipohjaan.....	51

4.4	Tunnelipoikkileikkauksen optimointi	52
4.4.1	Yleistä	52
4.4.2	Tunnelipoikkileikkaukseen sovitettut rakenteet	53
4.5	Rakenteiden värähtelytarkastelu	55
4.6	Kiintoraidevaihte	57
4.7	Siirtymärakenteet	59
5	RUNKOMELUN VAIMENNUKSEN TARKASTELUT	61
5.1	Runkomelun esiintyminen	61
5.2	Runkomelurajat	61
5.3	Eristämättömän sepeliradan runkomelualueet ja eristysratkaisut	62
5.4	Eristämättömän kiintoraiteen runkomelualueet ja eristysratkaisut	62
5.5	Runkomelueristyksen mitoittamiseen vaikuttavia tekijöitä	63
5.6	Kiintoraidevaihtoehtojen tarkastelu	64
5.6.1	Kalossivaihtoehto (SAT S 312 -järjestelmä)	64
5.6.2	Joustava kiskonkiinnitys (System 304)	64
5.7	Eristyksen kustannukset	65
6	KIINTORAITEEN ASENNUS- JA KUNNOSSAPITOMENETELMÄT	66
6.1	Lähtökohdat	66
6.2	Rakenteiden asennustoleranssit	66
6.3	Kiintoraiteen asennusmenetelmät	66
6.4	Kiintoraiteen kunnossapitomenetelmät	67
7	KIINTORAITEEN KUSTANNUSARVIO	68
7.1	Kustannuslaskentaan liittyvät ongelmat ja käytetyt laskentamenetelmät	68
7.1.1	Operatiivisen laskentatoimen ongelmia ja niiden ratkaisuperusteita	68
7.1.2	Käytetyt laskentamenetelmät	69
7.2	Materiaali- ja asennuskustannukset	70
7.2.1	Kustannuslaskennan jakoperusteet, lähtöarvot ja muut oletukset	71
7.3	Kiintoraiteen ja sepeliraiteen kunnossapitokustannusten vertailu	73
7.4	Elinkaarikustannukset	74
7.5	Tulosten arviointi ja herkkyyshanalyysi	75
8	KIINTORAITEEN HANKINTAMENETTELYN VAIHTOEHDOT	76
9	MUUT SELVITETYT RAKENTEET	79
9.1	Kiintoajojohto	79
9.2	Pohjain	80
10	YHTEENVETO, PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET	82
10.1	Yleistä kiintoraiteesta	82
10.2	Kiintoraiderakenteen määrittäminen	82
10.2.1	Lähtökohdat	82
10.2.2	Rakenteiden määrittäminen	83
10.2.3	Rakenteen sovittaminen tunnelipoikkileikkaukseen	83
10.2.4	Kiintoraiteen erityisrakenteet	84
10.2.5	Runkomelun tarkastelut	84
10.3	Kiintoraiteen rakentaminen, kunnossapito ja hankintamenettelyt	84
10.4	Kiintoraiteen kustannustarkastelu	85

10.5 Suositukset86

LÄHDELUETTELO87

LIITTEET

Liite 1 Tutustumismatkat kiintoraidekohteisiin
Liite 2 Muodostetut tunnelipoikkileikkaukset

TERMISTÖÄ

ATU	Aukean tilan ulottuma (ATU) määrittää rajoitukset kiinteiden esteiden sijoittamiselle suhteessa rataan
Bottom-up -menetelmä	Kiintoraiteen rakennusmenetelmä, jossa rakentaminen tehdään rakenneosittain alhaalta ylöspäin
Bögl	Itävaltalainen esivalmistettuihin elementteihin perustuva kiintoraiderakenne
Edilon EBS	Hollantilainen betonilaatasta corcelast-massalla eristettyihin pölkkyihin perustuva kiintoraiderakenne (Embedded Block System)
Edilon ERS	Hollantilainen upotettuun kiskoon perustuva kiintoraiderakenne (Embedded Rail System)
Kiintoajojohto	Radan sähköjärjestelmä, jossa ajolanka on kiinnitetty esim. alumiiniseen profiliin ja voidaan tukea suoraan esim. tunnelikattoon
Kiintoraide	(Päällys)rakenne, jossa raide on tuettu esimerkiksi kiinteään betoni- tai asfalttilaataan.
Pintalaatta	kiintoraiteen rakenneosa, joka sitoo raiteen paikalleen ja välittää junakuorman alemmille rakenteille
Pohjain	Ratapölkyn alapintaan asennettava joustoelementti, jonka avulla voidaan parantaa sepelitukikerroksellisen päällysrakenteen pysyvyyttä sekä runkomelun eristystä
Pohjalaatta	Kiintoraiteen pohjarakenne, esim. maakosteasta betonista, joka jakaa sille välittyvän kuorman alla olevalle rakenteelle ja muodostaa tasaisen alustan pintalaatan ja raiteen asennusta varten
Raide	Raide koostuu kiskoista, kiskonkiinnitysjärjestelmästä ja ratapölkkyistä
Rheda 2000	Saksalainen kiintoraiderakenne, jossa erityisvalmisteiset pölkkyt valetaan kiinteästi osaksi betonilaattaa
Runkomelu	Ratarakenteiden ja maaperän välityksellä rakennuksiin kulkeutuva värähtely
SAT S 312 -järjestelmä	Ranskalaisen Sateban kiintoraiteen rakenneosajärjestelmä, johon kuuluvat kiskonkiinnityksellä varustetut erityismuotoillut pölkkyt, joustoelementti ja jäykkä muovinen kalossi
Shinkansen	Japanilainen, laajasti käytössä oleva, esivalmistettuihin elementteihin perustuva kiintoraiderakenne.
Siirtymärakenne	esim. kiinto- ja sepeliraiteen väliin tehtävä rakenne, joka tasaa erityyppisten rakenteiden käyttäytymiserot
Sonneville LVT ja LVT-HA	Sveitsiläisiä kiintoraidejärjestelmiä, jotka perustuvat kumikalossilla betonilaatasta eristettyihin pölkkyihin
System 304	Saksalaisen Vosslohin valmistama kiskonkiinnitysjärjestelmä kiintoraiderakenteille
Top-down -menetelmä	Kiintoraiteen rakennusmenetelmä, jossa raide perustetaan pohjalaatan päälle väliaikaisten tukien avulla ennen pintalaatan valua
Züblin	Saksalainen pitkälle koneistetusti toteutettava kiintoraiteen rakenne, jossa erityisvalmisteiset pölkkyt tärytetään kiinteästi osaksi pintalaattaa

1 JOHDANTO

1.1 Taustaa

Kehärata (aikaisemmin Marja-rata) on valtakunnallisesti merkittävä pääkaupunkiseudulle suunniteltu raideyhteys, joka yhdistää Vantaankosken radan Helsinki-Vantaan lentoaseman kautta pääraataan. Rata luo vahvan poikittaisen ratayhteyden Vantaan alueelle ja valmistuttuaan se palvelee kilometrin säteellä asemista noin 200 000 asukasta ja työpaikkaa.

Kehärata alittaa lentoasema-alueen Viinikkalan avoleikkausvaihtoehdon mukaisessa linjauksessa noin seitsemän kilometrin pituisessa kaksoistunnelissa, johon rakennetaan Aviapoliksen ja Lentoaseman tunneliasemat sekä varaudutaan Ruskeasannan aseman rakentamiseen. Aviapoliksen ja Lentoaseman välille toteutetaan lisäksi raiteenvaihtopaikka. Tunneliosuudella on harkittu radan päällysrakennetta toteutettavaksi kiintoraideratkaisuna, jossa perinteinen raidesevelitukikerros korvataan betonilaatalla. Rakenteen paremman pysyvyyden ansiosta ratkaisulla on mahdollista parantaa tunneliturvallisuutta ja vähentää radan kunnossapitotarvetta erityisesti raiteenvaihtopaikan sekä kaarteiden alueella. Lisäksi ratkaisun etuna on asemien parempi viihtyisyys.

Euroopassa ja muualla maailmalla on käytössä ja rakenteilla useita erityyppisiä kiintoraiteella toteutettuja rataosuuksia. Yleisimpiä käyttökohteita ovat tunneliosuudet, joissa kiintoraiteella on mahdollista saavuttaa etuja mm. muiden infratöiden investointikustannuksista saavutettavien säästöjen, alhaisemman kunnossapitotarpeen ja suuremman käytössä olevan liikenteellisen kapasiteetin ansiosta. Kaupunkiseutujen maankäytön yhä tiivistyessä joudutaan myös Suomessa jatkossa yhä useammin turvautumaan tunneliratkaisuihin, minkä seurauksena kiintoraiteella saavutettavien etujen ja toisaalta huomioon otettavien asioiden selvittäminen on muodostunut tarpeelliseksi.

1.2 Tutkimuksen sisältö

Kehäradan kiintoraiteen tutkimuksen sisältö määritettiin seuraavasti:

- keskeisten maailmalla käytettyjen kiintoraiteen rakenneratkaisujen periaatteiden, toteutusmenetelmien sekä käytön aikaisten kokemusten kartoitus
- kehäradan linjauksen, alueen olosuhteiden ja tunnelijärjestelmän asettamien suunnittelun lähtökohtien määrittäminen
- kiintoraiteen rakenteellisten mitoitusperusteiden laatiminen
- kiintoraiteen rakennevaihtoehtojen määrittäminen
- kiintoraiderakenteen sovittaminen tunnelipoikkileikkaukseen
- siirtymärakenteiden periaateratkaisujen määrittäminen kiinto- ja seveliraiteen välillä
- kiintoraidevaihteen suunnittelu asetettujen rakenteellisten lähtökohtien perusteella
- kiintoraiteen asennus- ja kunnossapitomenetelmien määrittäminen
- kiintoraiteen rakennus- ja kunnossapitokustannusten sekä elinkaarikustannusten arviointi.

1.3 Tutkimusalueen rajaus

Kiintoraiteen soveltuvuus tutkittiin Kehäradan linjauksen mukaiselle rautatietunnelille, mistä seuraavat mm. alla listatut hankekohtaiset lähtökohdat:

- radan liikennemäärä ja kuormitusolosuhteet
- kiintoraiteelle soveltuvat asennusvälit
- tunneliolosuhteet
- tunnelipoikkileikkauksen ja rakenteen mitoittavat tekijät
- asemien ja raiteenvaihtopaikan asettamat rajoitukset ja reunaehdot.

Kiintoraiderakenteen osalta selvitys rajattiin koskemaan Sateban SAT S 312 -järjestelmään sekä Vosslohin System 304 -kiinnitysjärjestelmään perustuvia ratkaisuja. Molemmissa järjestelmissä lähtökohdaksi asetettiin nykyisin käytössä oleva betoniratapölkky. Vertailukohtana selvitettäville rakenteille käytettiin ratasuunnitelman mukaista sepelikutikerroksella toteutettua rakennetta ja tunnelipoikkileikkausta.

1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteiksi asetettiin

- kiintoraiteen mahdollisuuksien sekä huomioon otettavien asioiden kartoittaminen
- kiintoraiteen toiminnallisten rakennevaihtoehtojen määrittäminen ja sovittaminen tunnelipoikkileikkaukseen asetetuista lähtökohdista
- elinkaarikustannuksiltaan edullisimman rakennevaihtoehdon määrittäminen Kehäradan tunneliosuudelle.

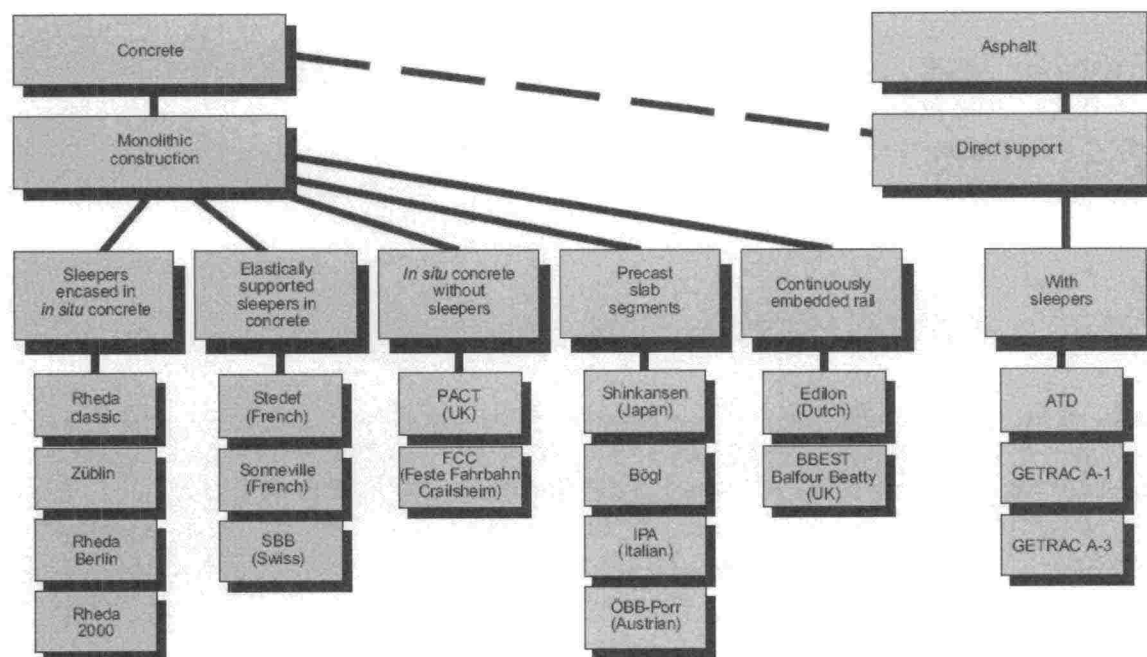
2 KIINTORAIDERATKAISUT MAAILMALLA

2.1 Kiintoraiteen kuvaus ja rakenneratkaisujen luokittelu

Kiintoraideratkaisussa perinteinen sepelitukikerroksellinen raide korvataan betoni- tai asfalttilaatan varaan tehtävällä raiteella. Tukirakenteena voi olla myös teräsrunko. Kiintoraiteesta on maailmalla käytössä useita erilaisia rakenneratkaisuja, jotka perustuvat usein maakohtaisiin historiallisiin sekä tuotantoteknisiin lähtökohtiin. Yleisimmät ratkaisut perustuvat perinteisiin raiteen komponentteihin: pölkkyihin, kiskonkiinnitysjärjestelmään sekä kiskoon. Näiden lisäksi on kehitetty ratkaisuja, jotka perustuvat esivalmistettuihin elementteihin tai jatkuvasti tuettuun kiskoon. /1/2/8/

Kiintoraideratkaisuja on käytössä mm. Japanissa, Sveitsissä, Saksassa, Ranskassa ja Isossa-Britanniassa 1960-luvulta alkaen. Yleisintä käyttö on ollut Japanissa, jossa kiintoraideita on rakennettu noin 2700 km. Saksassa on 1990-luvun alussa tehty päätös rakentaa kaikki uudet nopean liikenteen radat kiintoraiteena. /3/. Itävallassa rakennusstandardit edellyttävät kiintoraiteen käyttöä tunneleissa ja yli 500-metrisillä silloilla /4/.

Maailmalla käytetyt kiintoraideratkaisut on jaettu betoni- tai asfalttilaataan perustuvien rakenteiden osalta kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1. Kiintoraideratkaisujen luokittelu rakenteen perusteella. /3/

Kiintoraiteen perusratkaisuissa (kuva 1) komponentit ovat seuraavat /3/:

- *Sleepers encased in in-situ concrete*: raiteen komponentteina ovat pölkyt, kiskonkiinnitysjärjestelmä sekä kisko. Raide valetaan pölkköjen yläpintaan asti kiinteästi osaksi kiintoraiderakennetta. Uudemmissa rakenteissa (Züblin, Rheda 2000, Rheda Berlin) pölkköjen ankkurointia laataan sekä kiskonkiinnitysjärjestelmää on kehitetty.
- *Elastically supported sleepers in concrete*: raiteen komponentteina ovat pölkyt, kiskonkiinnitysjärjestelmä sekä kisko. Pölkyt on eristetty betonilaatasta kumista tai muovista valmistetulla kalossilla. Lisäksi kalossiin voidaan sijoittaa runkomelun vaimennusta sekä rakenteen joustoa lisäävä elementti.
- *In-situ concrete without sleepers*: raiteen komponentteja ovat kisko ja kiskonkiinnitysjärjestelmä, joka valetaan osaksi betonilaattaa.
- *Precast slab segments*: raide valmistetaan kiskoista sekä esivalmistetuista elementeistä, joihin on esiasennettu kiskonkiinnitysjärjestelmä.
- *Continuously embedded rail*: kisko tukeutuu jatkuvasti betonilaataan, johon on muotoiltu urat kiskojen sijoittamista varten. Kisko tuetaan pohjalta ja sivuilta myös jousto-ominaisuuksia omaavilla elementeillä, joilla säädetään ratageometriä. Ei pölkköjä eikä perinteistä kiskonkiinnitysjärjestelmää.
- *Direct support with asphalt/concrete slab*: raiteen komponentteina ovat pölkyt, kiskonkiinnitysjärjestelmä sekä kisko. Raide asennetaan asfaltti/betonilaatan päälle.

Kiintoraiteen rakennusmenetelmät voidaan jakaa ”bottom-up” ja ”top-down” -menetelmiin. Bottom-up-menetelmässä rata rakennetaan kerroksittain tarkkojen toleranssien rajoissa. Lopullinen linjaus ja korkeustaso saavutetaan yleensä eripaksuisten aluslevyjen avulla. Top-down-menetelmässä raide asetetaan oikeaan linjaukseen ja korkeustasoon tilapäisten rakenteiden avulla, minkä jälkeen raide sidotaan paikalleen pintalaatan avulla. Top-down-menetelmän avulla saavutetaan usein parempi lopputulos, koska asennustarkkuus on parempi ja radan lujuus pysyy tasalaatuisempana. /3/

Raitioteillä, mm. Helsingissä, rakenteen perusratkaisuna on yleensä betonilaataan tuettu raide, joka on perustettu katupohjan tavoin tiivistetylle murskekerrokselle. Helsingissä käytetyssä rakenteessa urakiskojen alapuolelle on valettu kantava laatta kuitubetonista K40-2. Kiskojen väliselle osuudelle valetaan katurakenteessa yleensä säänkestävä betoni. Verhous voidaan toteuttaa myös kiveyksellä. Rautateistä poiketen perusrakenteessa ei ole erillistä joustoelementtiä. Raitioteiden linkaari vaihtelee muutamasta vuodesta yli kymmeneen riippuen liikennemäärästä sekä ratageometriasta, jossa on tyypillisesti jouduttu käyttämään tiukkoja kaarresäteitä. Lisäksi kulutusta lisää jarrutushiekan käyttö tarpeellisilla alueilla. /5/

2.2 Kiintoraiteen hyötyjä ja haittoja

Kiintoraiteen vertailukohtana on tavanomainen raide. Kiintoraiteen käytöllä pyritään alhaisempaan kunnossapitotarpeeseen, minkä ansiosta pitkän aikavälin ylläpito-kustannukset ovat alhaisemmat ja käytössä oleva liikenteellinen ratakapasiteetti on suurempi. Tunnelien ja siltojen yhteydessä kiintoraiteella on mahdollista saavuttaa säästöjä kiintoraiteen pysyvyyden, pienempien toleranssivaatimusten sekä ohuemman rakenteen ansiosta. Kiintoraiteen runkomelun ja tärinän vaimennukseen on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota, koska rakenne on lähtökohtaisesti sepeliraidetta jäykempi.

Kiintoraiteelle esitettyjä hyötyjä sepeliraidteeseen nähden on kuvattu taulukossa 1 ja haittoja taulukossa 2. Hyötyjä arvioitaessa on muistettava, että niiden toteutuminen edellyttää erityistä huolellisuutta kiintoraiteen suunnittelussa ja rakentamisessa.

Taulukko 1. Kiintoraiteelle esitettyjä hyötyjä aiemmissä tutkimuksissa /1/2/3/4/6/8/9/.

<p>Kustannukset</p> <ul style="list-style-type: none"> – alhaisemmat kunnossapitokustannukset kuin sepeliradassa, koska: <ul style="list-style-type: none"> ▪ kiintoraide vaatii vähemmän kunnossapitoa ▪ osaavan kunnossapitohenkilökunnan vaikeampi saatavuus tulevaisuudessa, jolloin kunnossapidon palkkakustannukset todennäköisesti nousevat → kiintoraiteen kustannusetu kasvaisi jatkossa – säästöt muiden infrarakenteiden (tunneli, silta) investointikustannuksissa pienemmän tilantarpeen ansiosta
<p>Rakenteelliset hyödyt</p> <ul style="list-style-type: none"> – matalampi rakennekorkeus → pienempi tilantarve – ratageometrian säilyminen samana rakenteen koko käyttöajan → pienempi tilantarve, alhaisempi kunnossapitotarve – radan jäykkyysominaisuudet ovat tasalaatuiset, jolloin kiskon kuluminen vähenee/vakioituu – sepelin jauhautumisongelman poistuminen etenkin suurissa nopeuksissa – suurempi poikittaissuuntainen resistanssi sekä vaakasuuntaisten voimien kesto mahdollistavat <ul style="list-style-type: none"> ▪ pienemmän kaarresäteen sekä suuremman kallistuksen ▪ nopeudennoston yhdessä kallistuvakoritekniikan kanssa
<p>Liikenteelliset hyödyt</p> <ul style="list-style-type: none"> – suurempi käytettävissä oleva ratakapasiteetti vähäisemmän kunnossapitotarpeen ansiosta – rakenteen pitempi käyttöikä → suurempi ratakapasiteetti myös korvaus- ja kehittämisinvestointien vähenemisenä – tasaisempi junien kulku etenkin suurissa nopeuksissa
<p>Runkomelu, tärinä, ympäristökuormitus</p> <ul style="list-style-type: none"> – runkomelun ja tärinän vaimennukseen löydettävissä tehokkaita ratkaisuja – ympäristökuormituksen väheneminen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ kivi- ja muita maa-aineksia tarvitaan jo rakennusvaiheessa 30–40 % vähemmän kuin sepeliraidteessa ▪ kemiallinen rikkaruohontorjunta ei tarpeen
<p>Muita hyötyjä</p> <ul style="list-style-type: none"> – hyvä sähköeristys tietyillä rakenteilla

Taulukko 2. Kiintoraiteelle esitettyjä haittoja aiemmissa tutkimuksissa /1/2/3/4/6/8/9/.

Kustannukset	
–	korkeammat investointikustannukset kuin sepeliraiteessa <ul style="list-style-type: none"> ▪ tunneliin ja sillalle rakennettavan kiintoraiteen ja sepeliraiteen investointikustannukset voivat kuitenkin olla lähes yhtä suuret
–	korkeammat korjauskustannukset kuin sepeliraiteessa esim. onnettomuustilanteessa
Rakenteelliset haitat	
–	rakentaminen vaatii hyvin tiukkoja toleransseja
–	radan vaakageometrian muutokset vaativat raskaita toimenpiteitä (noin 20 mm korkeusaseman säätö kuitenkin useilla rakenteilla mahdollinen)
–	tiukat vaatimukset pohjamaan painumalle avorataosuuksilla
Liikenteelliset haitat	
–	soveltuu rakentamisen vaatiman totaalikatkon vuoksi hyvin vain uusille ratalinjoille
–	korjaustilanteissa korjaus kestää kauemmin ja on monimutkaisempaa kuin sepeliraiteessa
Runkomelu, värinä, ympäristökuormitus	
–	runkomelun ja värinän vaimennuksen toteuttaminen vaatii kalliita eristysratkaisuja

2.3 Kiintoraiteen kustannukset

Kiintoraideratkaisuille ilmoitetut investointi- ja kunnossapitokustannukset ovat varsin epätarkkoja mm. vahvasti valmistajariippuvaisen kustannustiedon vuoksi. /3/ Kiintoraiteen investointi- ja kunnossapitokustannuksista on esitetty taulukon 3 mukaisia arvioita. Taulukosta nähdään, että täsmällisen tapauskohtaisen kustannusarvion antaminen kiinto- tai sepeliraiteen valinnalle on varsin haastavaa.

Taulukko 3. Kiintoraiteen investointi- ja kunnossapitokustannuksia aiemmissa tutkimuksissa /3/5/7/9/.

Kustannuslaji	Vs. sepelirata	€/m	Lähde
Investointi	+50 % ⇔ +75% (Saksa)	n/a	Sagar & Verma 2007, 19
Investointi	+100 % (Espanja) (1)	n/a	Sagar & Verma 2007, 19
Investointi	+27 % (Rheda)	1270 (2)	Esveld 1999, 5
Investointi	+20 % (hollantilainen ERS)	1200 (2)	Esveld 1999, 5
Investointi	-9 % (optimoitu ERS)	910 (2)	Esveld 1999, 5
Investointi	+30 % ⇔ +50 % (Japani)	n/a	Bastin 2006, 38
Investointi	+15 % ⇔ +25 % (BalfourBeatty ERS)	n/a	Penny 2006, 3
Kunnossapito / a	-85 % ⇔ -90 % (Saksa)	n/a	Bastin 2006, 38
Kunnossapito / a	-50 % (Espanja) (1)	n/a	Sagar & Verma 2007, 19
Kunnossapito / a	-9 % (Rheda)	100 (2)	Esveld 1999, 5
Kunnossapito / a	-18 % (hollantilainen ERS)	90 (2)	Esveld 1999, 5
Kunnossapito / a	-37 % (optimoitu ERS)	70 (2)	Esveld 1999, 5
Kunnossapito / a	-30 % (Japani)	n/a	Bastin 2006, 38

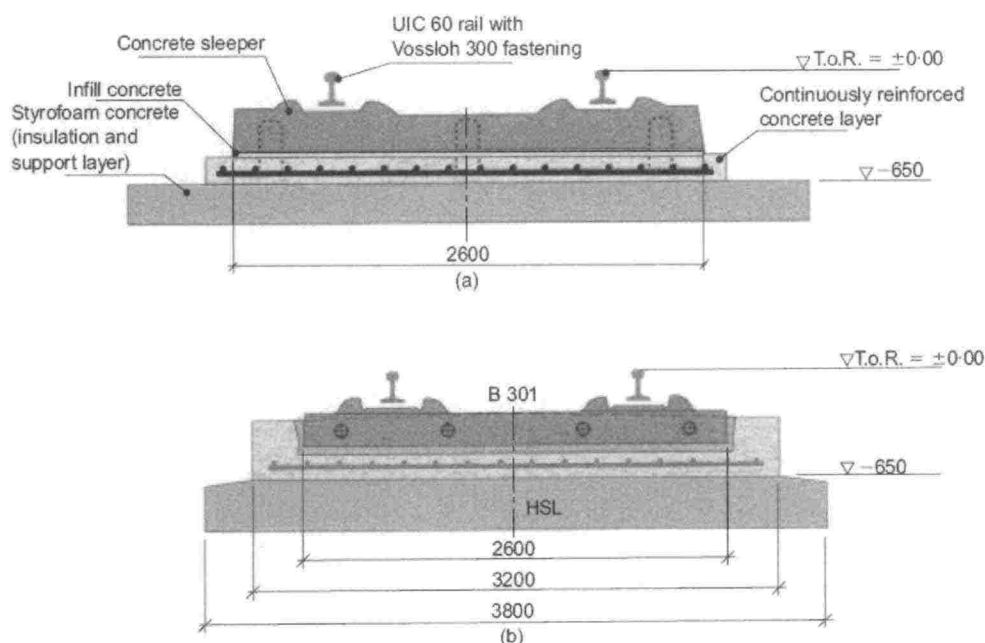
(1) Kiintoraiteen tekniseksi käyttöikäksi on oletettu 60 vuotta, sepeliradan 30 vuotta.
 (2) Suurnopeusvaatimukset täyttävän sepeliraiteen vertailuhinta investoinnin osalta 1000 €/m, kunnossapidon 110 €/m. ERS = Embedded Rail System.

Valintaperusteena kiintoraiteen ja sepelitukikerroksellisen raiteen välillä tulee käyttää elinkaarikustannustarkastelua, jossa kaikki käyttöiän aikana muodostuvat kustannukset otetaan huomioon.

2.4 Kiintoraiteen rakennevaihtoehtoja

2.4.1 Rheda 2000 -rakenne

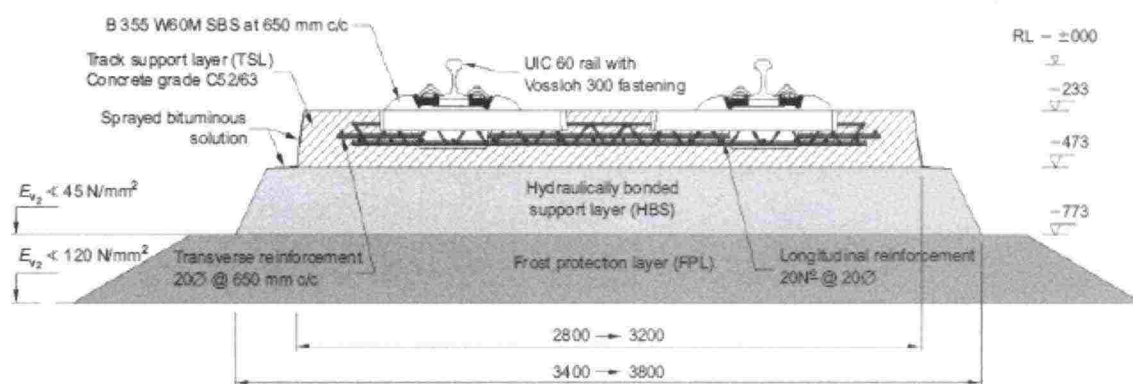
Rheda 2000 on mm. Pfeleidererin ja RAIL.ONE'n valmistama kiintoraiderakenne, joka on kehitetty v. 1972 käyttöön otetusta Rheda Classic -mallista. Rheda 2000 on yksi DB:n valitsemista kiintoraiteen standardirakenteista Saksassa. Ensimmäisiä Rheda-malleja oli myös Rheda Sengeberg, joka asennettiin tunneliosuudelle. Rheda Classic ja Rheda Sengeberg -rakenteiden poikkileikkaukset on esitetty kuvassa 2.



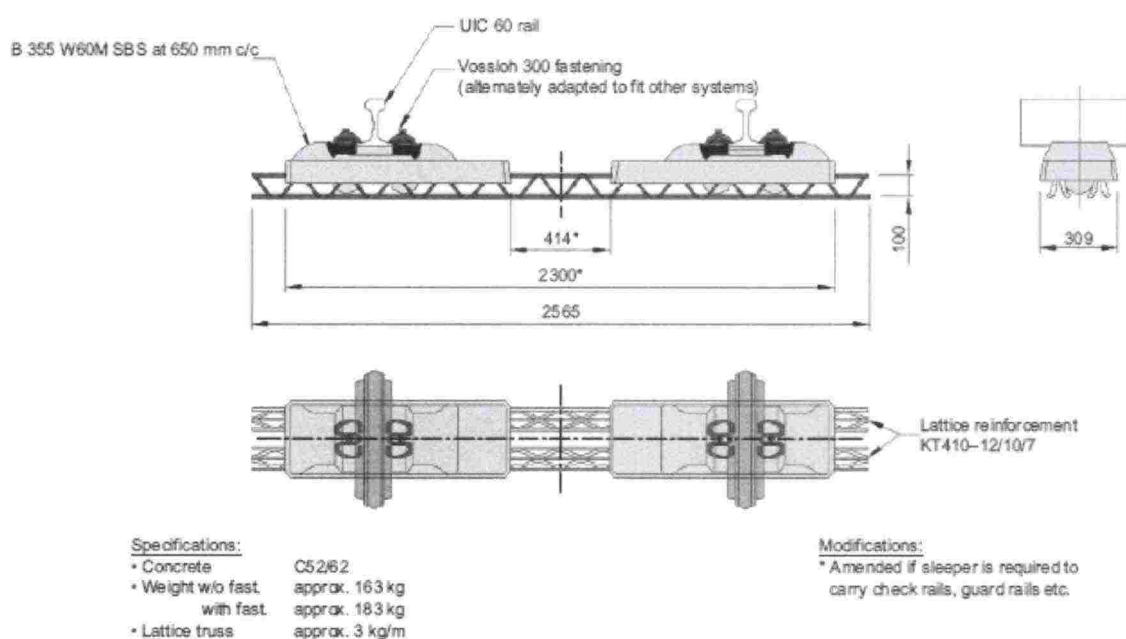
Kuva 2. Rheda Classic (ylinnä) ja Rheda Sengeberg -rakenteet. /3/

Rheda 2000 -rakenne perustuu 240-milliselle betonilaatalle, jonka päälle asennetaan kaksiosainen, teräsvahvisteilla yhdistetty, esivalmistettu ristikkopalkkipölkky /3/10/. Ristikkopalkkirakenne on vain osittain integroitu pölkkyyn, joten valettaessa lisättävä betoni liittyy ristikkopalkin tukevasti betonilaattaan /10/. Rakenteen syvyys sidotun kerroksen (ns. HBS-laatta) yläpintaan on 473 mm. Kiskonkiinnityksenä on pääsääntöisesti käytetty Vosslohin System 300 -kiinnitysjärjestelmää, jossa on erillinen jousto-elementti kiskon ja pölkyn välissä.

Rheda 2000 -rakenne maanvaraisella alusrakenteella esitetään kuvassa 3 ja rakenteeseen kuuluva kaksiosainen pölkky kuvassa 4. Tunneleissa käytettävän betonilaatan leveydeksi on hyväksytty 2800 mm v. 2003 /3/.



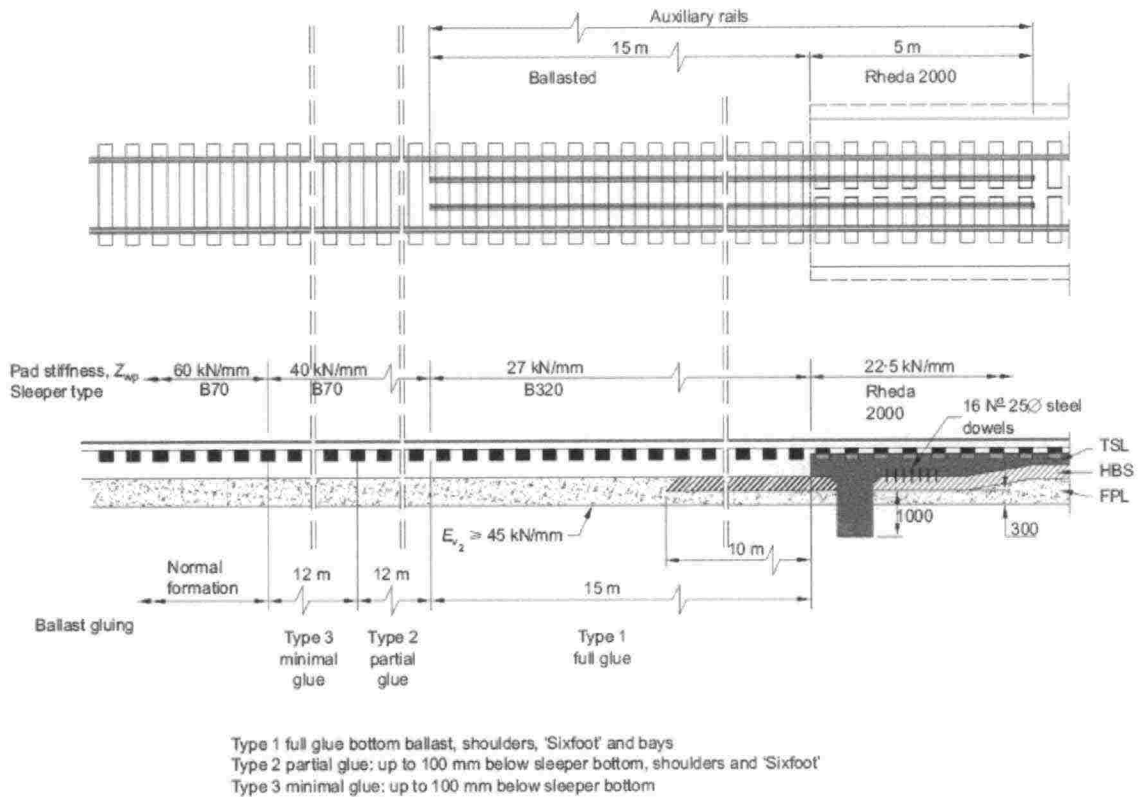
Kuva 3. Rheda 2000 -rakenteen maanvaraisesti perustettuna. /3/



Kuva 4. Rheda 2000 -rakenteen pölkky. /3/

Rakenteessa betoniin integroitu pölkky jakaa kuormituksen suoraan kiskoilta ja aluslaatoilta betonilaataan. Pituussuuntaiset raudoitustangot on sijoitettu laatan neutraaliakselille. Ne on tarkoitettu varmistamaan halkeamien tasaisen jakautumisen, rajoittamaan halkeamien leveyttä sekä siirtämään leikkausvoimia halkeaman puolelta toiselle. Koska raudoitustangot eivät Rheda 2000:n tapauksessa lisää taivutuslujuutta, kiintoraide on rakennettava hyvin vähän painuvalle perustalle. /3/

Rheda 2000 -rakenteen ja sepeliraitteen välisen siirtymärakenne on esitetty kuvassa 5. Siirtymärakenteella tasoitetaan rakenteiden erilaisesta elastisesta käyttäytymisestä johtuvaa painumaeroa sekä rajoitetaan rakenteen komponenteille kohdistuvia voimia. Lisäksi sillä rajoitetaan sepelin aikaa myöten tapahtuvaa painumista. /3/



Kuva 5. Rheda 2000-kiintoraiteen ja sepeliradan siirtymärakenne. /3/

Rheda 2000-kiintoraiteen asennus toteutetaan top-down-menetelmällä ja sen työvaiheet ovat seuraavat: /3/10/

1. [Asennetaan routasuojakerros (FPL, Frost Protection Layer); tätä vaihetta ei tarvittane tunnelissa]
2. Betonilaatta (HBS, Hydraulically Bound Support Layer) tehdään valamiskoneella liukuvaluna. Toleranssi $\pm 15 \text{ mm}$. Liikuntasauvoja ei sellaisenaan ole, mutta laataan tehdään noin puoleen syvyyteen saakka ulottuvat saumakohtat 5 metrin välein. Laatan annetaan kovettua neljä päivää, minä aikana sitä pidetään märkinä.
3. Pitkäksi hitsatut kiskot (tai työnaikaiset lyhyet kiskot; ks. kohta 8.) asetetaan HBS-laatan reunoille.
4. Pölkkyt asetetaan paikoilleen. Pitkittäiset ja poikittaiset raudoitustangot kiinnitetään. [B 355 W60M SBS-pölkkyissä on ylimääräiset ulokkeet pölkyn alapinnassa, joiden ansiosta pölkky kantaa kevyen rakennusaikaisen liikenteen asetettuna suoraan HBS:n päälle.]
5. Kiskot siirretään paikoilleen pölkkyjen päälle.
6. Rata tuetaan oikeaan linjaukseen ja korkeustasoon. Tarkkuusvaatimus on 1 mm/5 m sekä pysty- että sivusuunnassa. Työvaiheessa käytetään levitysrautoja (spreader-bar) sekä pölkkyihin kiinnitettäviä karoja/tappeja (spindle).
7. HBS ja radan ristikkorakenne puhdistetaan ja kastellaan ennen betonivalua.

8. TSL-betoni valetaan yhtenäisenä ilman liikuntasauvoja. Valamisvaiheen aikana pölkyn alle syntyvät kuplat yritetään poistaa joko täryttämällä betonia 1–3 tuntia valamisen jälkeen tai löysäämällä pölkkyjen tukikaroja, jolloin rata laskeutuu teoriassa 0,25 mm. Jos lämpötila muuttuu betonivalun ja tukirakenteen poistamisen välillä, kiskonkiinnitykset on irrotettava kiskoista lämpölaajenemisen välttämiseksi. Tämä voidaan välttää työaikaisten lyhyiden kiskojen käyttämisellä, jotka korvataan myöhemmin pitkillä kiskoilla.
9. Pitkät kiskot hitsataan jatkuviksi ja jännitteet poistetaan.
10. Raiteiden välinen tila ("Sixfoot" space) täytetään betonilla tai asfaltilla, ettei sadevesi pääse alusrakenteisiin. Suoralla välitilaa kallistetaan, kaarteessa se on salaojitettu.
11. TSL-laatan sivut ja HBS-laatan esilläolevat osat ruiskutetaan bitumintapaisella nesteellä.
12. Kiintoraide suojataan sivuilta sepelikerroksella.
13. Halkeamien syntymisen estämiseksi betonin tulisi kovettua 28 päivää ennen radan käyttöönottoa.

Yllä oleva työvaihekuvaus koskee maanvaraista avorataa.

Työsuoritteiden kannalta mielenkiintoisin hanke lienee keväällä 2007 käyttöönotettu, Amsterdamin ja Brysselin välille rakennettu 80 km:n kaksoisraiteinen kiintoraideosuus, jolla on kaksi kahden kilometrin upotettua tunnelia ja yksi kahdeksan kilometrin porattu tunneli /11/. Rataosuudella on saavutettu kehitetyillä työmenetelmillä keskimääräinen työsuorite 300 m/vrk huippuarvojen vaihdellessa välillä 400–490 m/vrk /11/. Kyseisen rataosuuden tunneliosuuksilla keskimääräiseksi työsuoritteeksi saatiin kuitenkin ainoastaan 140 m/vrk. Työsuorite riippui vahvasti tunnelipoikkileikkauksesta sekä etäisyydestä tunnelin suuaukkoihin ja tunnelien välissä oleviin oviaukkoihin.

Amsterdamin ja Brysselin välisen rataosuuden kehitetyillä työmenetelmillä pyrittiin mahdollisimman suureen koneellistamiseen eri työvaiheissa, eri työvaiheiden välisen riippuvuuden vähentämiseen sekä työturvallisuuden ja laadun parantamiseen. Erityishaasteina kiintoraidehankkeessa olivat erittäin tiukka aikataulu sekä erittäin tiukat laatuvaatimukset¹. Hankkeen aikana työ opittiin tekemään jonkin verran nopeammin; esimerkiksi tunneleissa miestyötunti/tunnelimetri-suhdeluvun liukuva keskiarvo oli vuoden 2005 alussa 8,6 ja vuoden lopussa 4,5. Tämä johtui osaltaan pilottivaiheesta, jossa tunnelitöitä harjoiteltiin lyhyellä rataosuudella pienemmällä aikataulupaineella. Muiden tehtävien osalta hankkeen aikana koettu oppimiskäyrä oli loivempi. /11/

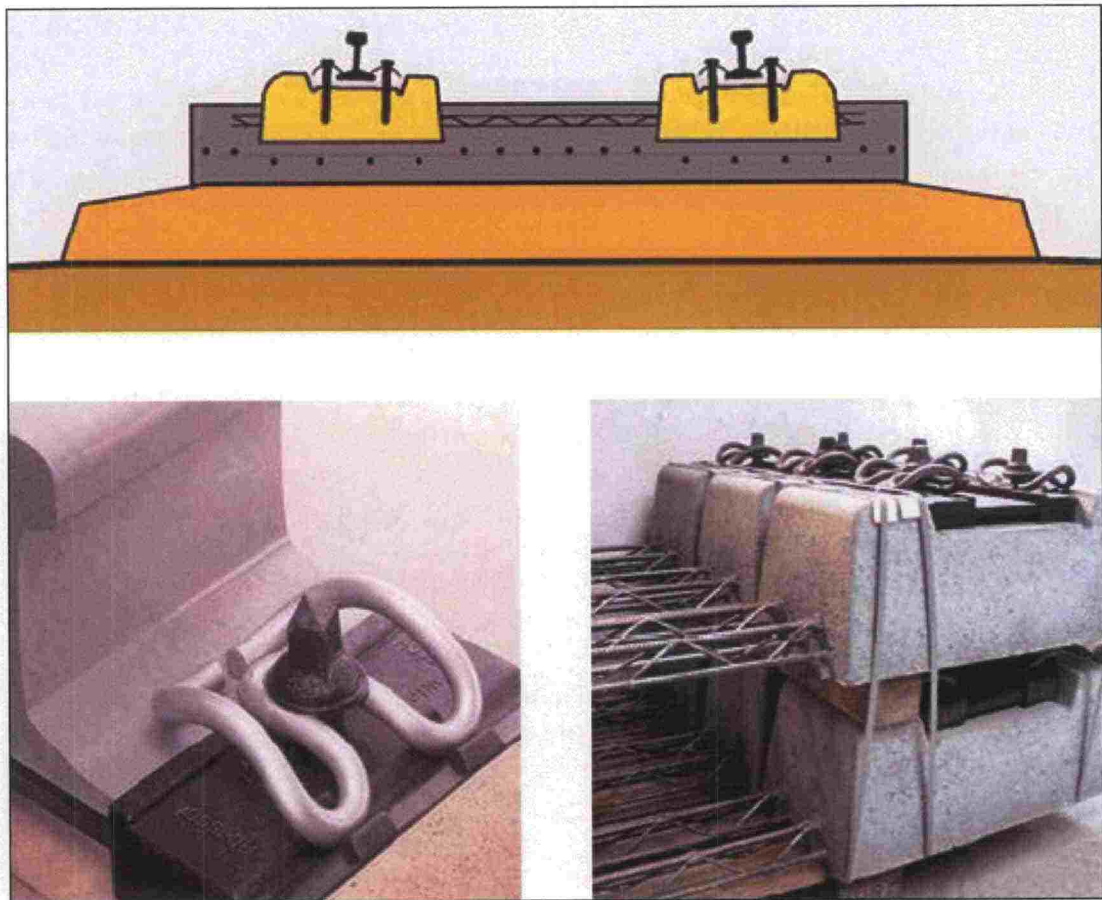
¹ Tässä hankkeessa suurnopeusradalle asetettujen laatuvaatimusten lisäksi rakentajalla on kiintoraiteen ylläpitovastuu 25 vuoden ajalta. Lisäksi radan käytettävyyksivaatimus on 99 %.

Rheda 2000 -rakenteen korjaustoimenpiteistä on tarkempi kuvaus lähteessä /12/. Korjausmahdollisuuksia ovat mm. /12/

- Kiskonkiinnityselementtejä voidaan säätää pystysuunnassa $+26 \Leftrightarrow -4$ mm ja sivusuunnassa ± 5 mm, jos pölkyt ovat ehjiä.
- Kiskonjalka/tukipistevaurio on myös paikattavissa.
- Pölkkyjen irtoaminen betonista on Rheda 2000 -ristikkopölkyn yhteydessä harvinainen vaurio ja se johtuu rakennuksen aikaisesta valuvirheestä. Se on korjattavissa vaihtamalla pölkky ja sitä ympäröivä betoni; tarvittavasta työajasta lähde ei kerro.
- Radalta suistumisesta aiheutuneet betonilaattavauriot ovat korjattavissa poistamalla vioittuneet pölkyt, tukemalla rata ja valamalla betoni uudestaan etenkin, jos tukiristikkorakenteessa ei ole vaurioita.

2.4.2 Züblin

Züblin on toinen kolmesta DB:n valitsemasta saksalaisesta kiintoraidestandardista. Züblin-rakenne perustuu paikalla valettavaan, raudoitettuun betonilaattaan, johon erityisvalmisteiset kaksiosaiset pölköt asennetaan täryttämällä. Rakenne toteutetaan pitkälti koneistetulla menetelmällä, minkä ansiosta työsuorite on suurempi verrattuna esim. Rheda-rakenteisiin. Züblin-rakenteen havainnepiirroksia on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Züblin-kiintoraiteen havainnekuva /13/.

Züblin-rakenne toteutetaan seuraavasti: /3/

1. Rakenteen pohjaksi valetaan valamiskoneella HBS-laatta (Hydraulically Bonded Support Layer).
2. Liikkuessaan toiseen suuntaan valamiskone valaa HBS-laatan päälle TSL (Track Support Layer) -laatan, jonka raudoitus on asennettu paikalleen ennen valua.
3. Välittömästi TSL-laatan valun jälkeen upotetaan erityisen asennuskoneen avulla viisi kaksiosaista pölkkyä asennuskehikon avulla märkään betoniin.
4. Asennuskone täyttää pölkkyt oikeaan geometriseen asemaan asennuskehikon avulla. Geometrinen asema määritellään tietokoneistetuilla teodoliiteilla, joiden kiintopisteinä on edellinen asennuskehikko.
5. Betonilaatan pinta viimeistellään käsityönä.
6. Betonin kovettuttua riittävästi asennuskehikko irrotetaan pölkkyistä.
7. Halkeamien välttämiseksi kiskot asennetaan paikoilleen vasta kun betoni on kovettunut.

Kiskonkiinnityksessä voidaan käyttää ensisijaisesti Vosslohin, mutta myös muiden valmistajien tuotteita. Kiskonkiinnitysten kunnossapitoon ja korjauksiin Züblin ei ota kantaa, vaan ne määräytynevät kunkin valmistajan omien ohjeiden perusteella.

Züblin-rakennetta käytettäessä asennuskoneen mahtuminen tunneliin on epäselvää. Vaihtoehtoinen manuaalinen työmenetelmä on kuvattu sanoilla ”advanced manual rail installation system with lifting and levelling device specifically adapted to site requirements”.

Züblin-rakenne on toiminut Waghäuselissa kallistettuna viisi vuotta ilman kunnossapitoa ja korjausta. Rakenteen pitkäaikaiskestävyydestä, kunnossapito- ja korjaustarpeesta sekä kunnossapitomenetelmistä ei ollut saatavilla tarkkaa tietoa.

2.4.3 Bögl

Bögl on kolmas Saksassa hyväksytyistä kiintoraiteen standardirakenteista. Bögl-rakenne perustuu maksimissaan 6450 mm pitkiin, pituussuunnassa vahvistettuihin esivalmistettuihin elementtibetonilaattoihin, jotka liitetään toisiinsa terästankojen ja betonivalun avulla. Yksittäinen betonilaatta painaa noin yhdeksän tonnia. Lopputuloksena on saumaton rakenne, jossa paikalla valettavan betonisauman leveys on noin 50 mm. /14/. Ensimmäinen 430-metrinen Bögl-koeraide asennettiin v. 1977 Karlsfeldin lähelle rataosuudelle, jonka kuormitusmäärä on yli 30 Mbrt vuodessa. Valmistajan mukaan rakenne ei ole vaatinut merkittävää kunnossapitoa tai korjausta 27 vuoden aikana.

Rakenteen korkeus on 474 mm, jos kantavana pohjalaattana käytetään 200 mm betoni-laattaa. Kiskonkiinnitysjärjestelmänä voidaan käyttää maakohtaisesti käytössä olevaa järjestelmää kuten Vosslohin, Kruppin ja Pandrolin tuotteita. Kiskonkiinnitysten kunnossapitoon ja korjauksiin Bögl ei ota kantaa, vaan ne määräytynevät kunkin valmistajan omien ohjeiden perusteella. Bögl-rakenteen keskeiset mitat on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Bögl-kiintoraiteen keskeiset mitat /14/.

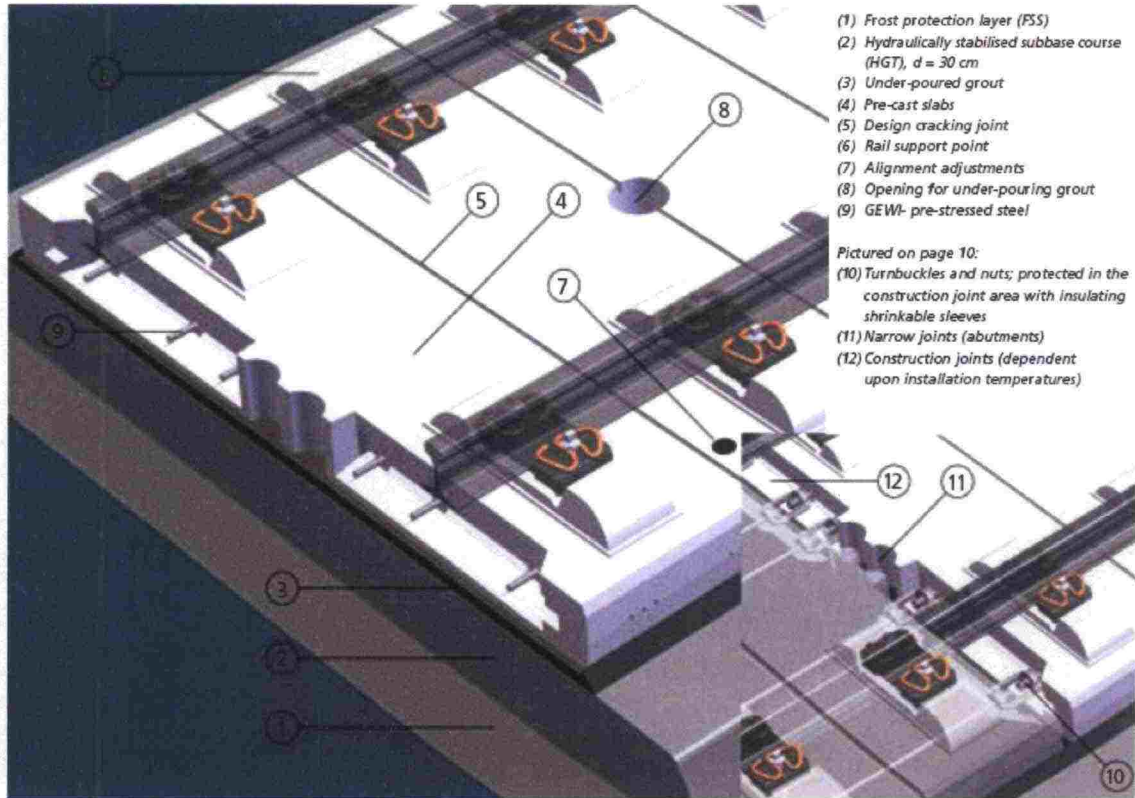
Technical data of the FF Bögl System:	
Construction height (from OK HGT to OK rails):	474 mm
Slab length (System length: nominal 6.5 m):	6,45 m
Slab width:	2,55 m
Slab height:	0,20 m
Concrete class:	(B 55) C45/55
Rail supports:	10 pairs per slab; spacing 650 mm
Pre-tensioning:	transversal
Lengthwise coupling:	with 6x GEWI steel bars

Bögl-rakenteen komponentit on esitetty kuvassa 7. Rakenteen asennukseen kuuluvat seuraavat työvaiheet: /3/14/

1. [Asennetaan soraan perustuva routasuojakerros (FPL, Frost Protection Layer); tätä vaihetta ei tarvita tunnelissa]
2. Tunnelin kyseessä ollen valetaan betonilaatta (HBS, Hydraulically Bound Support Layer) pohjalle, jonka korkeusvaihtelut ovat max. 5 mm täyttölaastin määrän vähentämiseksi.
3. Elementtilaatat tuodaan aiemmin mitatulle asennuspaikalle 50 mm välein; kaarteissa laatat tuodaan paikalle tehtaalla numeroidussa järjestyksessä. Toleranssi ± 10 mm.
4. Elementtilaatat sijoitetaan paikoilleen hiusviivatarkkuudella ja säädetään oikeaan tasoon nostoruuvien (screw jack, kuva 6, kohta 7) avulla. Toleranssi ± 1 mm, tavoite $\pm 0,5$ mm.
5. Elementtilaattojen ulkoreunat saumataan betonilaastilla.
6. Bitumi tai sementtilaasti injektoidaan laastiaukoista (kuva 6, kohta 8) elementtilaatan keskellä 30-milliseksi kerrokseksi.
7. Laattojen väliset saumat täytetään laastilla.
8. Kapeat liitokset (kuva 6, kohta 11) täytetään laastilla.
9. Terästangot liitetään toisiinsa ja puristetaan yhteen jännelukon (turnbuckle) ja liitosmutterin avulla.
10. Leveät liitokset (kuva 6, kohta 12) täytetään laastilla.
11. 120-metriset kiskot puretaan ja asennetaan paikoilleen sekä hitsataan jatkuviksi.

Valmistajan mukaan kiintoraidetta voidaan rakentaa tunneliolosuhteissa 360 metriä vuorokaudessa, jos työtä tehdään kahdessa 8 tunnin vuorossa. Bögl-rakenteen kustannuksia nostava tekijöitä ovat elementtitehtaan perustaminen ja kuljetukset työmaalle.

Bögl-rakenteen kunnossapitoa ei itse laatan osalta valmistajan mukaan tarvita, ellei pohjamaa liiku laattojen alla. Jos näin tapahtuu, saumaustaastikerrokseen voidaan sahata viilto, laatan korkeusasemaa säättää säätökaravan avulla maksimissaan 76 mm ja täyttää uudestaan saumaustaastilla. Mahdollisen kiskoiltasuistumisen seurauksena vaurioituneet elementtilaatat voidaan valmistajan mukaan vaihtaa uusiin muutaman tunnin työraossa. Valmistaja tarjoaa myös kiskoiltasuistumisen estävää rakennetta sekä lisälaattaa, joka mahdollistaa kumipyöräajoneuvojen käytön tunneleissa. Lisälaatta on kuitenkin purettava osiin esimerkiksi kiskonkiinnitysten tarkastusten yhteydessä.



Kuva 7. Bögl -rakenteen rakenneosat /3/.

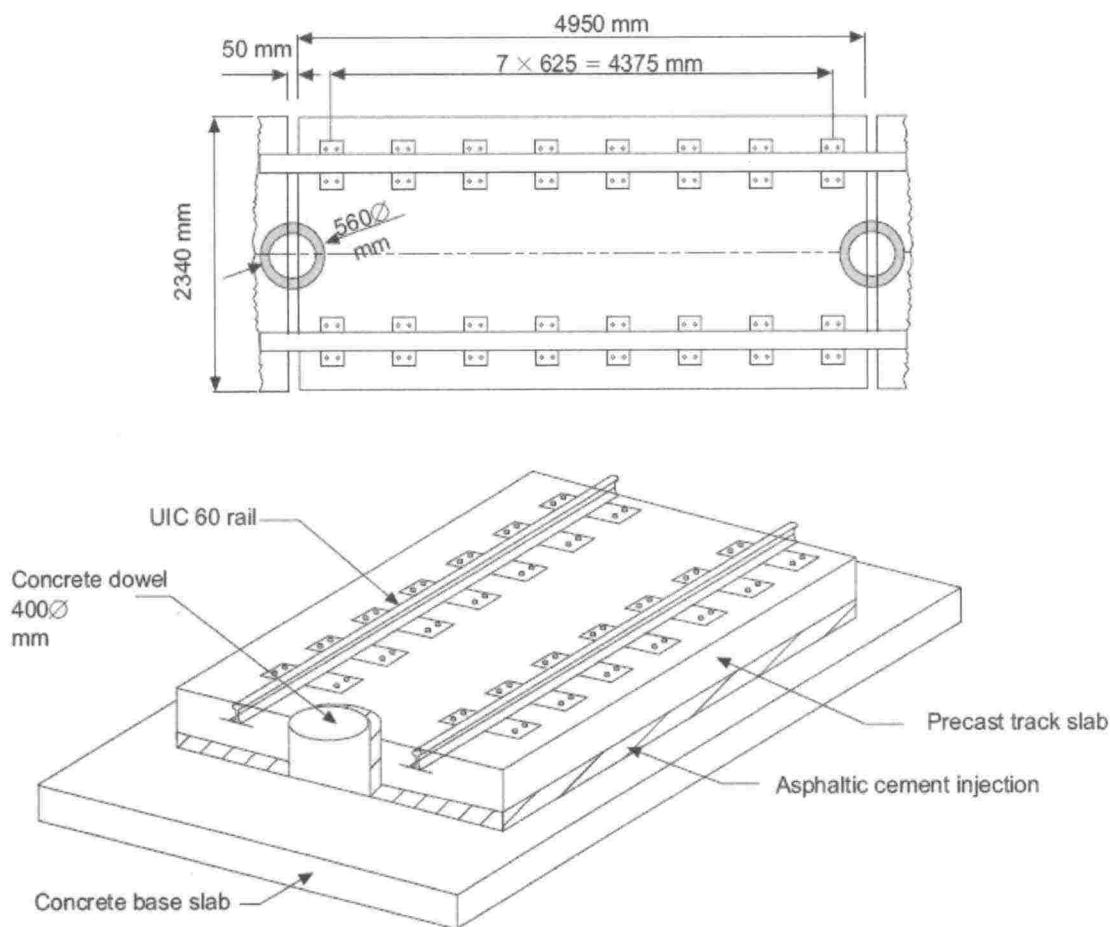
2.4.4 Shinkansen

Shinkansen on japanilainen nopean liikenteen rataverkko, josta 57 % eli 1244 km on kiintoraidetta kaksoisraiteena /8/15/. Jäljempänä Shinkansen tarkoittaa kiintoraiderakennetta, joka perustuu betonielementtilaataan. Ensimmäinen Shinkansen-rakenne asennettiin v. 1972. Nykyisin rakennetta käytetään myös Taiwanissa.

Shinkansen-rakenteen perusmalli on esitetty kuvassa 8. Jatkokehitettyssä rakenteessa laatan keskellä on $2860 \text{ mm} * 800 \text{ mm}$ kokoinen aukko /3/15/, minkä ansiosta laatta on kevyempi ja halvempi toteuttaa. Lisäksi aukko mahdollistaa saumauksen helpomman tarkistamisen. Shinkansen-rakenteen korkeus on 60E1-kiskolla ainoastaan 421 mm.

Shinkansen-rakenteen asennuksen työvaiheet ovat seuraavat /3/15/

1. Valmiiksi tehdyn betonilaatan päälle asennetaan tilapäinen asennusrata.
2. Betonielementtilaatta tuodaan paikalle asennusjunalla ja asetetaan litteiden pussien päälle.
3. Betonielementtilaatan linjaus ja korkeustaso säädetään oikeaksi.
4. Kohdan 2 pussit täytetään asfaltti-sementtilaastilla. Pussit ainoastaan auttavat laastin muotoilussa eivätkä sinänsä ole merkittävä osa rakennetta.

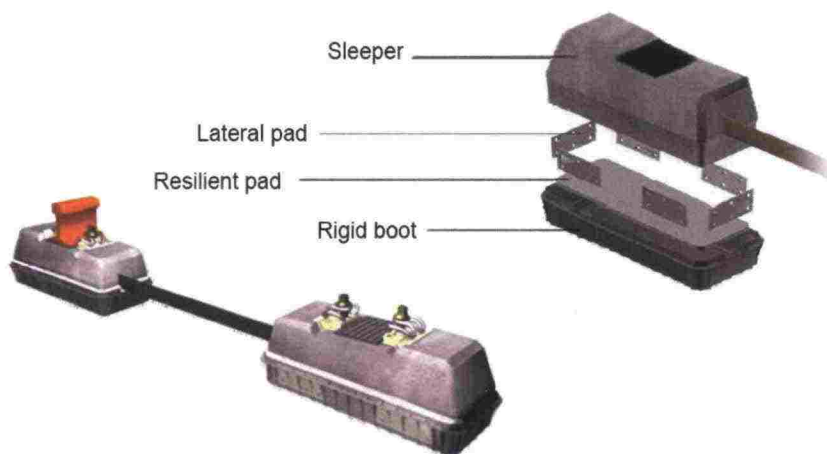


Kuva 8. Shinkansen-rakenne (Bastin 2006).

Japanilaisten elinkaarikustannuskokemusten mukaan Shinkansen-rakenteen rakennuskustannukset ovat 30 % korkeammat kuin sepeliradalla, mutta se tulee edullisemmaksi jo yhdeksän vuoden käytön jälkeen /15/. Itse betonilaatta ei ole tarvinnut merkittäviä korjauksia joitakin pakkasen ja suolaisen meriveden aiheuttamia pintavaurioita lukuun ottamatta, mutta sementti-asfalttilaastiin mahdollisesti tulleet halkeamat, kiskonkiinnitykset ja joissakin tapauksissa myös kisko vaativat kunnossapitotoimenpiteitä.

2.4.5 SAT S 312 -järjestelmään perustuva kiintoraideratkaisu

SAT S 312 -järjestelmään perustuva kiintoraiderakenne on käytössä mm. Englannin ja Ranskan välisessä kanaalitunnelissa, Pariisin RER-metroverkolla sekä kolmen kilometrin pituisella koerakenteella Pariisi–Strasbourg-suurnopeusradalla ja se kuuluu Stedef-tyyppin kiintoraideratkaisuihin. Rakenne perustuu perinteisestä betoniratapölkystä kehitettyyn SAT S 312 -järjestelmään, johon kuuluvat erikoismuotoiltu betonipölkky kiskonkiinnityksineen, jäykkä muovinen kalossi, joustoelementti ja sivutuet. Kuva kokoonpanon periaatteesta on esitetty kuvassa 9 Ranskassa tyypilliselle kaksiosaiselle betonipölkylle. SAT S 312 -järjestelmästä vastaa Consolis Groupiin kuuluva ranskalainen Sateba.



Kuva 9. Sateban SAT S 312 -järjestelmä sovellettuna ranskalaiseen kaksiosaiseen betonipölkkyyn /16/.

Selvityksen yhteydessä vierailtiin Pariisi–Strasbourg-radan koekohteella, jossa käytetty kiintoraiderakenne on esitetty kuvassa 10. Koekohteessa kiintoraiderakenteen osat ovat kiskosta alaspäin:

- Kiinnitysjärjestelmä Pandrol fastclip aluslaatalla, joka sallii jonkin verran korkeussäätöä
- Twin-block-pölkky ja Getznerin toimittama joustoelementti, jotka on asennettu jäykkään muoviseen kalossiin
- Täyttövalu kuitubetonista, jonka paksuus kalossin pohjalta 70 mm
- Raudoittamaton betonikaukalo, kokonaiskorkeus max 400 mm
- Maakosteabetoni, joka on avoimilta alueilta päällystetty ohuella asfalttikerroksella.



Kuva 10. SAT S 312 -järjestelmään perustuvat kiintoraiteen rakenne ja komponentit Pariisi–Strasbourg-rataosuuden koekohteella.

Rakenteen toiminnallisuudesta on kokemusta maailmalla vaihdepölkkyjen sekä kaksiosaisien betonipölkkyjen suhteen. Ensimmäinen kohde on toteutettu Sveitsiin v. 1966, minkä jälkeen järjestelmää on asennettu eri puolille maailmaa. Uusimpien referenssikohteiden listaus on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. *Kiintoraidekohteet, joihin on asennettu SAT S 312 järjestelmään perustuva kiintoraide /16/.*

Customer	Laying Place	Country	Sleepers	Laying date
SNCF	LN5 Tunnel de Marseille	France	26 500 units	2000
SNCF	Tunnel de Lajout	France	1 330 units	2001
SNCF	Tunnel de Saint Martin d'Estréaux	France	90 units	2003
ACT/RLE under construction	Tunnel de Londres	U.K.	Standard attenuation pad S1 : 10 000units Highperformance at attrnuation pad S3 : 60 000 units	From 2004
BANESTYRELSEN	Bridge	Denmark	230 units	From 2004
ALSTOM	LRT Lyon LEA	France	2 000 units	2005
RFF / SNCF under construction	LGV EAST	France	6 000 units	From 2005
RFF / SNCF under construction	LGV EAST	France	2 turnouts 1/46 1 Turnout 1/15.3	From 2005
SIEMENS AG	Metro de Monterrey	Mexico	5 000 units	2006

2.4.6 Sonneville LVT ja LVT-HA –rakennerratkaisut

Sonneville LVT ja LVT-HA ovat Sonneville International Corporation kehittämää kiintoraiderakenteita. Sveitsissä valmistui v. 2000 tutkimus erilaisista kiintoraide-tyypeistä, jolloin tehtiin päätös toteuttaa valittavat kiintoraidekohteet LVT, eli ”Low Vibration Track”, rakenteeseen perustuen. Päälinjaus Sveitsissä on, että kiintoraide asennetaan yli 500 metriä pitkiin tunneleihin. LVT-HA, ”High Attenuation”, on erikseen Malmön Citytunneln-hanketta varten kehitetty rakennerratkaisu, jossa on parannetut runkomelun vaimennusominaisuudet. Lötschbergin tunnelin LVT-rakennetta sekä Malmön Citytunneln-hanketta on esitelty tarkemmin liitteessä 1.

LVT-rakenne on toteutettu v. 2007 avattuun Lötschbergin tunneliin ja sen avulla toteutetaan myös rakenteilla oleva Gotthardin tunnelin ratarakenne. LVT-järjestelmässä on kullekin kiskolle erilliset pölkkyt, jotka on sijoitettu kumista valmistettuihin kaukaloihin. Kaukalon sisään pölkyn alapuolelle on lisäksi sijoitettu joustoelementti SAT S 312 -järjestelmän tavoin. Tunnelleissa rakennetta puoltavat mm. yksittäisen pölkyn vaihtomahdollisuus, huoltoajoneuvojen pääsy tunneliin sekä mahdollisuus sijoittaa raiteen keskelle teknisten järjestelmien vaatimia kaivoja. /8/

LVT-järjestelmän (kuva 11) rakenneosat Lötschbergin tunnelissa ovat

- kiinnitysjärjestelmä W14
- kiskon aluslevy Zw 700
- erilliset betonipölkkyt
- joustoelementti
- kuminen kaukalo pölkyn ympärille.



Kuva 11. Lötschbergin tunnelin koerakennesuudelle asennettu LVT-järjestelmään perustuva kiintoraiderakenne.

Sveitsin kohteissa tunneleihin asennetuissa LVT-järjestelmissä pölkkyjä paikalleen sitovaa laattaa ei ole raudoitettu muuten kuin kaivojen reuna-alueiden osalta. Laatan halkeilu on kohdistettu muutaman pölkyn välein rakenteen alapohjaan asennetulla rajauslevyllä. Siirtymärakenteet sepeliraiteeseen on tunnelin molemmissa päissä sijoitettu 100 metriä tunnelin sisäpuolelle. Siirtymärakenteen vahvistamiseen on käytetty seuraavia menetelmiä: /8/

- Suojakiskot, jotka on ankkuroitu betonilaattaan/betonipölkkyihin tasaamaan muutosalueella syntyviä voimia.
- Sepelin peittäminen hartsilla ”siirtymäkartion” luomiseksi.
- Pohjaimen asentaminen pölkkyjen alapintaan.

LVT-rakenne toteutetaan ylhäältä alaspäin. Lötschbergin tunnelissa saavutettu työsuorite oli keskimäärin 100 rd-m/vrk. Erytisesti logistiikka on tärkeässä roolissa tunneliosuuksia rakennettaessa. Lötschbergin tunnelissa työn järjestelyissä keskeinen tekijä oli rakennusvaiheessa käytetty raiteen tukijärjestelmä, joka salli liikkumisen raiteen päällä 25 tonnin akselipainolla. Lisäksi panostettiin työn laadunvalvontaan, jota varten määritetyt vaatimukset ratageometrian suhteen on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Löttschbergin tunnelissa käytetyt ratageometrian tarkastusrajat /8/.

Kohde	Vaatus	Mittauskanta/Muuta
vaakageometria	+/- 3 mm	tunnelin mittapisteverkko
korkeusasema	+/- 3 mm	teoreettinen/suunniteltu korkeusasema
nuolikorkeus	alle 2 mm	20 m vertailukanta, mittaus 5 m välein
kallistus	+/- 2 mm	
kierous	Nmax < 0,5 promillea	mittakanta 1 m
raideleveys	- 1 / + 3 mm	keskihajonta alle 1 mm
kiskojen kallistus	min 1:45, max 1:35	
pölkkyjen välinen ero	+/- 10 mm	

2.4.7 Edilon Embedded Block System

Edilon Embedded Block System (EBS) -kiintoraiderakenne perustuu erillisiin kiskoja tukeviin pölkkyihin, jotka on pohjastaan tuettu joustoelementillä Sateban SAT S 312 -järjestelmän tavoin. Kaukaloon sijoitetun pölkyn reunoille jäävät täytetään erityisellä edilon)(sedran patentoimalla Corkelast-joustomassalla. Rakenteen joustavuutta sekä runkomelun eristystä voidaan säätää pohjan joustoelementin paksuuden ja materiaalin avulla huomioiden kuitenkin kiskon sallittu painuma. Kiskonkiinnitysjärjestelmänä voidaan käyttää esim. Vosslohin tai Pandrollin järjestelmiä. Rakentamisvaiheessa kuvassa 12 esitetty rakenne (poislukien kisko) toimitetaan esiasennettuna työmaalle. EBS rakennetta on käytössä mm. Espanjassa usealla metrolinjalla. /17/18/19/



Kuva 12. Edilon Embedded Block System -järjestelmän pölkky /19/.

Rakenne koostuu seuraavista komponenteista:

- kiskonkiinnitysjärjestelmä (esim. W 14)
- raudoitettu betonipölkky
- esivalmistettu kaukalo
- pohjalle asennettava joustoelementti, paksuus esim. 12 mm
- Corcelast -massa (sivuille, kaukalon täyttöön).

Pölkkyrakennetta tukevaan betonilaattaan Edilon suosittelee asennettavaksi raudoitusverkon halkeamien rajoittamiseksi rakenteessa. Kunnossapidon yhteydessä pölkyn vaihto onnistuu poistamalla ensin Corkelast-massa ja asentamalla vioittuneen tilalle

hieman alkuperäisen mittoja pienempi pölkky. Tämän jälkeen avoimille reunoille voidaan valaa juokseva Corkelast-massa. /17/18/

Valmistajan mukaan rakenteessa voidaan käyttää kolmea erilaista joustotasoa riippuen erityisesti radan runkomelun eristyksen vaatimuksista. Taulukossa 7 on esitetty valmistajan ilmoittamat joustotasot sekä niiden mukaiset staattiset jousivakiot sekä kiskon painumat kuormituksen alla. /19/

Taulukko 7. Edilon EBS -järjestelmän joustoelementtien staattinen jousivakio/kiskon painuma eri ratkaisuille /18/.

Rakennetyyppi	Rautatiet akselipaino 16–25 tonnia	Raitiotie- ja metrolinjat akselipaino 10–16 tonnia
SS: Standard Stiffness	60 kN/mm tai <1mm painuma	60 kN/mm tai < 1mm painuma
MS: Medium Stiffness	30 kN/mm tai 1–2 mm painuma	15 kN/mm tai 1–2,5 mm painuma
LS: Low Stiffness	15 kN/mm tai >2mm painuma	9 kN/mm tai > 2.5mm painuma

Rakentamisen työsuorite on Espanjan kohteissa ollut 200–250 m/vrk mutta yksiraiteiseen tunneliin asennettaessa suorite jää todennäköisesti alhaisemmaksi. Edilon toimittaa rakenteeseen liittyvät komponentit usein yhteistyössä paikallisten valmistajien kanssa, mutta ei suorita itse rakenteen asentamista. Työlle on laadittu kattava ohjeistus. /18/20/

Valmistajan ilmoittama työjärjestys Edilon EBS -järjestelmälle on seuraava: /20/

1. Pohjalaatan puhdistus
2. Mittapisteiden määrittäminen
3. Materiaalien toimitus asennusalueelle, rauditusverkon asennus
4. Asennuskiskon kiinnittäminen pölkkyihin
5. Raideportaalien asennus ja säätö oikeaan geometriaan
6. Betonivalun valmistelu
7. Geometrian tarkastus ja lopullinen säätö

Lupa betonivalun aloittamiselle

8. Betonin valu
9. Raideportaalien irroitus
10. Raideportaalien poisto
11. Kiskojen hitsaus ja neutralointi, mahd. vaihto lopullisiin kiskoisiin
12. Geometrian lopputarkastus
13. Viimeistelevät työt

Rakenteen luovutus käyttöä varten

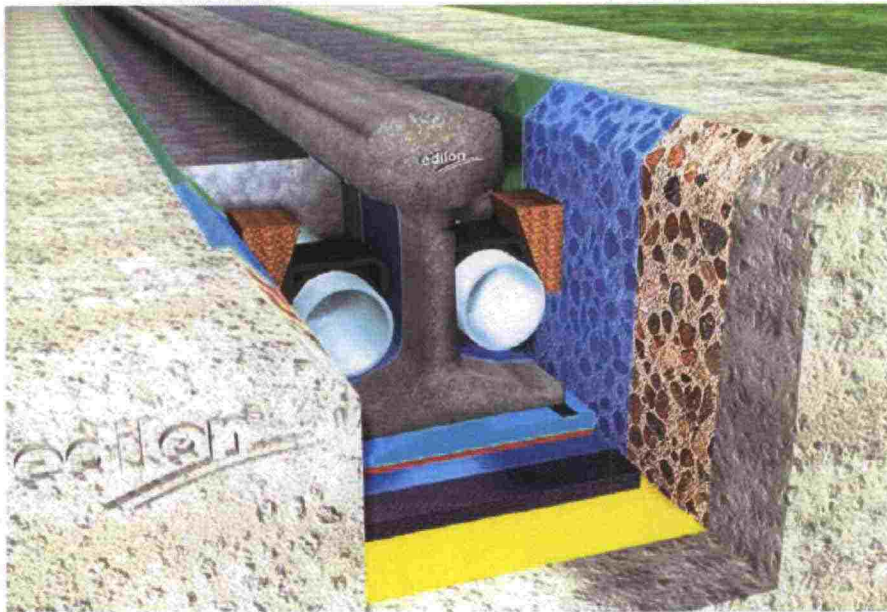
Vaihteiden osalta Edilonilla ei ole omaa pölkkyratkaisua. Rakenteen jousto ja runkomelun eristys voidaan valmistajan ilmoituksen mukaan toteuttaa normaaleille vaihdepölkkyille joko 1) valamalla vaihde kiinteästi osaksi betonilaattaa, jonka alle on asennettu joustomatto tai 2) asentamalla pohjaimet vaihdepölkkyihin ja suojaamalla valun ajaksi pölkkyt reunoiltaan ”suojamassalla”. Lopuksi suojamassa poistetaan ja tyhjätilat täytetään Corkelast-massalla. /21/

2.4.8 Upotetut kiskojärjestelmät (*Embedded Rail Systems*)

Pölkkyihin ja esivalmistettuihin elementteihin perustuvien kiintoraideratkaisujen lisäksi maailmalla on kehitetty rakenneratkaisuja, joissa kiskot on upotettu paikalla valetussa betonilaatassa oleviin kouruihin. Seuraavassa esitellään Edilonin Embedded Rail System ja Balfour Beattyn kiintoraideratkaisut. Tiedot perustuvat valmistajien omaan esittelymateriaaliin.

Edilon Embedded Rail System (ERS)

60E1-profiilista kiskoa käyttävä Edilon Embedded Rail System HR 60E1-MS (Medium Stiffness) sallii 22,5 tonnin akselipainon. Kisko asennetaan joko betonilaattaan tai teräskanaviin. Kiskon alla on paikalla valettava Edilon Corkelast VA-60 N -materiaali sekä 10-millimetrinen Edilon Resilient Strip 3000 -tyyppinen aluslevy. Rakenteen staattiseksi joustoksi (vertical rail head deflection) ilmoitetaan 1,4 millimetriä. Kiskon ja joustoelementtien sijoittuminen on esitetty kuvassa 13. /22/



Kuva 13. *Edilon Embedded Rail System HR 60E1-MS /22/.*

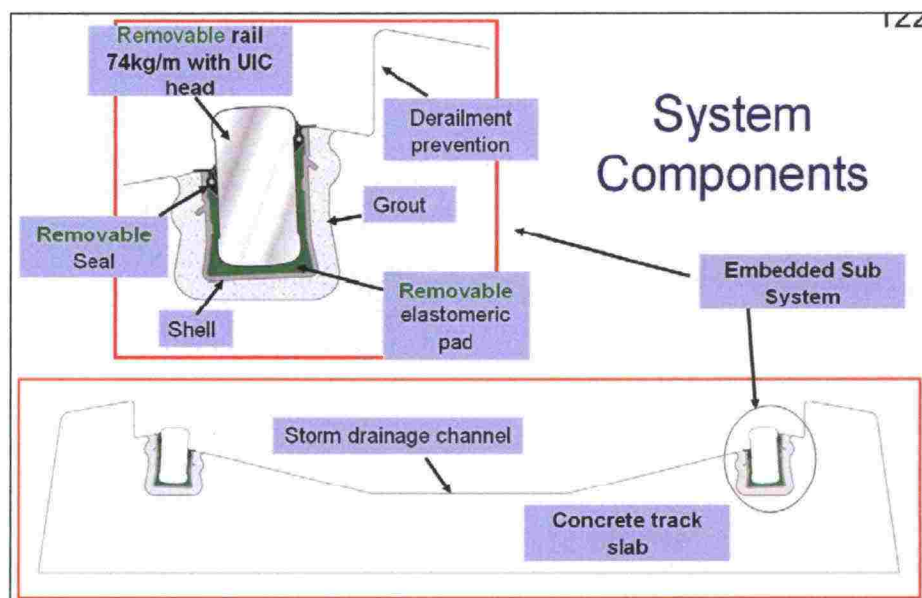
Järjestelmän hyötyjä on valmistajan esittelymateriaalissa kuvattu ainoastaan laadullisesti. Hyötyinä on esitetty: /22/

- nopea ja helppo asennus
- täydelliset huolto-, asennus- ja laadunvalvontaohjekirjat
- erinomaiset kokemukset Pohjolan lämpötiloista (ilmeisesti Banverketin kautta)
- rakenne vähentää kiskon aaltoilua ja pidentää sen käyttöikää
- järjestelmä on viritetty vähentämään runkomelua ja tärinää
- alhaiset ylläpitokustannukset
- myös kumipyöräkaluston kuten hälytysajoneuvojen käyttö mahdollista
- kiskot vaihdettavissa "yön yli"-työraoissa
- rakenne on testattu UIC:n standardien mukaan
- pienentää tunnelipoikkileikkausta.

Valmistajan esittelytilaisuudessa ei kysymyksistä huolimatta juurikaan saatu täsmällisiä lukuarvoja esimerkiksi järjestelmän kustannustehokkuudesta perinteiseen sepeliraiteeseen nähden, joten kustannustehokkuutta ei ole voitu arvioida.

BalfourBeattyn upotettu kiskojärjestelmä

BalfourBeattyn upotetussa kiskojärjestelmässä kisko lepää kantavaan betonilaattaan kaiverretussa urassa. Rakenteen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 14. BalfourBeattyn rakenne olisi valmistajan antamien tietojen mukaan vain 15–25 % kalliimpi toteuttaa kuin sepelirata, milloin kustannuseron takaisinmaksuaika olisi 5–7 vuotta /9/. Myös kunnossapitokustannukset olisivat erittäin pienet, koska komponentteja on vähän.



Kuva 14. BalfourBeattyn upotettuun kiskojärjestelmään perustuvan rakenteen poikkileikkaus /9/.

Valmistajan ilmoituksen mukaan BalfourBeatty-rakenteen hyviä puolia verrattuna muihin kiintoraideratkaisuihin ovat: /9/

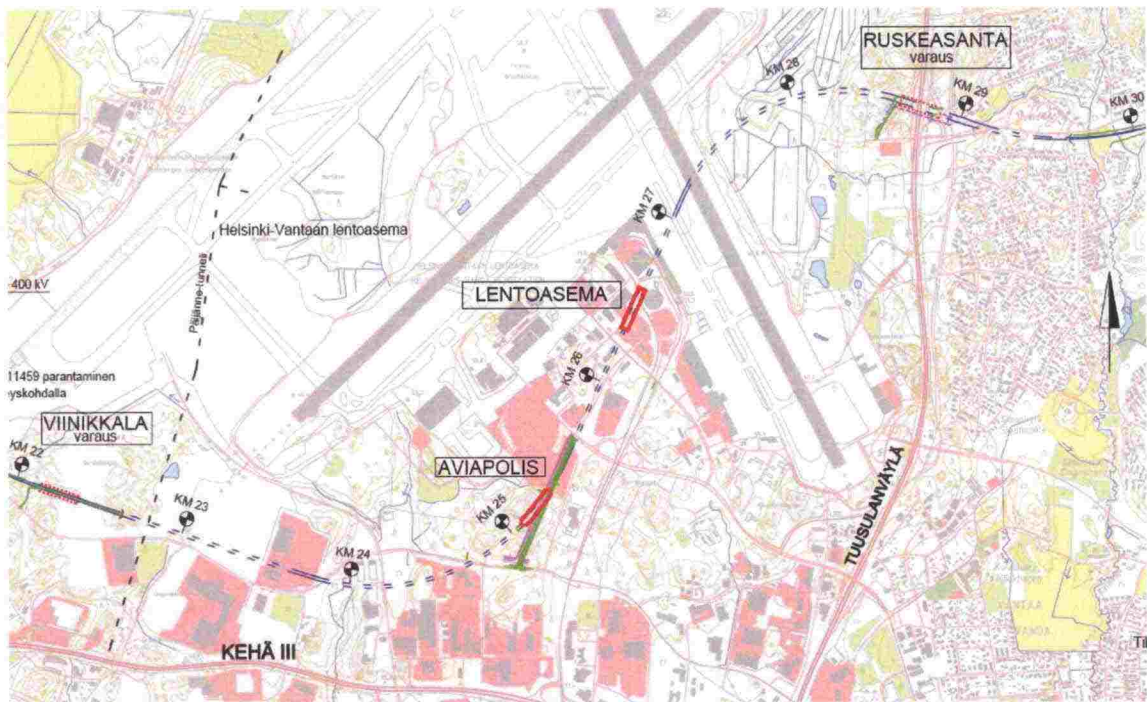
- yksinkertainen asennus, joka ei vaadi erityisen osaavaa työvoimaa.
- betonilaatan valaminen ja kiskotus ovat erillisiä työvaiheita, joita ei tarvitse tehdä samaan aikaan, jolloin viiveet toisessa vaiheessa eivät estä toisen työvaiheen tekemistä
- kiskon linjaus voidaan tehdä erillisten komponenttien ansiosta erillisenä työvaiheena itse kiskotuksesta
- useita liukuvalumuottityökoneita voidaan käyttää samaan aikaan, jos halutaan suurempi työsuorite.

BalfourBeatty-tyyppisen rakenteen selkeitä kääntöpuolia ovat Edilonin ratkaisujen tapaan valmistajariippumattoman tiedon puute. Tämän lisäksi voidaan todeta esimerkiksi Edilonin kiintoraideratkaisuja jäykempi raidegeometria. Myös rakenteessa käytetty Suomessa epästandardi 74 kg/m -kisko on mm. materiaalin hankintamenettelyn kannalta ongelmallinen.

3 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTIEN MÄÄRITTÄMINEN

3.1 Kehäradan tunneliosuus ja ratageometria

Kehärata alittaa lentoaseman alueen avoleikkausvaihtoehdon mukaisessa linjauksessa noin seitsemän kilometriä pitkässä kaksoistunnelissa. Osuudelle tehdään ensimmäisessä vaiheessa Aviapoliksen ja Lentoaseman tunneliasemat sekä tarpeelliset kalliotekniset työt Ruskeasannan asemavarausta varten. Tunneliosuuden linjaus on esitetty kuvassa 15. Tarkastelussa on myös Viinikkalan alueella pohjoisemmaksi siirretty linjaus, jossa tunnelijärjestelmän pituus olisi noin 8 km.



Kuva 15. Kehäradan linjaus tunneliosuudella.

Kaksoistunnelijärjestelmä koostuu kahdesta yksiraiteisesta tunnelista, joissa raiteen keskilinjojen välinen etäisyys on 17,6–32,6 metriä. Tunneleiden väliin louhitaan yhdystunnelit enintään 200 metrin välein sekä pystykuilut noin 1000 metrin välein. Jokaiselle tunneliasemalle toteutetaan ajotunneliyhteys ja asemien yhteydessä on savunpoisto- sekä paineentasauskuilut.

Tunneliosuudella ratageometriassa on kaksi pitkää kaarretta, joiden kaarresäteet ovat Aviapoliksen kohdalla $R=1200$ metriä sekä Lentoaseman ja Ruskeasannan välisellä alueella $R=1000$ metriä. Suurin kallistus on 100 mm jälkimmäisen kaarresäteen kohdalla. Radan maksiminopeus on tunneliosuudella 120 km/h. Tunneliin Aviapoliksen ja Lentoaseman väliin sijoittuu raiteenvaihtopaikka, johon asennetaan neljä YV60-300-1:9 vaihdetta.

Radan pystygeometrian maksimipituuskaltevuus on 40 %. Pystygeometrian pyöristyskaarena on käytetty $S=10000$ metriä (tarvittaessa $S=8000$ metriä).

Ratageometria vaikuttaa kiintoraiteen suunnitteluun, mm. siirtymärakenteiden mahdollisten sijoituskohtien sekä kaarreosuuksien tunnelipoikkileikkauksen ja mitoittavien sivuttaisuuuntaisten voimien suhteen.

3.2 Kehäradan liikennöinti sekä rataan kohdistuva kuormitus

Kehärata on kaupunkiliikenteen rata, jolla liikennöidään pääsääntöisesti Pääkaupunki-seudun Junakalusto Oy:n tilaamalla Sm5-junakalustolla. Sm5-junat on lähtökohtaisesti suunniteltu 40 promillen pituuskaltevuuksia varten. Ratahallintokeskuksen tilaaman selvityksen (Kehäradan kalustoselvitys 19.5.2008, VR-Engineering Oy) mukaan myös Sm1- ja Sm2-junilla voidaan liikennöidä Kehäradalla.

Kehäradalla liikennöi kaksi junalinjaa, jotka perustuvat nykyisten I- ja M-junien yhdistämiseen. Vantaan linjastosuunnitelmassa uusiksi juniksi on esitetty kiertosuunnan mukaan PM-junaa (Päärata-Martinlaakson rata) ja MP-junaa (Martinlaakson rata-Päärata). Ruuhka-aikoina rataosuudella liikennöidään 10 minuutin vuorovälein. Kehäradan asemat tunneliosuudella rakennetaan kolmen junayksikön pituisiksi. Lähi-liikenteen junayksiköiden lisäksi kehäradan tunneliosuudella kulkee ainoastaan radan huoltoon ja kunnossapitoon liittyviä junia, joiden akselipainot ovat maksimissaan 200–250 kN. Suunnitteluperusteiden mukainen mitoittava akselipaino on 25 tonnia nopeudella 100 km/h. Tunneliosuudelle ei sallita tavaraliikenteen junia.

Laskennallinen kumulatiivinen kuormitus on näiden lähtökohtien mukaan maksimissaan 2,3 Mbrt/vuosi, mitä on käytetty rakenteen mitoituksen lähtökohtana. Kunnossapidon kannalta tilanne on pitkälti samanlainen kuin nykyisellä Vantaankosken radalla.

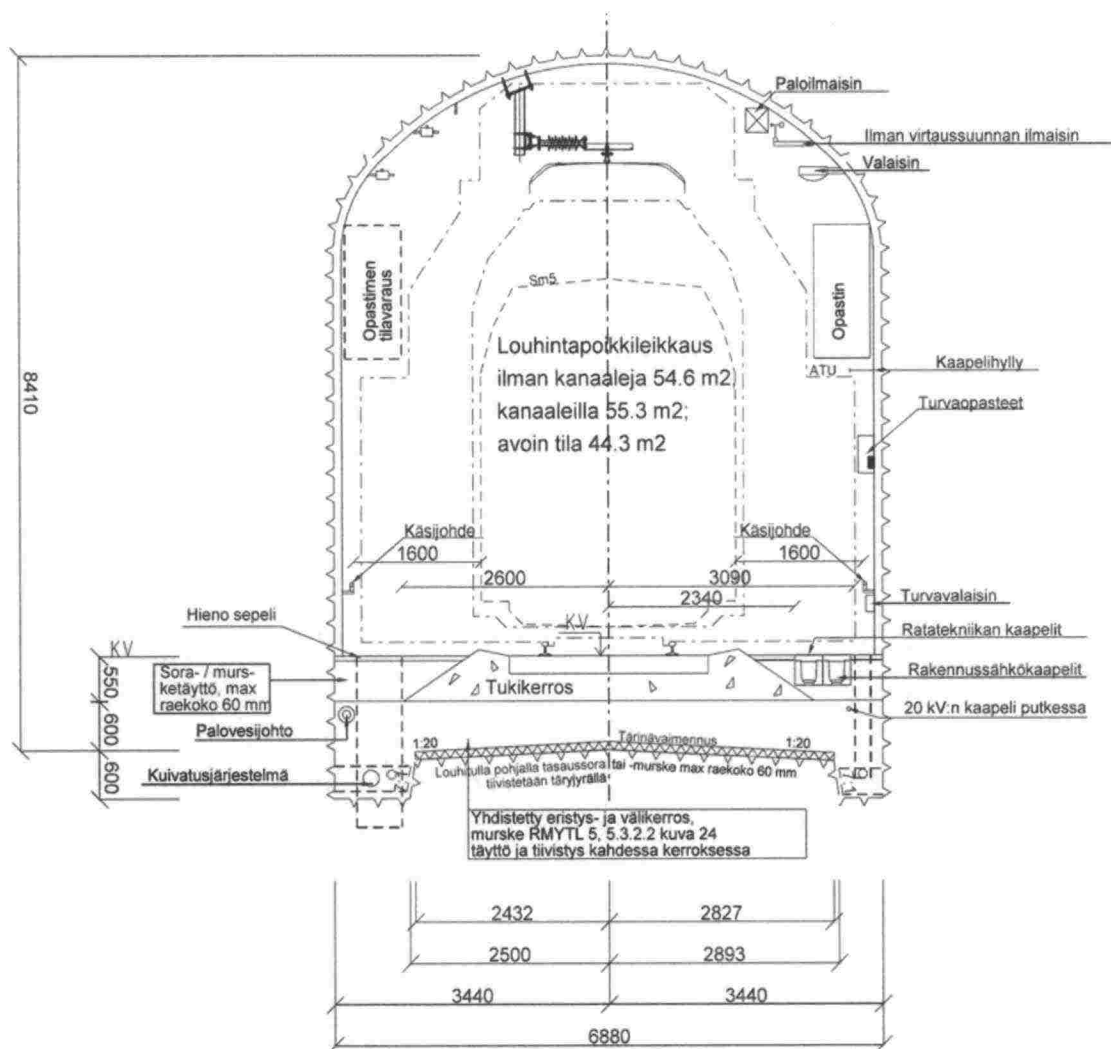
3.3 Kehäradan tunnelipoikkileikkaus

Kiintoraideselvityksessä vertailukohtana on sepelitukikerroksellisen radan tunnelipoikkileikkaus, joka on esitetty kuvassa 16. Tunnelipoikkileikkauksen mitoittavia tekijöitä ovat mm. radalla liikkuva junakalusto ja sen tarvitsema aukean tilan ulottuma, poikkileikkaukseen sijoitettavat rakenteet kuten kaapelikourut, -hyllyt, ja -kaivot, opastimet, kuivatusjärjestelmä sekä palovesijohto. Poikkileikkauksessa on oltava poistumistie yhdystunnelin puoleisella reunalla.

Sepelitukikerroksellisen radan komponentteja ovat ylhäältä alaspäin

- 60E1-kisko
- uudet BP99- tai B97-betoniratapölkkyt Vosslohin W14 -kiinnitysjärjestelmällä (kiinnitysjousoi Skl 14)
- sepelitukikerros 550 mm
- erityis- ja välikerros 600 mm (teoreettiseen kalliopohjaan)
- runkomelun eristematto tarpeellisilla alueilla.

Tunnelin molemmilla sivuilla kulkee kuivatusjärjestelmään liittyvät salaojaputket, joista vesi kerätään 40 metrin välein tehtäviä alituksia pitkin tunnelin toisella reunalla kulkevaan salaojaviemäriin. Rakenteen yläosa tasataan tukikerroksen molemmin puolin hienolla sepelillä poistumisturvallisuuden parantamiseksi.



Kuva 16. Kehäradan sepelitukikerroksellisen raiteen tunnelipoikkileikkaus.

3.4 Tunnelin olosuhteiden sekä louhintamenetelmän asettamat lähtökohdat

Kiintoraiteen suunnittelussa on otettava huomioon tunnelissa vallitsevat olosuhteet ja niiden asettamat reunaehdot rakenteen eri komponenttien kannalta. Keskeisiä kiintoraiteen suunnitteluun vaikuttavia asioita ovat:

- louhintamenetelmien asettamat lähtökohdat
- pohjaveden pääsy tunneliin
- lämpötilavaihtelut tunnelissa
- runkomelun välittyminen kallion kautta maanpinnalla oleviin rakennuksiin
- painetasaus liikennöidyssä tunnelissa

Louhintamenetelmien asettamat lähtökohdat

Kehäradan ratatunnelit louhitaan poraus-räjätysmenetelmällä. Normaaleissa olosuhteissa louhintakatkon pituus on 5–6 metriä ja rikkonaisen kallion osuuksilla 2–3 metriä. Rikkonaisen kallion sekä ohuen kalliokaton osuuksilla ratatunneleiden louhinta tehdään tarvittaessa vaihteittain. Ratatunneleiden louhintatarkkuus on pääosin 0–400 mm teoreettisesta tunnelipoikkileikkauksesta (ylilouhinta, alilouhinta ei sallita). Betoni-

rakenteiden kohdalla louhintatarkkuus on 0–200 mm. Kallioulouhinnan edetessä tunne-
pohja tasataan murskeella kuljetuskalustoa varten.

Työmenetelmän kannalta tunnelipoikkileikkauksen leveyden tulisi olla vähintään
6,88 metriä. Poikkileikkausta ei kannata kaventaa tästä, koska käytettävä kuljetuskalusto
ja louhintamenetelmät vaativat tämän tilan.

Tunnelin reunoilla olevat pituussuuntaiset kanaalit louhitaan profiililouhinnan yhtey-
dessä tai sen jälkeen erillisenä työvaiheena. Noin 40 metrin välein tehtävät putki- ja
kaapelialitukset sekä kaivosyvennykset louhitaan profiililouhinnan jälkeen.

Pohjaveden pääsy tunneliin

Kehäradan ratatunneleissa tehdään noin kolmen louhintakatkon välein systemaattista
tunnusteluporausta (1–3 reikää/ratatunneli, reikäpituus n. 20 m). Tunnusteluporauksen
perusteella päätetään kallion tiivistämisestä esi-injektoinnilla, injektointilaajuudesta
(koko tunneliprofiili vai ainoastaan katto tai seinät) sekä käytettävistä injektointi-
massoista (injektointisementti, mikrosegmentti, lisäaineet yms.). Esi-injektoinnissa
käytetään vain sementtipohjaisia injektointiaineita. Esi-injektoinnin tavoitteena on
vähentää pohjaveden alenemisesta aiheutuvia ympäristöhaittoja ja ruiskubetonisalojien
määrää sekä estää ratatunnelin stabiliteetin kannalta haitalliset vesivuodot. Louhinnan
jälkeen tehdään erikseen valittavissa kohteissa paikallisia jälki-injektointeja mikro-
segmentillä ja polyuretaanipohjaisilla jälki-injektointiaineilla.

Ratatunneleiden katon ja seinien vuotokohtiin asennetaan ruiskubetonisalojia.
Kummankin ratatunnelin pohjaan asennetaan kuivatusjärjestelmät, salaojitus on
kummankin ratatunnelin molemmilla reunoilla ja salaojaviemäri kummankin rata-
tunnelin toisella reunalla. Kaivoväli on noin 40 metriä. Jokaisen salaojaviemärikaivon
yhteydessä on radan kuivatusjärjestelmän alitusputki, jolla vastakkaisen puolen
salaojalinja liitetään salaojaviemäriin. Sähköalitusputkia on jokaisen kuivatus-
järjestelmän alitusputken vieressä sekä yhdyskäytävien ja asemien kohdalla.

Tunnelipoikkileikkauksen sivuille sijoitetaan kuivatusjärjestelmä, joka koostuu salaoja-
putkista sekä kuivatusviemäristä. Järjestelmään kulkeutuva vesi pumpataan pois
tunnelista alimpien pisteiden sekä tunneliasemien kohdilla sijaitsevien pumppaamojen
kautta.

Lämpötilavaihtelut tunnelissa

Tunnelin lämpötilan vaihtelut riippuvat merkittävästi paikallisista olosuhteista, tunnelin
suuaukkojen korkeusasemista sekä ilmanvaihto- ja paineentasausjärjestelmistä. Tarkat
lähtökohdat rakenteen suunnitteluun saadaan lämpöteknisen simuloinnin perusteella,
mikä tulee toteuttaa rakentamissuunnittelun aikana.

Peruseriaate on, että Kehäradan ratatunneleiden osuuksilla, jotka sijaitsevat asemien
välillä, ei lämpötila todennäköisesti talvellakaan mene pakkasen puolelle. Suuaukkojen
ja asemien välisillä osuuksilla lämpötila tulee talvella laskemaan nollarajan alapuolelle
ja tunnelin rakenteet on mitoitettava routimisriskin mukaisesti. Näillä osuuksilla
ratatunnelit lämpöeristetään erillisverhousrakenteella, jolloin tunnelin louhintapoikki-
leikkaus on suurempi normaaliin verrattuna. Erillisverhousrakenneosuudet ovat

pidemmät niissä ratatunneleissa, joista junat ajavat sisään tunneliin eli länsipäässä eteläinen ja itäpäässä pohjoinen ratatunneli.

Runkomelun välittyminen kallion kautta maanpinnalle ja rakennuksiin

Rakenteen suunnittelussa on huomioitava dynaamisen kuormituksen aiheuttama runkomelu, joka välittyy kallion kautta maanpinnalla oleviin rakennuksiin. Runkomelua on tarkasteltu enemmän kappaleessa 6.

Paineentasaus liikennöidyssä tunnelissa

Tunnelipoikkileikkauksen mitoituksessa on otettava huomioon tunnelin paineentasausrjestelmä, joka on riippuvainen mm. seuraavista tekijöistä:

- tunnelipoikkileikkauksen vapaa pinta-ala
- tunnelissa liikkuvan kaluston poikkipinta-ala sekä pituus
- kaluston liikennöinti nopeus
- liikenteen vuorovälit
- rautatietunneliin kuuluvat asemat ja kuilut, jotka toimivat osana paineentasausta

Tunnelipoikkileikkauksen vapaan pinta-alan pienentäminen lisää paineentasaamisen tarvetta. Mitoitettavia tekijöitä ovat paineenvaihtelu junassa matkustavan henkilön kannalta sekä paineenvaihtelut ja ilmanvirtausnopeus asemilla sekä porraskuiluissa.

3.5 LVISAT-järjestelyt

Kiintoraiteen suunnittelussa on otettava huomioon Kehäradan rautatietunneliin asennettavat LVISAT-järjestelmät. Tunneliin asennetaan mm. seuraavat järjestelmät:

- palovesijärjestelmä
- savunpoistojärjestelmä
- ratasähkö 25 kV
- sähkökaapeli 20 kV laitteistoille ja asemien sähkölle
- turvalaitejärjestelmät (JKV)
- valaistusjärjestelmät
- valvonta- ja pelastusjärjestelmät.

Kiintoraiteen suhteen merkittävät lähtökohdat muodostuvat palovesijohdon sekä sähkö- ja turvalaitteiden vaatimista alituksista. Nämä on sijoitettava rakenteeseen siten, että myös kunnossapito jälkeenpäin on mahdollista. Alituksia ovat:

- palovesijohto, ulkohalkaisija $d=160$ mm
- pistorasiakeskusten alitusputket $d=110$ mm
- muut sähköalitukset vähintään 50 m välein, $d=110$ mm.

Lisäksi sähkölaitteiden toiminnallisuuden takia on varmistettava kiintoraiteen maadoituksesta, mikä on suunniteltava rakennekohtaisesti.

4 RAKENTEEN SUUNNITTELU

4.1 Rakenteellisen mitoituksen suunnitteluperusteet

4.1.1 Yleistä

Kiintoraiteen suunnittelun lähtökohtana on, että kiskoon sekä kiinnitys- ja tukirakenteisiin ei muodostu pysyvistä kuormista, muuttuvien ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta tai junaliikenteestä määriteltyä suurempia pysyviä tai hetkellisiä muodonmuutoksia. Kiintoraiteen joustavuus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla esim. eristämällä rakenteen osia kimmoisia muodonmuutoksia sallivilla ja dynaamista värähtelyä vaimentavilla elementeillä.

Keskeinen määriteltävä ominaisuus on rakenteen suunniteltu käyttöikä, joka voidaan asettaa kiintoraiteen rakenneosien teknisten laatuvaatimusten perusteella. Käyttöikään vaikuttaa koko rakennesysteemin toiminnallisten ominaisuuksien pysyvyys, joka on usein suoraan sidoksissa eri rakenneosien materiaalien kestävyys. Käyttöikä voidaan määrittellä myös rakenneosittain, jolloin esim. tukirakenteelle, ratapölkylle ja värähtelyä vaimentaville osille tai kiskonkiinnitykselle asetetaan erilaiset vaatimukset.

Kiintoraiderakenteiden rakenteellisessa mitoituksessa huomioidaan

- rakenteiden staattiset (kvasi-) ja dynaamiset ominaisuudet, massa, kimmokerroin, dynaaminen alustaluku, vaimennuskerroin ja ominaistaajuudet
- raiteen geometria
- raiteella liikkuvan kaluston akselipaino, nopeus, akseliväli(t), kiihdytys- ja jarrutusvoima
- ympäristön olosuhteet ja odotettavat muutokset.

Rakenteiden mitoituksen kannalta erityistä huomiota vaativia asioita ovat

- kiskon jalkaan kohdistuva vetojännitys; akselipainosta aiheutuva joustavan alustan painuma
- pölkyn ja kiskonkiinnityksen rasitukset junan vaakakuormista; kalossimainen ratkaisu, jossa pölkky on upotettu muoviseen kaukaloon tai joustavan massaan
- yhtenäisen pölkyn värähtely liikkuvan dynaamisen kuorman vaikutuksesta; kiinnitys betoniseen tukirakenteeseen suoraan tai värähtelyä vaimentavan rakenteen välityksellä
- pölkyn muut kuin junakuorman aiheuttamat rasitukset; erityistä huomiota tulee kiinnittää tilanteeseen, jossa esim. huoltoajoneuvon pyörä kuormittaa ratapölkyn keskiosaa
- betonirakenteiden lämpötilamuutoksen aiheuttamat siirtymät ja rasitukset; erityistä huomiota tulee kiinnittää lämpötilavaihtelun aiheuttamaan pituuden muutokseen, mikäli tukirakenteena käytetään yhtenäistä esim. liukuvalumenetelmällä valettua laattaa
- kiintoraiderakenteen ominaistaajuus; resonoiminen raiteella liikkuvan kaluston ominaistaajuuden kanssa saattaa aiheuttaa haitallisia muodonmuutoksia ja vaurioittaa rakenteita
- kiintoraiteen liittyminen tukikerrokselliseen raiteeseen; erityistä huomiota tulee kiinnittää siirtymä- ja alusrakenteen yhteistoimintaan siirryttäessä joustavuudeltaan alhaisemmalta kiintoraiteelta tukikerrokselliselle radalle

- kiintoraiteen rakenteiden vesitiiviys ja jäätyminen esto; kapeisiin rakoihin jäävä vesi saattaa aiheuttaa ajan mittaan eroosion kaltaisia vaurioita betonirakenteissa.

4.1.2 Suunnittelun ja mitoituksen ohjeet

Eurokoodin standardit ja esim. UIC:n ohjeet eivät täysin kata kiintoraidejärjestelmään sisältyvien erikoisrakenteiden suunnittelussa tarvittavaa ohjeistusta. Euroopan maista ainakin Saksassa, Sveitsissä, Itävallassa, Ranskassa ja Hollannissa on luotu kiintoraiteiden kehittelyn ohessa myös kansallisia suunnittelu- ja mitoitusohjeita. Kansallisten ohjeiden pohjalta määritetyt suunnitteluperusteet on kuitenkin usein tarkoitettu tiettyjen tyyppiratkaisujen suunnitteluun, ei yleisesti sovellettaviksi.

Eurokoodeja ei ole otettu vielä käyttöön Suomessa tie- ja ratahallintojen erikoisrakenteiden suunnittelussa. Alustavassa mitoituksessa voidaan yhdistää Eurokoodi ja nykyiset RHK:n suunnitteluohjeet junakuormien määrittelyä ja yhdistelyä varten. Betonirakenteiden mitoitus voidaan tehdä rakentamismääräyskokoelman osan B4 sekä soveltuvien osien RHK:n ja Tiehallinnon ohjeiden mukaisesti.

Kiintoraiteen suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös ne radan komponentit, joiden mitoituksessa käytetään Eurokoodin LM-junakuormakaavion sijasta todellisia tai todennäköisiä rasituksia. Lisäksi on huomioitava, että useiden komponenttien materiaalien ja rakenteiden kestävyys murto- ja käyttörajatiloissa määritetään testaamalla, ei mitoituslaskelmin.

4.2 Kiintoraiteen asennusvälit

Kiintoraiteen asennusväleihin vaikuttavat ratageometria sekä asemien sijainti. Tunnelin linjaukselta on määritetty kolme eri vaihtoehtoista kiintoraiteen asennusväliä avoleikkausvaihtoehdon mukaiselle linjaukselle kustannusarvion laskemista varten. Siirtymärakenteiden paikat on valittu siten, että ne eivät sijoitu radan kaarteeseen, pystygeometrian taitteeseen tai aseman kohdalle. Määritellyt asennusvälit on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Kiintoraiteen asennusvälit kehäradan tunneliosuudella.

VE	Alku km+m	Loppu km+m	Raidepituus	Vaihteet
1	25+650	28+900	6600	4x YV60-300-1:9
2	23+500	28+900	10900	4x YV60-300-1:9
3	22+100	30+250	16400	4x YV60-300-1:9

Vaihtoehdossa 1 kiintoraide alkaa Aviapoliksen jälkeisen kaartein jälkeen ja kattaa raiteenvaihtopaikan, sekä Lentoaseman ja Ruskeasannan asema-alueet.

Vaihtoehdossa 2 kiintoraide alkaa noin 800 metriä läntisen suuaukon jälkeen ja jatkuu Ruskeasannan asema-alueelle asti.

Vaihtoehdossa 3 kiintoraide aloitetaan avorataosuudella ennen Viinikkalan asema-alueella ja jatkuu koko tunneliosuuden läpi itäiselle avorataosuudelle.

Mikäli kiintoraiderakenne tuodaan avorataosuudelle asti, on erikseen tarkasteltava kiintoraiteen rakenteet ja järjestelyt routimisriskin suhteen. Pohjamaan ja siihen suunniteltujen pohjanvahvistusten suhteen olosuhteet ovat kiintoraiteen kannalta soveltuvat. Ennen läntistä suuaukkoa rata kulkee kallioleikkauksessa ja itäisen suuaukon jälkeisellä osuudella rata perustetaan paalulaatalle. Lisäksi Ruskeasannan alueella on huomioitava tiukat runkomelun ja tärinän vaimennuksen vaatimukset.

4.3 Kiintoraiteen rakenne ja komponentit

4.3.1 Yleistä

Kiintoraiteen rakenteen suunnittelun lähtökohtaisiksi vaihtoehtoiksi asetettiin kaksi erityyppistä järjestelmää, jotka molemmat perustuvat tällä hetkellä Suomessa käytettyyn betoniratapölkkyyn:

- Sateban SAT S 312 -järjestelmään perustuva ratkaisu, jossa pölkky ja jousto- sekä runkomelun vaimennuksen elementti sijoitetaan jäykkään muoviseen kalossiin. Sivuilta pölkky tukeutuu muovisiin tukielementteihin. Kiintoraideratkaisussa pölkky on myöhemmin vaihdettavissa.
- Joustavaan kiskonkiinnitysjärjestelmään (System 304) perustuva ratkaisu, jossa pölkkyyn asennetaan erilliset ankkuroinnit ja se valetaan kiinteästi osaksi kiintoraiderakennetta. Jousto- ja runkomelun vaimennuselementti sijoittuu kiskon ja pölkyn väliin.

Valittava järjestelmä määrittää runkomelun vaimennuksen toteutusperiaatteen, mikä on keskeinen toiminnallinen kriteeri kiintoraiteen kannalta. Lähtökohtana oleva betonipölkky määrittää raidelevyden sekä kiskonkallistukset. Betonipölkkyyn perustuvan kiintoraiteen rakentaminen on tarkoituksenmukaista tehdä top-down-menetelmällä, jolloin kiintoraiderakenne jakaantuu seuraavin osakokonaisuuksiin ylhäältä alaspäin:

1. Raide-elementti, jossa kiskot, pölkkyt ja kiskonkiinnitys sekä SAT S 312 -järjestelmässä esiasennettu kalossi.
2. Pintalaatta, jolla sidotaan raidegeometria paikalleen.
3. Kantava pohjalaatta, joka luo tasaisen alustan rakenteelle ja jonka päälle raide voidaan elementtinä tukea ennen pintalaattaa.

Kiintoraiteen kantava pohjalaatta voidaan perustaa puhdistettuun kalliopohjaan tai tiivistetylle eristys- ja välikerroksen murskekerrokselle. Valintaan vaikuttaa keskeisesti tunnelin louhintamenetelmä, koska kalliopohjan louhintatarkkuus määrää pitkälti kalliopohjaan valetun betonilaatan materiaalimenekin. Kalliopinnan puhdistus on myös oma logistisesti hankala työvaihe, joka muodostaa kustannuslisän kalliopohjaan perustettaessa. Kiintoraiteessa pölkkyvälinä käytetään 650 mm, mikä on yleinen käytäntö maailmalla käytetyissä kiintoraidekohteissa.

4.3.2 SAT S 312 -järjestelmä

Tutkimuksen ensimmäisenä vaihtoehtoisena kiintoraideratkaisuna selvitettiin Consolis Groupiin kuuluvan Sateban SAT S 312 -järjestelmä, joka perustuu normaaliin sepeliraiteeseen tarkoitettuun betoniseen ratapölkkyyn. Ratkaisun etuna on se, että pölkkyjen

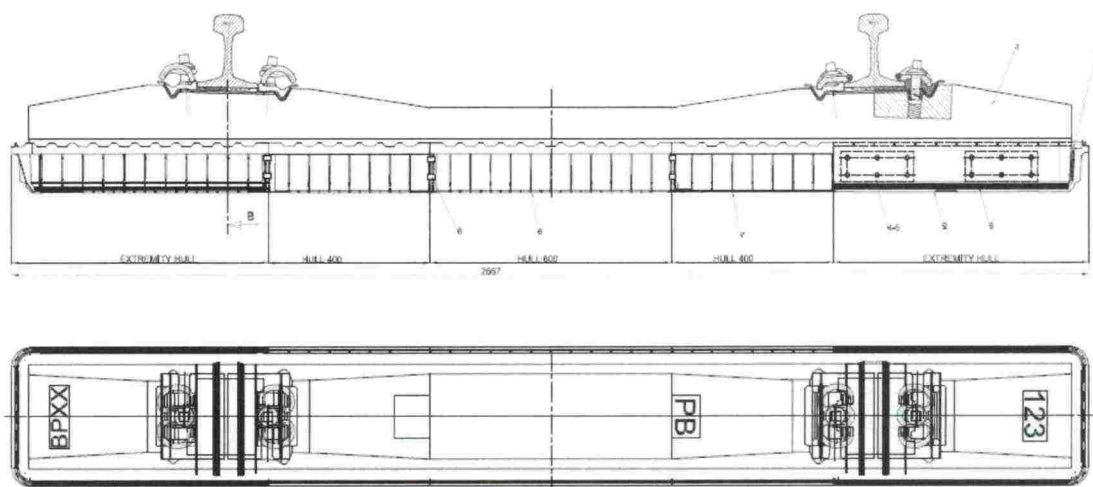
tuotantoprosessiin ei tarvitse tehdä merkittäviä muutoksia. Suomalaisen sovelluksen määrittämisessä tutkimuksessa toimittiin yhteistyössä Parma Oy:n (osa Consolis Groupia) kanssa. Yleinen kuvaus järjestelmästä on esitetty kappaleessa 2.4.5.

Pölkky ja siihen liittyvä kalossi kootaan tehtaalla valmiiksi. Kiintoraiderakenteessa betonivalu tehdään kalossin yläreunaan asti, minkä ansiosta pölkky ja alapinnan joustoelementti ovat myöhemmin vaihdettavissa. Kalossin ja pölkyn liitoskohtaan voidaan valaa kaksikomponenttipolyuretaania (valmistajan ilmoituksen mukaan) vesi-tiiviyyden parantamiseksi. Rakentamisen aikana kalossin alapintaan voidaan asentaa väliaikainen suojalevy, minkä ansiosta kantavan pohjalaatan päälle on tietyin edellytyksin mahdollista rakentaa väliaikainen raide työmaaliikennettä varten. SAT S 312 -järjestelmän kalossi ja joustoelementti on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Pölkyn alle asennettava kalossi ja runkomelun vaimennuselementti.

Kehäradalle määritetyssä sovelluksessa kiskon kiinnitysjärjestelmä on sama kuin normaalissa betonipölkkyssä (Vossloh W14). Kiintoraiteen asentamisen jälkeen raiteen korkeusasemassa on säätövaraa jäykkien välilevyjen ansiosta +20 mm/-4 mm. Kiskon kallistuksen takia myös kiskoa sivuilta tukevat kulmakappaleet on vaihdettava suuremmissa korkeuden muutoksissa. Kuvassa 18 on esitetty piirros kalossiin asennetusta betonipölkystä.



Kuva 18. Parma Oy:n laatima piirros BP99-pölkystä asennettuna kalossiin /24/.

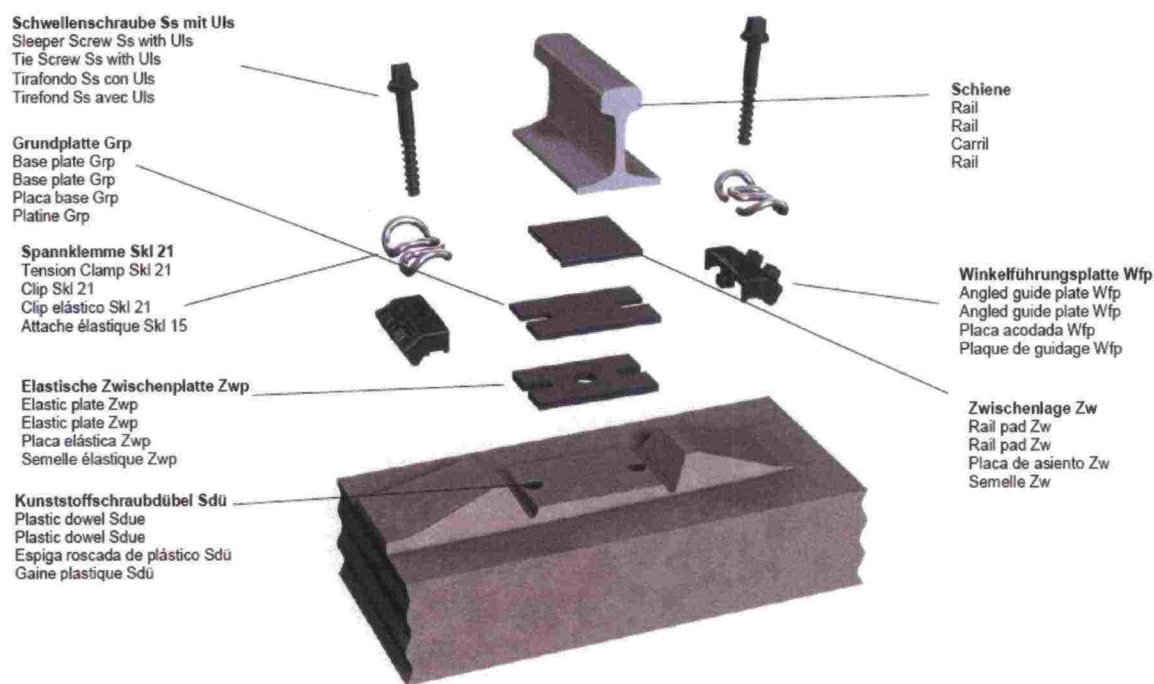
Rakenteen toiminnallisuudesta on kokemusta maailmalla vaihdepölkkyjen sekä kaksiosaisten betonipölkkyjen suhteen. Suomalaisen yksiosaisen pölkyn käytöstä järjestelmässä ei toistaiseksi ole kokemuksia muuten kuin vaihdepölkkyjen osalta.

SAT S 312 -järjestelmän lisäkustannukset muodostuvat kiinteästä tehdasinvestoinnista (valumuotit) sekä kalossin osista. Merkittävin kustannuslisä muodostuu pölkyn kalossiin asennettavasta jousto- ja runkomelun vaimennuselementistä. Parma Oy:n kustannusarvion (28.3.2008) mukaisesti investointikulut 40 pölkyn tuotantolinjalle ovat 115 000 € ja kalossiosista muodostuva lisäkustannus (mukaan lukien kokoaminen) on 165,50 €/pölkky. /26/

4.3.3 Joustava kiskonkiinnitys (System 304)

Toisena selvitettäväksi kiintoraideratkaisuksi asetettiin Vosslohin System 304 -kiinnitysjärjestelmään perustuva ratkaisu. Järjestelmä on kevennetty versio System 300 -kiinnitysjärjestelmästä, jota on käytetty mm. Saksassa Rheda-tyypin kiintoraiderakenteissa. System 304 korvaa normaalisti pölkkyyn esiasennettavan W14-kiinnitysjärjestelmän. Merkittävin ero W14:ään on kiskon ja pölkyn väliin sijoittuva jousto- ja runkomelun vaimennuselementti sekä kiskon paikalleen kiinnittävä kiinnitysjouso (Sk1 21). Rakenteen osat on esitetty kuvassa 19. /27/28/

System 304 -kiinnitysjärjestelmässä joustoelementti kiskon ja pölkyn välissä aiheuttaa suuremman painuman kiskon suhteen, jolloin kiinnitysjousoon kohdistuvat suuremmat jännitystilat huiput sekä vaihtelut. Runkomelun vaimennuksen tehokkuus on rajoitetumpi verrattuna SAT S 312 -järjestelmään, koska joustoelementin yläpuolella värähtelevä massa jää pieneksi.



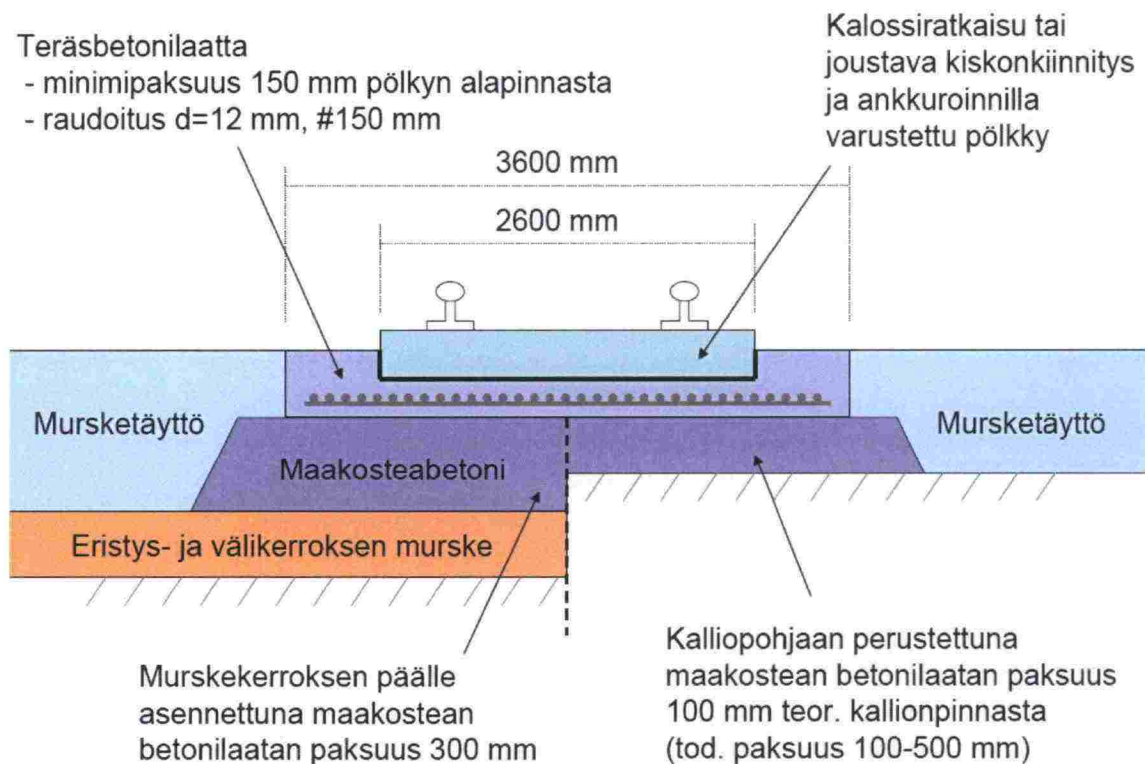
Kuva 19. Vossloh 304 -kiinnitysjärjestelmän osat /28/.

System 304 -kiinnitysjärjestelmää käytettäessä pölkky valetaan kiinteästi osaksi rakennetta. Valun rajapintaan betonin sitoutuessa ja lujittuessa muodostuvien kuivumis- ja kutistumishalkeamien rajoittamiseksi pölkkyyn on asennettava ankkurointiraudat. Tuotantotekniikka mahdollistaa ankkuriraudan sijoittamisen pölkkyyn siten, että valamisvaiheessa ankkuroiva osuus on taitettu pohjan tai sivun suuntaisesti. Vaihtoehtoinen tapa on tehdä pölkkyyn raudoituksen läpivientiä varten rei'itys aikaisempien Rheda-mallien (Classic, Sengeberg) tavoin. Ratkaisu on kuitenkin ongelmallinen betonivalun kannalta, koska työn aikana on kiinnitettävä erityistä huomiota siihen, että läpivienti täyttyy. Tiukassa läpiviennissä injektointi olisi tehtävä erikoislaastilla.

Parma Oy on antanut ratkaisulle kustannusarvion raportin yhteydessä tehtävää kustannuslaskentaa varten (18.4.2008). Ratkaisusta aiheutuvat lisäkustannukset muodostuvat tarvittavista investointikustannuksista, pölkkyyn asennettavista tartunta-raudoista sekä System 304 -järjestelmän lisäkustannuksesta. Investointikustannus 40 pölkyn tuotantolinjalle on 50 000 € ja pölkkykohtainen lisäkustannus tartunnoista sekä kiinnitysjärjestelmän osista on 44,50 €. /29/

4.3.4 Kantavan ja sitovan rakenteen toteutusvaihtoehdot

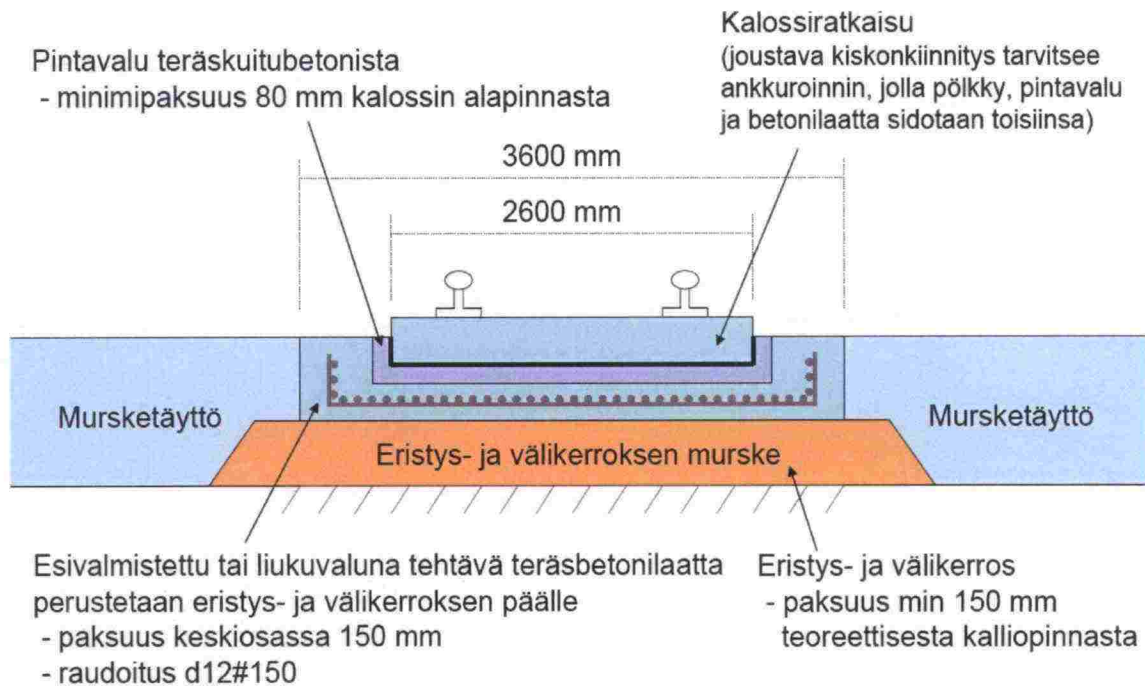
Selvityksen aikana muodostettiin kaksi erilaista toteutusvaihtoehtoa kiintoraiteen kanta-ville ja sitoville rakennekerroksille. Ensimmäisessä vaihtoehdossa (kuva 20) rakenne koostuu teräsbetonilaatasta sekä maakosteasta betonista valmistettavasta pohjalaatasta. Rakenne voidaan perustaa joko suoraan kallioon tai vaihtoehtoisesti eristys- ja väli-kerroksen murskeella tasatulle kalliopohjalle.



Kuva 20. Paikalla valetulla teräsbetonilaatalla toteutettu rakenne.

Maakosteaa betonikerroksen lujuusluokka on K10. Kiviaines on raekooltaan 0–8 mm ja sideaineena käytetään sementtiä, jonka määrä on 250 kg/m^3 . Vettä käytetään vain tarpeellinen vähimmäismäärä. Teräsbetonilaatta (ns. pintalaatta) asennetaan pohjalaatan ja oikeaan ratageometriaan asennetun raide-elementin väliin. Pintalaatta raudoitetaan teräsverkoilla $d12\#150$. Teräsbetonilaatan alapintaan tehdään liikunta- ja kutistumis-saumot noin 15 metrin välein.

Toinen ratkaisu (kuva 21) on toteuttaa pohjalaatta paksumpana kaukalona joko esivalmistetuista elementeistä tai liukuvaluna. Tässä tapauksessa raide sidotaan paikalleen ohuemmalla teräskuitubetonista tehtävällä pintalaatalla, jonka paksuus pölkyn ja betonikaukalon välissä on 80 mm. Kaukalo perustaan eristys- ja välikerroksen murskeella tasatulle tunnelipohjalle, jonka yläpinnassa voidaan käyttää asennusta varten tasaushiekkää.



Kuva 21. Kaukalarakenteella toteutettu kiintoraidevaihtoehto.

Betonikaukalo tai esivalmistettu betonielementti raudoitetaan teräsverkoilla d12#150. Esivalmistetun elementin koko määräytyy työmenetelmien sekä tunnelissa käytettävän nostokaluston kapasiteetista, esimerkiksi kolme metriä pitkän elementin painoksi muodostuu noin viisi tonnia. Kun betonikaukalo tehdään liukuvaluna, tehdään siihen liikunta- ja kutistumisauamat noin 15 metrin välein.

4.3.5 Perustaminen tunnelipohjaan

Selvityksessä tutkittiin kiintoraiteen perustamista suoraan kallio pohjaan sekä tasatun murskekerroksen päälle. Kiintoraiteelle rajoituksia asettivat kuivatusjärjestelmän sekä muiden LVISAT-järjestelmien vaatimat alitukset, tunnelin louhinnan työmenetelmät sekä riittävän routaeristyksen huomiointi alueilla, joilla rakenteella on routimisen mahdollisuus.

Tunnelin toiminnallisuuden kannalta keskeistä on järjestää tunneliin kallion tai muuta kautta kulkeutuvan veden kuivatus ja johtaminen pois tunnelista. Kehäradan tunnelin kuivatusjärjestelmä koostuu tunnelin molemmilla reunoilla kulkevista salaojaputkista sekä toisella reunalla kulkevasta kuivatusviemäristä. Putket ja viemäri on sijoitettu sivuille louhittaviin kanaaleihin. Vastakkaisen puolen salaojaputkista tehdään alitukset ja liitynnät kuivatusviemäriin 40 metrin välein. Koska tunnelia ei eristetä vesitiiviiksi, vaan tunneliin pääsee kulkeutumaan pieniä määriä vettä seinämien ja kallio pohjan

kautta, perustuu kuivatusjärjestelmä sepelitukikerroksellisella raiteella käytettyyn malliin.

Mikäli kiintoraiderakenne perustetaan maakostealla betonikerroksella suoraan kallio-pohjaan, rakenteen minimipaksuus on 100 mm teoreettisesta kalliopinnasta. Louhintatarkkuus huomioimalla kerroksen kokonaispaksuus vaihtelee keskimäärin välillä 100–500 mm ja LVISAT-alitukset toteutetaan tässä vaihtoehdossa kuivatusjärjestelmää varten 40 metrin välein louhittavien kanaalien yhteyteen. Toinen tarkasteltu vaihtoehto on perustaa kiintoraiderakenne tasatun eristys- ja välikerroksen murskeella (2–60 mm) tasatulle tunnelipohjalle, jolloin alitukset voidaan tehdä maakosteaan betonilaattaan tai alapuolelle louhittaviin alituksiin. Eristys- ja välikerroksen minimipaksuus on 150 mm teoreettisesta louhintarajasta.

Urakkaraja tunnelissa on sijoitettava louhintatarkkuuden seurauksena tasatun eristys- ja välikerroksen murskeella tehdyn kerroksen tai kallio-pohjaan perustetun maakosteasta betonista tehdyn pohjalaatan yläpintaan.

4.4 Tunnelipoikkileikkauksen optimointi

4.4.1 Yleistä

Kiintoraiteen eräänä valintaperusteena useissa maailmalla käytetyissä kohteissa on ollut mahdollisuus pienentää tunnelipoikkileikkausta, koska sepeliraiteeseen verrattuna kiintoraiteen rakennepaksuus on pienempi. Kiintoraiteen pysyvyyden sekä vaaditun mittaustarkkuuden seurauksena raiteelle ei tarvita samanlaisia tilavarauksia suhteessa sepelitukikerrokselliseen raiteeseen.

Tunnelipoikkileikkauksen leveys

Kehäradan tunnelipoikkileikkaus on rakenteiden ja teknisten järjestelmien edellyttämässä leveydessä eikä myöskään kaluston edellyttämä aukean tilan ulottuma salli merkittävää kavennusta. Kiintoraiteella ei saavuteta mahdollisuutta tunnelipoikkileikkauksen kaventamiseen suhteessa sepeliraiteella käytettävään poikkileikkaukseen.

Tunnelipoikkileikkauksen madaltaminen

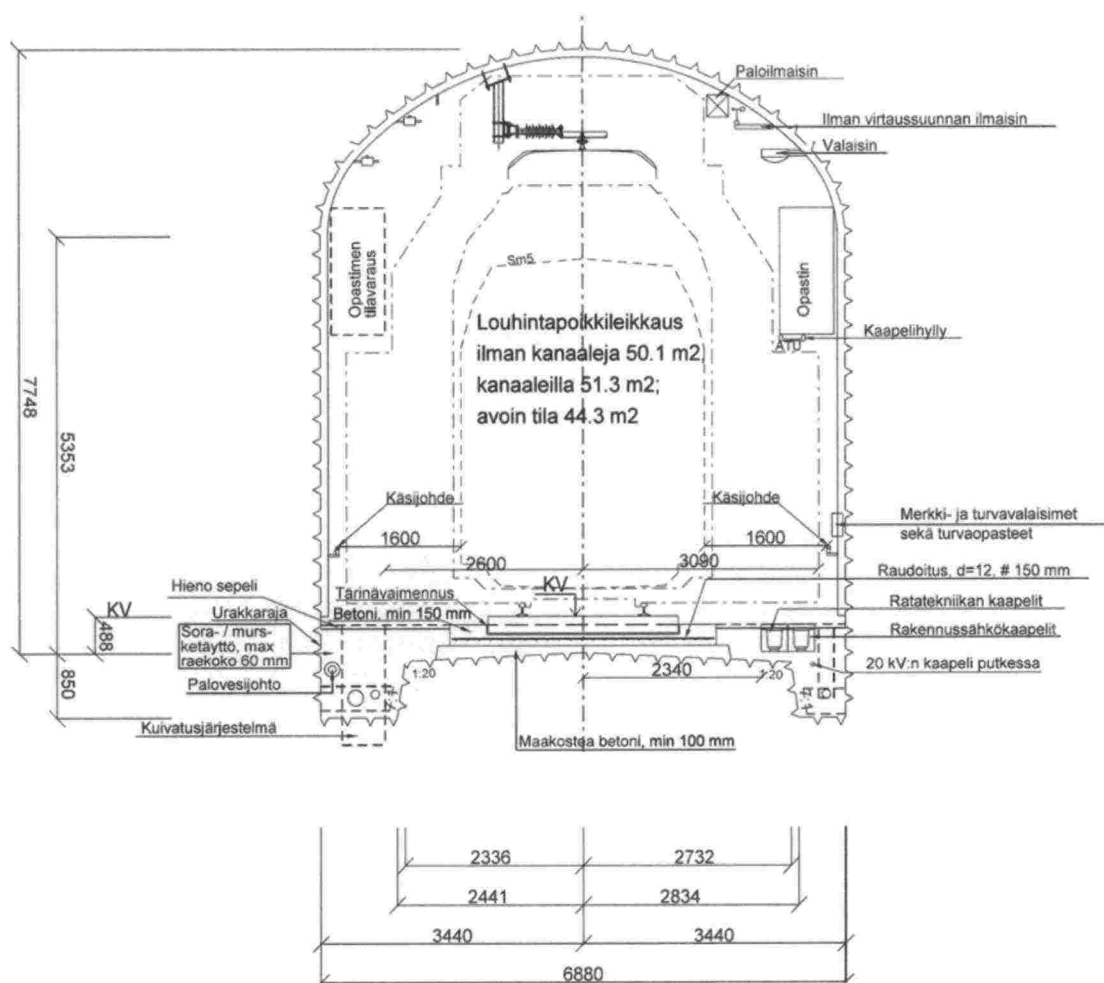
Tunnelin kattoa voidaan laskea kiintoajojohtimen avulla 300 mm (käsitelty kappaleessa 9.1).

Kiintoraiteella voidaan saavuttaa säästöjä tunnelin pohjan louhinnoista ohuemman rakennepaksuuden ansiosta. Tunnelin sivuille on kuitenkin sijoitettava kuivatusjärjestelmät molemmin puolin, mitä varten louhittavien kanaalien syveneminen suhteessa sepeliraiteen poikkileikkaukseen aiheuttaa lisäkustannuksen. Tarvittaessa voidaan myös ratatunnelin kuivatuskanaaleiden pohjia nostaa ylöspäin, mutta tämä edellyttää kuivatusputkien lämpöeristämistä ja/tai sähkölämmitystä suuaukkojen läheisyydessä.

Ratatunnelin pohja voidaan louhia tasaiseksi (sepeliraiteella 1:20), mutta näin saatava kustannussäästö on varsin marginaalinen. Kuivatusjärjestelmän periaatteena on kerätä vesi tunnelin sivuille, minkä takia kallistus on hyvä esittää suunnitelmissa. Suuaukkojen läheisyydessä kallio pohja betonoidaan routimisriskin vähentämiseksi.

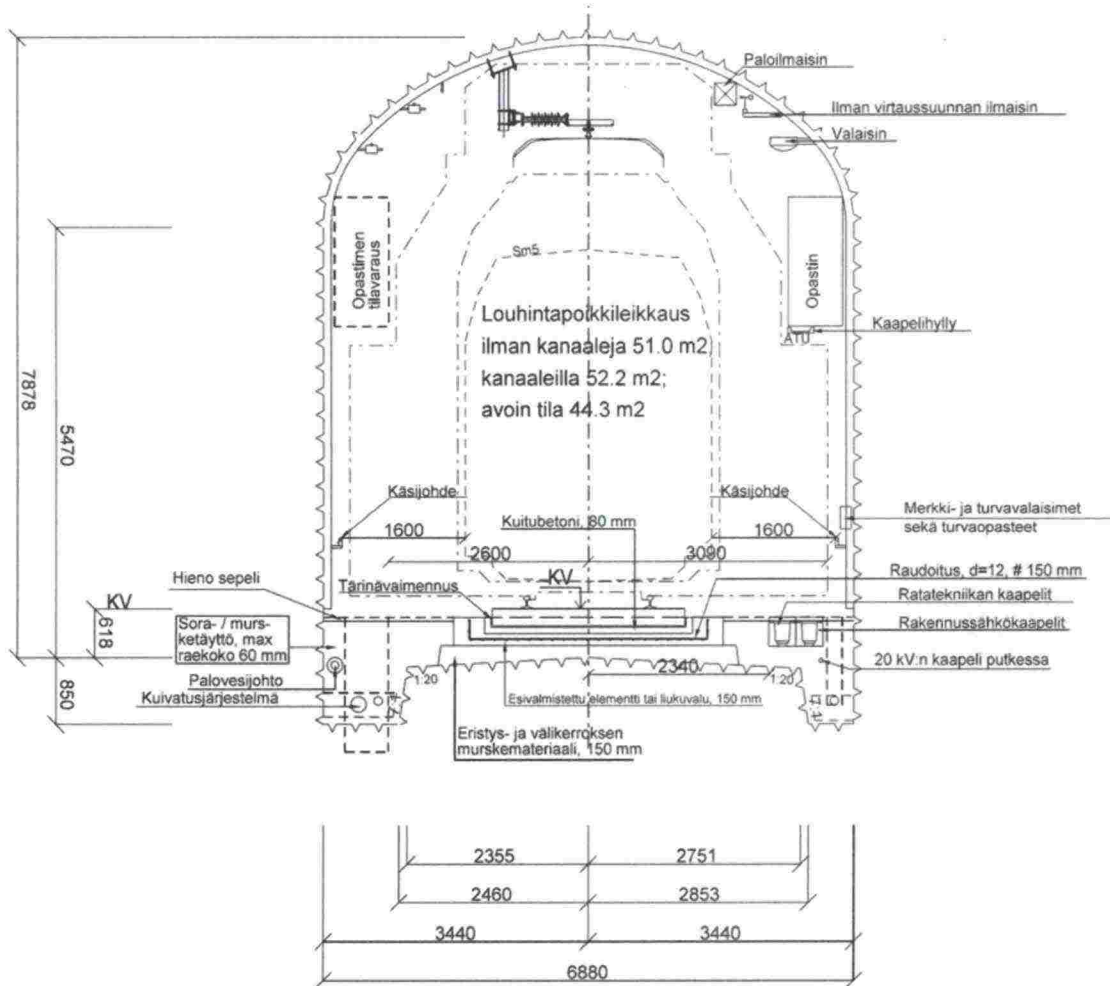
4.4.2 Tunnelipoikkileikkaukseen sovitetut rakenteet

Paikalla valettavalla betonilaatalla tunnelipoikkileikkaukseen asennettava rakenne on esitetty kuvassa 22. Kiintoraiteen ansioista tunnelin teoreettinen pohja nousee noin 660 mm. Ratkaisussa myös sivuilla olevia kanaaleita on madallettu. Tässä tapauksessa rakenne soveltuu vain tunnelin alueille, joissa rakenteella ei ole routimisvaaraa (ei suuaukkojen läheisyyteen). Kokonaisuutena tunnelipoikkileikkaus pienenee noin 4 m^2 .



Kuva 22. Paikalla valettavalla teräsbetonilaatalla toteutettava rakenne tunnelipoikkileikkauksessa.

Betonikaukalolla toteutettava rakenne vaatii suuremman rakennepaksuuden tunnelipoikkileikkauksessa, koska se on perustettava tiivistetyn murskekerroksen varaan. Kuvassa 23 on esitetty betonikaukalolla sovitettu tunnelipoikkileikkaus, missä tunnelipohjaa voidaan nostaa sepelitukikerrokselliseen rataan verrattuna noin 530 mm.

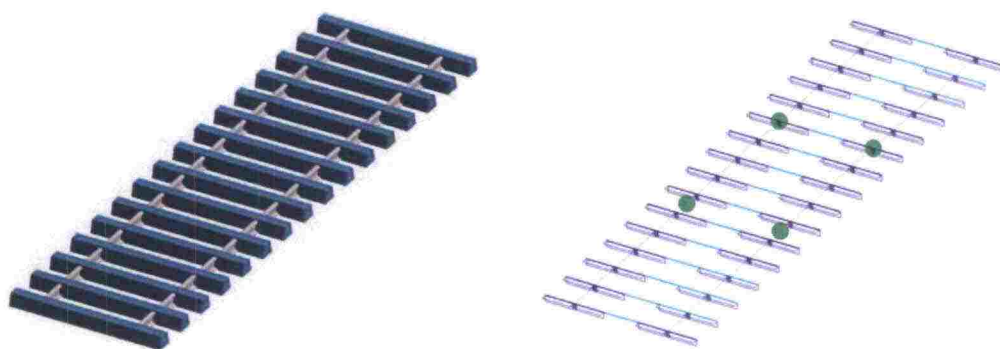


Kuva 23. Betonikaukalolla toteutettu rakenne sovitettuna tunnelipoikkileikkaukseen.

4.5 Rakenteiden värähtelytarkastelu

Kiintoraiderakenteiden suhteen arvioitiin rakenteen värähtelymahdollisuutta Kehäradan kuormitustilanteessa perustuen Sm5-kaluston ominaisuuksiin sekä liikennöinti nopeuteen. Riskinä on, että rakenteen ominaistajuuden ollessa sama kuin liikennekuormituksen ominaistajuus, rakenteessa voi syntyä resonanssia. Resonointi voi aiheuttaa rakenteen komponenttien vioittumista, jolloin rakenteen kunnossapitotarve kasvaa.

Ominaistajuustarkastelu on suoritettu arvioimalla kiskojen ja pölkkyjen muodostaman arinan ominaistajuuksia. Rakennemallina on käytetty 16 pölkyn ja kahden kiskon muodostama arinaa (kuva 24). Pölkkyvälinä on käytetty 610 mm. Pölkkyvälin kasvattaminen 610 mm:stä 650 mm:iin ei käytännössä vaikuta värähtelyselvityksen tuloksiin.



Kuva 24. Värähtelytarkastelussa tutkittavan raide-elementin koko ja kuorman jakautuminen pölkkytä alusrakenteeseen.

Jousivakiot on arvioitu laskemalla pölkyn painuma pystykuorman vaikutuksesta ottaen huomioon vaimennusmateriaali, murskepatja, betoni ja muu alusta tapauksen mukaan.

Jousivakiot (pölkyn 1 m tuettu pää):

- A Sepeliraide 135600 kN/m/m
- B Kiintoraide, jatkuva teräsbetoni laatta kalliolla. Pölkyn alla tärinä vaimennus ja 500 mm betoni. Eri tärinäeristeen jäykkyyksillä saadaan:

Eristeen jousivakio	Pölkynpään jousivakio
100 kN/m	99 878 kN/m/m
20 kN/m	19 995 kN/m/m
10 kN/m	9 999 kN/m/m

- C Kiintoraide, jatkuva teräsbetonilaatta täytöllä. Pölkyn alla tärinävaimennus ja 500 mm betoni ja 400 mm tiivistetty murske. Eri tärinäeristeen jäykkyyсарvoilla saadaan:

Eristeen jousivakio	Pölkynpäänjousivakio
100 kN/m	55 272 kN/m/m
20 kN/m	17 214 kN/m/m
10 kN/m	9 251 kN/m/m

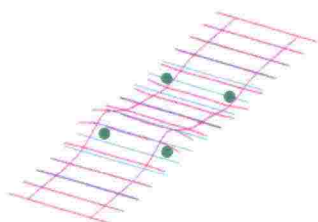
Ominaistaajuudet on laskettu Strusoft Fem -ohjelmalla avaruuskehänä. Määräävä tekijä on rakenteen alin ominaistaajuus, jossa värähtelyt kummallakin akselilla ovat samassa vaiheessa. Kiskojen ja pölkkyjen lisäksi massoina on käytetty yhdelle akselille (kaksi pyörää) massoja 1,5 + 1,5 tn. Tämä kuvaa pyörien ja niihin jäykästi kiinnitettyjen akseli- yms. massojen ylärajaa. Yläraja on määräävä tässä resonanssitarkastelussa.

Junan todelliset akselikuormat voivat olla jopa 200 kN. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä edellä esitettyyn resonanssitarkasteluun. Kiskojen kanssa yhdessä värähtelevä akselimassa on aina sama. Tarkkaan ottaen akselimassojen yläpuolelle tulisi mallissa lisätä junan jousitus ja sen päälle junan muu massa.

Sepeliraiteen (A) alimmat ominaistaajuudet

Massat eri vaiheissa

f (Hz)	T (s)
58,9	0,017



Massat samassa vaiheessa:

f (Hz)	T (s)
59,8	0,017



Käytännössä riittää tutkia yhtä tapausta, koska taajuudet ovat niin lähellä toisiaan. Ominaistaajuus vain yhden akselin massoilla on käytännössä sama kuin yllä. Systeemin ominaistaajuus pelkälle omalle painolle on huomattavasti korkeampi, 130 Hz.

Kiintoraidevaihtoehtojen (B, C) alimmat ominaistaajuudet

Mallin alustaluvut vaihtelevat välillä 9 250...100 000 kN/m/m. Lasketut alimmat ominaistaajuudet on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Kiintoraidevaihtoehtojen alimmat ominaistaajuudet.

k (kN/m/m)	f (Hz)	T (s)
9 250	20,5	0,049
20 000	27,9	0,036
50 000	40,0	0,025
100 000	52,4	0,019

Resonanssimahdollisuuden arviointi

Kuormituksena on toistuva kuormitus junan akselien ylittäessä kyseisen kohdan. Käytännössä merkitystä on vain peräkkäisten kahden akselin muodostamien telien yhteiskuorman toistumistaajuudella. Kuormitustaajuus laskettiin Sm5:n akselivälien perusteella (kuva 25).



Kuva 25. Sm5-junayksikön akselivälit

Millään tutkituista systeemeistä ei ole resonanssivaaraa esiintyvien kuormitustaajuuksien kanssa. Systeemin taajuudet ovat aina kuormitustaajuuden yläpuolella. Pienin systeemitajuus on 20,5 Hz ja suurin kuormitustaajuus 2,2 Hz. Ilman vaimennustakin systeemin vaste jatkuvaan harmoniseen kuormaan taajuudella 2,2 Hz olisi vain 1 % staattista vastetta suurempi, jos asiaa arvioidaan yhden vapausasteen vaimentamattoman värähtelijän vasteen avulla: $D = 1/(1-(2,2/20,5)^2) = 1,01$. Laskentatulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Junan telien kuormitustaajuudet.

Nopeus km/h	Nopeus m/s	Teliväli	T(s)	f (Hz)
50	13,9	15	1,08	0,93
80	22,2	15	0,68	1,48
100	27,8	15	0,54	1,85
120	33,3	15	0,45	2,22

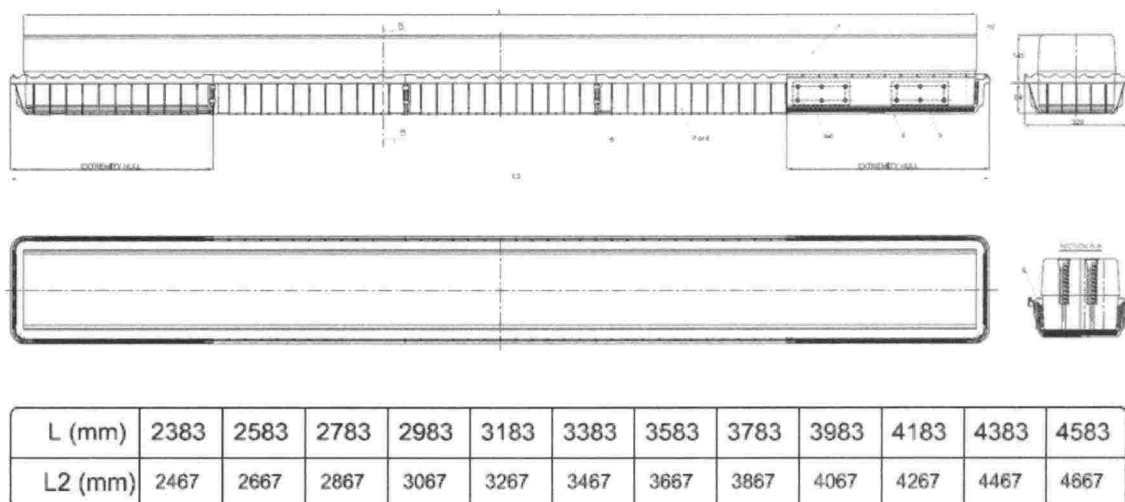
4.6 Kiintoraidevaihte

Kehäradan tunneliosuudelle toteutetaan yksi raiteenvaihtopaikka, johon sisältyy neljä YV60-300-1:9 vaihdetta. Kokemuksien mukaan vaihteiden kohdalla tarvitaan tuentaa ja muita kunnossapitotoimia normaalia linjaraihteeseen verrattuna merkittävästi tiheämmin. Kiintoraidevaihteella näiden tarve vähenee olennaisesti. Kiintoraidevaihteen suunnittelun lähtökohdaksi asetettiin kalossiratkaisuun perustuva malli, minkä ansiosta myös vaihdepölyt ovat myöhemmin vaihdettavissa. Kyseisestä rakenteesta on kokemuksia mm. Pariisi–Strasbourg välin kiintoraiteen koekohteella, mitä on käsitelty tarkemmin liitteessä 1.

Kiintoraidevaihteen muita suunnittelun pääperiaatteita olivat:

- teräsosat samoja kuin sepelitukikerroksellisessa YV60-300-1:9 vaihteessa
- vaihteen kokoonpanomenetelmiin ei tehdä mittavia muutoksia
- vaihteet on pystyttävä kuljettamaan samoin periaattein kuin sepeliraihteelle asennettavat vaihteet
- vaihteiden kunnossapidossa ei muodostu tarvetta suuriin menetelmämuutoksiin.

Vaihteen pölkkyt voidaan toteuttaa nykyisten betonisten vaihdepölkkyjen tavoin muottiin asennettavien lisäosien avulla. Koska tuotantoerä koskee vain muutamaa vaihdetta, päädyttiin ratkaisuun, jossa lisäosat hankitaan 200 mm välein vaihtuvien muottien osalta. Pölkkyjen sijoitus SAT S 312 -järjestelmään sekä mitat on esitetty kuvassa 26. Uudella pölkkytyksellä laadittiin kiintoraidevaihteelle linjakuvio perustuen perinteiseen betonipölkkyvaihteeseen YV60-300-1:9.



Kuva 26. Piirustus kalossiin asennettavasta kiintoraidepölkystä sekä vaihteessa tarvittavien pölkkyjen mitat (L =pölkyn pituus, $L2$ =kalossin pituus) /25/.

Kokoonpanossa erot liittyvät lähinnä valmistusalustaan, jossa kalossin vaatima tilan tarve on huomioitava. Kielisovituksen valmistuksessa tämä tarkoittaa kokoonpanoalustan korotusta ja risteyksen ja välikiskon osalta kokoonpanoalustan uusimista vastaavaksi kuin kielisovituksen kokoonpanoalusta. Lisäksi pölkkyjen asennus alustalla on kalossin takia hivenen tarkempi työvaihe, koska pölkyn siirto pölkyn pituussuunnassa on hankalaa.

Kiintoraidevaihteiden varastoinnissa on otettava huomioon kalossi, joka ei kestä merkittävää elementtien pinoamista. Kiintoraidevaihteen kuljetus on tehtävä maantiekuljetuksena, koska kiintoraidevaihteen kuljetus kallistettuna nykyisellä kalustolla ei onnistu.

Kustannukset:

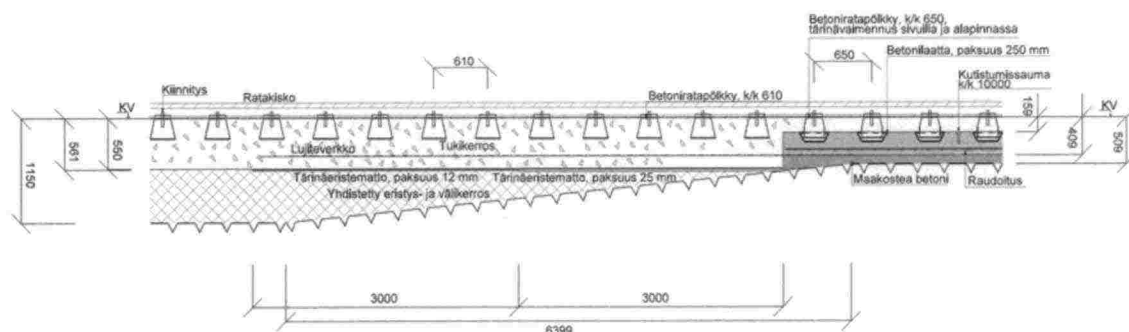
- teräsosat ovat samoja → ei lisäkustannuksia
- pölkkykustannukset (suurin) → n. 30–40 % lisäkustannus normaalipölkkyyn
- kokoonpanoalustan muutokset → kustannukset 1 000–3 000 €
- kokoonpanolisäkustannukset → n. 10 % /vaihde
- kuljetuksen lisäkustannukset → kuljetuksen lisäkustannus n. 30 % /vaihde

4.7 Siirtymärakenteet

Koska kiintoraiteen ja sepeliraiteen muodonmuutosominaisuudet ovat erilaiset, rakenteen vaihtumiskohtaan täytyy sijoittaa siirtymärakenne, joka tasaa raiderakenteen vaihtumiskohtaan muodostuvat painumaerot siirtymärakenteen pituudelle. Siirtymärakenteen avulla vältetään siten liian suurilta kiskoon tai ratapölkkyyn muodostuvilta paikallisilta rasituksilta ja toisaalta pehmennetään raideliikennekalustolle painumaerosta aiheutuvaa epätasaisuutta tai heittoa. Painumaeroa rakenteen vaihtumiskohtaan muodostuu sekä elastisten (palautuvien) painumien, että aikaa myöten tapahtuvan sepelin viskoosin (palautumattoman) painumisen johdosta.

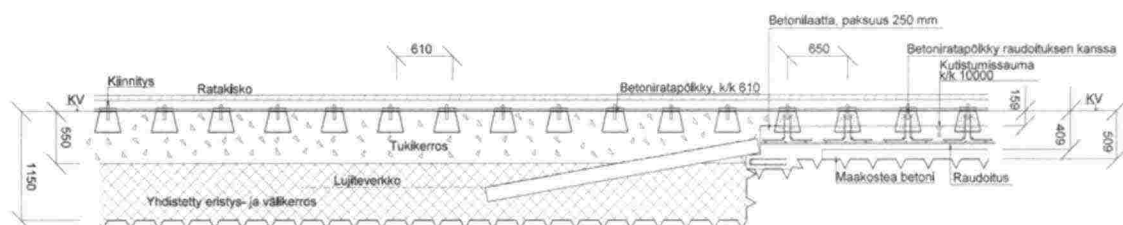
Siirtymärakenteita tarvitaan kahden erityyppisen painumaeron hallintaan. Jos kiintoraideratkaisun tärinäeristys sijaitsee ratapölkyn alapuolella (esimerkiksi Sateba), ratapölkyn painumat kiintoraiteella ovat suurempia kuin sepeliraiteella. Jos taas tärinäeristys sijaitsee kiskon ja ratapölkyn välissä (esimerkiksi Vossloh 304), ratapölkyn painumat ovat kiintoraiteella sepeliraidetta pienempiä, mutta kiskon painumat kiintoraiteella sepeliraidetta suurempia.

Mikäli tärinäeristys sijaitsee ratapölkyn alapuolella, sepelitukikerrosta täytyy asteittain pehmentää ennen kiintoraiteelle siirtymistä. Siirtymärakenne on esitetty kuvassa 27. Sepelitukikerroksen pehmennys tapahtuu tärinäeristysmatoilla, joiden paksuus on kiintoraiteen vieressä 25 mm ja kauempana 12 mm. Sepelikerrokset varustetaan lisäksi viskoosien painumien estämiseksi lujiteverkoilla, joista toinen sijoitetaan välittömästi tärinäeristematon yläpuolelle ja toinen ylemmäs tukikerrokseen. Siirtymärakennetta voidaan tarvittaessa myös jatkaa kiintoraideosuudelle aloittamalla se jäykemmällä pölkyn alapuolisilla tärinäeristysrakenteilla ja pehmentämällä niitä asteittain suunnitelmien mukaiseen tavoitejäykkyyteen kiintoraideosuuden alussa.



Kuva 27. Siirtymärakenne sepeliraiteelta kiintoraiteelle, kun kiintoraiteen tärinäeristys sijaitsee ratapölkyn alapuolella.

Jos tärinäeristys sijaitsee kiskon ja ratapölkyn välissä, täytyy ennen kiintoraiteelle siirtymistä sepelitukikerrosta asteittain jäykentää sekä kiskon ja ratapölkyn välistä kiinnitystä asteittain pehmentää. Sepelitukikerroksen jäykentäminen tapahtuu kuvassa 28 esitetyn siirtymälaatan avulla. Siirtymälaatta on toisesta päästään tuettu kiintoraiteen alusrakenteessa olevan konsolin varaan ja muilta osin se lepää vapaasti välikerroksen varassa. Siirtymälaatan yläpinnassa on lisäksi lujiteverkko, joka jatkuu siirtymälaatan päältä myös sepelirataosuudelle. Kiskon ja ratapölkyn välisen kiinnityksen asteittainen pehmentäminen aloitetaan sepeliraideosuudella jo ennen siirtymälaattaa ja päätetään siirtymälaatan kiintoraiteen puoleisessa päässä, jossa kiinnitys saavuttaa tavoitejäykkyytensä.



Kuva 28. Siirtymärakenne sepeliraiteelta kiintoraiteelle, kun kiintoraiteen tärinäeristys sijaitsee kiskon ja ratapölkyn välissä.

5 RUNKOMELUN VAIMENNUKSEN TARKASTELUT

5.1 Runkomelun esiintyminen

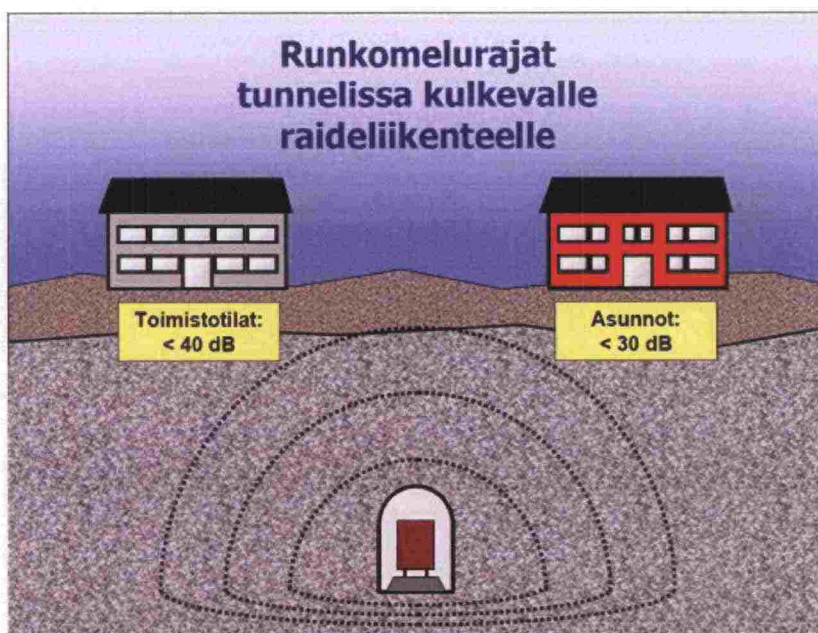
Raideliikenteen runkomelu aiheutuu ratarakenteiden ja maaperän välityksellä rakennuksiin kytkeytyvästä värähtelystä. Runkomeluhaitat rajoittuvat yleensä alueille, joissa rata ja läheiset rakennukset ovat kallioperustaisia, tai radan ja rakennusten välinen etäisyys on hyvin pieni. Runkomelua voi esiintyä sekä tunneli- että avorataosuuksilla.

Maaperän tyyppi on tärkein runkomelun esiintymiseen vaikuttava tekijä. Pehmeät maainekset kuten savi, mutta myös tiiviimpi moreeni vaimentavat kuuloalueella havaittavia värähtelytaajuuksia tehokkaasti, joten runkomelu vaimenee nopeasti etäisyyden kasvaessa ja potentiaalinen runkomelualue jää yleensä hyvin pieneksi. Kalliossa etenevä värähtely vaimenee kuitenkin huomattavasti hitaammin.

Runkomelua voi esiintyä, vaikka värähtelyn amplitudi olisi merkittävästi alle tärinäaistimuksen herkkyyskynnyksen. Tämä tilanne pätee tyypillisesti kallioalueilla ja tunneliosuuksilla, joissa tärinä ei muodosta ongelmaa, mutta runkomeluhaittoja voi esiintyä laajalla alueella radan ympäristössä. Tunneliosuuksilla rata on aina kallioperustainen, jolloin runkomelualueisiin vaikuttaa etäisyyden lisäksi vain rakennusten alle jäävän maakerroksen paksuus sekä rakennusten perustamistapa.

5.2 Runkomelurajat

Kehäradan ratasuunnittelun yhteydessä on sovittu, että raideliikenteen runkomelun tarkastelussa ja eristysten mitoituksessa käytetään seuraavia raja-arvoja: tunneliosuuksilla runkomelun enimmäistason L_{ASmax} tulee olla enintään 30 dB asuinhuoneissa ja 40 dB toimisto- ja liiketiloissa (kuva 29). Avorataosuuksilla runkomelurajat ovat vastaavasti 35 dB ja 45 dB.



Kuva 29. Kehäradan suunnittelussa käytetyt runkomelurajat tunnelissa kulkevalle raideliikenteelle. /30/

5.3 Eristämättömän sepeliradan runkomelualueet ja eristysratkaisut

Eristämättömän sepeliradan tapauksessa asuntojen 30 dB runkomelualue ulottuu kallioalueilla noin 100 m etäisyydelle radasta ja toimistotilojen 40 dB alue noin 40 m etäisyydelle radasta.

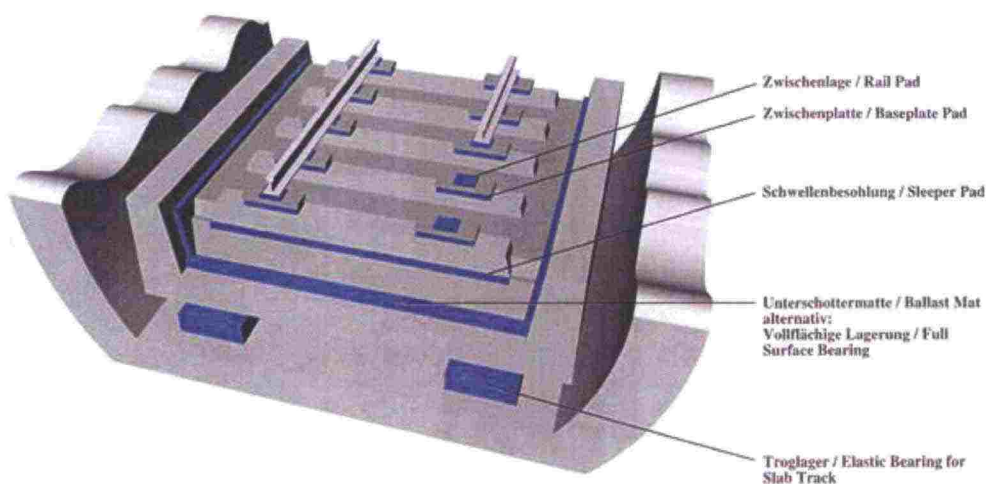
Runkomelualueita voidaan pienentää ratarakenteisiin sijoitettavalla eristyksellä. Yleisin ratkaisu sepeliradan eristämiseksi on sepelitukikerroksen alle sijoitettava joustava eristysmateriaali (sepelinalusmatto).

5.4 Eristämättömän kiintoraiteen runkomelualueet ja eristysratkaisut

Kiintoraiteen runkomelualueet riippuvat ratarakenteiden joustavuudesta. Jos kiskojen alusrakenne olisi täysin jäykkä, asuntojen 30 dB runkomelualue ulottuisi noin 200 m etäisyydelle ja toimistotilojen 40 dB alue noin 100 m etäisyydelle radasta. Kiskoihin ja pyöriin kohdistuvien voimien rajoittamiseksi kiintoraideratkaisuihin sijoitetaan kuitenkin pientä joustoa, jolloin rakenteen ominaisuudet lähestyvät sepelirataa. Kiintoraiteen runkomeluoiminaisuudet jäävät tyypillisesti kuitenkin enintään sepeliradan tasolle tai jonkin verran sitä heikommiksi.

Kiintoraiteen mahdolliset eristysratkaisut (kuva 30) voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- I Massa-jousijärjestelmä, jossa eristys on sijoitettu syväälle jäykän betonirakenteen alle. Runkomelun kannalta ratkaisulla voidaan päästä jopa eristettyä sepelirataa parempaan tulokseen. Ratkaisu on kuitenkin niin kallis, ettei se tule kyseeseen.
- II Pölkyn alle sijoitettu eristys (kalossiratkaisut), esim. Sateba SAT S 312, Sonneville LVT tai Edilob EBS -järjestelmät.
- III Pölkyn ja kiskon väliin sijoitettu eristys, esimerkiksi Vossloh System 304 tai upotetut kiskojärjestelmät.



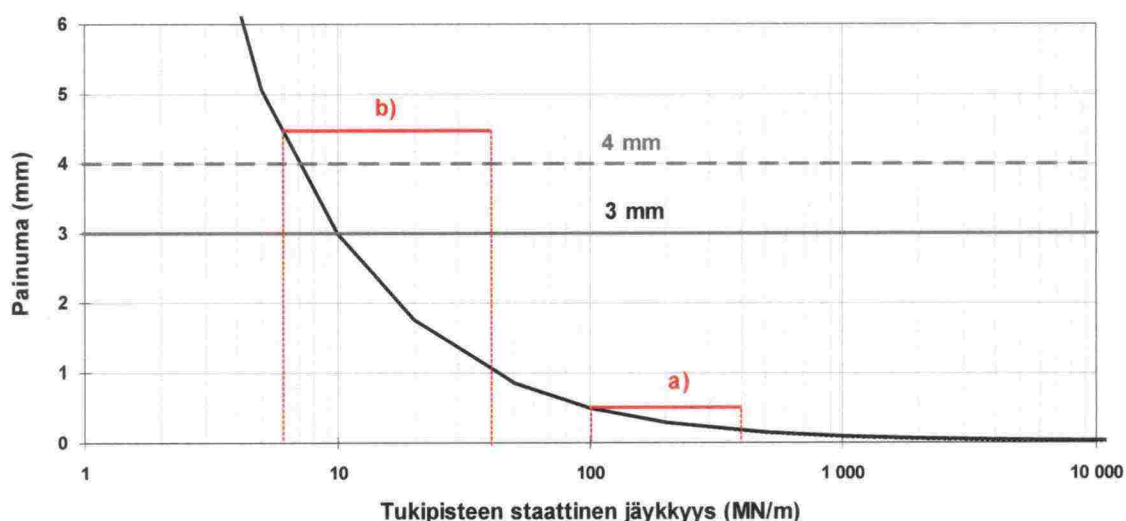
Kuva 30. Runkomelueristysten vaihtoehtoiset sijoitusratkaisut /32/.

5.5 Runkomelueristyksen mitoituksen vaikuttavia tekijöitä

Kun ratarakenteeseen sijoitetaan joustoa, rata painuu junan kuormituksen alla. Kiskojen suurin sallittu painuma asettaa näin ollen rajat sille, kuinka tehokkaaksi runkomelueristys voidaan tehdä. Kuvassa 31 on esitetty esimerkki kiskon painumasta tukipisteen jäykkyyden funktiona 200 kN akselikuormalla.

Kiskojen painuma määräytyy eristysratkaisun staattisen jousivakion mukaan, kun taas runkomelueristävyys määräytyy dynaamisen jousivakion mukaan taajuusalueella 80–160 Hz. Dynaaminen jousivakio on aina suurempi kuin staattinen jousivakio, mutta niiden suhde riippuu sekä eristysmateriaalista että eristysratkaisusta. Mitä pienempi vakioiden välinen suhde on, sitä suurempi eristys saavutetaan samalla painumalla.

Eristysratkaisuissa eristeen päälle jäävien rakenteiden massa vaikuttaa myös eristävyys: kalossiratkaisulla varustetulla kiintoraiteella saavutettava eristävyys on 2...3 dB heikompi kuin sepelinalusmatolla varustetun sepeliradan tapauksessa. Kiintoraiteen kiskon ja pölkyn väliin sijoitettavalla eristeellä saavutetaan edelleen noin 2 dB pienempi eristävyys.



Kuva 31. Kiskon painuma tukipisteen jäykkyyden funktiona 200 kN akselikuormalla. Alue a) edustaa eristämätöntä sepelirataa; alue b) tyypillistä runkomelueristettyä rataa (ensisijaisesti sepelirata; mahdollisesti myös kiintoraide).

5.6 Kiintoraidevaihtoehtojen tarkastelu

5.6.1 Kalossivaihtoehto (SAT S 312 -järjestelmä)

Kalossivaihtoehtoista tarkasteltiin tässä selvityksessä lähemmin Sateban ratkaisuja. Sateba tarjoaa runkomelun eristävyiden kannalta kolmea vaihtoehtoa S1, S2 ja S3, joiden staattiset jousivakiot ovat noin 25 MN/m (*arvio*), sekä 14 MN/m ja 8 MN/m (*valmistajan ilmoittamat*). Joustomateriaalina käytetään Getznerin Sylodyn-tuotteita, joiden ansiosta dynaamiset jousivakiot eivät nouse kovin paljon staattisista. Matalille taajuuksille ilmoitetut dynaamiset arvot ovat vain noin 1,1-kertaisia staattisiin verrattuina.

Runkomelun eristävyteen taajuusalueella 80–160 Hz vaikuttavia dynaamisia jousivakioita ei ole ollut saatavissa, mutta voitaneen melkoisella varmuudella olettaa, että ne ovat enintään kaksinkertaisia staattisiin verrattuina. Tällöin vaihtoehto S1 tarjoaa riittävän runkomelueristyksen toimistotilojen 40 dB runkomelualueilla. Vaihtoehdolla S2 päästään saamaan lopputulokseen kuin 10 desibelin eristyksellä sepeliradalla, jolloin se kelpaa myös Ruskeasannan itäpuolella asuntojen 30 dB runkomelualueella. Poikkeuksena on tällä alueella oleva lyhyt rataosuus (km 29+010–29+070), joka vaatii 14 dB eristystä sepelirataan nähden /30/31/. Tältä osin vaihtoehto S3 tarjoaisi vastaavan eristyksen.

Sateban vaihtoehtoilla S1 ja S2 kiskon painuma jäisi 200 kN akselikuormalla alle 3 mm:n. Vaihtoehdolla S3 painuma todennäköisesti ylittäisi 3 mm, mutta jäisi vielä alle 4 mm:n.

Sateban kalossivaihtoehtoja vastaaviin tuloksiin voidaan myös päästä Edilonin ja Sonnevillen kalossiratkaisuilla. Malmö Citytunnelniin on valittu Sonnevillen kokoonpano, jossa eristysmateriaalina käytetään 18 mm paksuista Sylodynia. Painumaa joudutaan tällöin tietävästi sallimaan 4 mm:iin asti.

5.6.2 Joustava kiskonkiinnitys (System 304)

Joustavana kiskonkiinnitysvaihtoehtona on tarkasteltu lähemmin Vosslohin valmistama System 304 -kiinnitysjärjestelmää, joka vastaa esimerkiksi Köln–Frankfurt-suurnopeusradan Rheda-tyyppisissä ratkaisuissa käytettyä kiskonkiinnitystä.

Valmistaja ilmoittaa System 304:n staattiseksi jousivakioksi 25 MN/m. Dynaaminen jousivakio on tuskin yhtä lähellä staattista kuin kalossiratkaisuissa, joissa käytetään Sylodyniä tai vastaavaa materiaalia.

Valmistajalta ei ole saatu tietoa tai arviota rakenteen dynaamisesta jousivakiosta 80–160 Hz taajuusalueella. Voidaan ehkä olettaa, että se on enintään kolminkertainen staattiseen verrattuna. Tällöin Vossloh 304 voisi runkomelun kannalta olla Kehäradan tunneliosuudella riittävä ratkaisu 40 dB runkomelualueilla. Kiskon painuma jää rakenteella alle 2 mm:n. Vossloh 304 -kiinnityksen dynaamisella joustolla ei kuitenkaan missään tapauksessa päästä sepeliradan 10 dB eristystä vastaavaan tulokseen.

Joustavampia kiinnitysvaihtoehtoja kuin Vossloh 304 ovat ns. Kölnin muna, jota on asennettu lyhyellä matkalla Helsingin metrossa, tai sitä vastaava Vossloh Delkor sekä

Pandrol Vanguard, jota on käytetty mm. Lontoon metrossa. Näillä ratkaisuilla voidaan päästä sepeliradan 10 dB:n eristystä vastaaviin tuloksiin painuman ollessa 3–4 mm. Sepeliradan 14 dB:n eristystä vastaavaan tulokseen ei kuitenkaan päästä alle 4 mm painumalla.

5.7 Eristyksen kustannukset

Kiintoradan rakenneratkaisuissa käytettävien runkomelueristeiden tarjoama jousto on tietyltä osin muutenkin tarpeen rajoittamaan pyörän ja kiskon välisiä voimia. Runkomelueristyksen kustannukset eivät ole yksittäisten ratkaisujen osalta eriteltävissä muilta osin kuin vertaamalla esimerkiksi Sateban vaihtoehtojen S2 tai S3 lisähintaa vaihtoehtoon S1 nähden.

Verrattaessa kiintoratavaihtoehtojen kustannuksia sepelirataan tilanne on lähinnä se, että runkomelueristyksen kustannukset sisältyvät jo integroituna kiintoradan kustannuksiin, mutta sepeliradan vertailukustannuksiin ne on lisättävä siltä osin kuin eristystä tarvitaan. Kehäradan ratasuunnittelussa tunneliosuuden sepeliradalle mitoitettuun runkomelueristykseen tarvittava eristysmateriaali maksaa 40 dB runkomelualueilla noin 90 000 € ja 30 dB runkomelualueilla Ruskeasannasta itään noin 400 000 €. Asennus- ja muut lisäkustannukset ovat karkeasti 50 % materiaalikustannuksista.

6 KIINTORAITEEN ASENNUS- JA KUNNOSSAPITOMENETELMÄT

6.1 Lähtökohdat

Kiintoraiteen asennus- ja kunnossapitomenetelmät ovat yleisesti sidoksissa tuotejärjestelmän toiminnallisiin ominaisuuksiin. Järjestelmät poikkeavat toisistaan teknisten ratkaisujen osalta, joten myös rakentamismenetelmät ja kunnossapitotarve ovat lähtökohtaisesti erilaisia.

6.2 Rakenteiden asennustoleranssit

Laatuvaatimukset kiintoraiteen raidegeometrian mittatarkkuudelle tulisi asettaa tuotejärjestelmästä riippumattomaksi. Järjestelmien vastaavuus näihin vaatimuksiin tulisi myös olla riippumaton rakenteellisista ratkaisuista. Käytännössä erot tuotejärjestelmien asennus- ja mittausten menetelmien välillä saattavat olla merkittäviä ja soveltuvuus kohteeseen tulisi selvittää ennen sitoutumista tietyn järjestelmän hankintaan.

6.3 Kiintoraiteen asennusmenetelmät

Kiintoraiteen asennus betoniseen tukirakenteeseen voidaan jakaa kahteen työvaiheeseen:

Vaihe I

- Peruslaatan valmistelu
- Raiteen alustava paikalleen mittaus
- Kiintoraidejärjestelmän asennus
- Kiskojen kiinnitys kiintoraidejärjestelmään ja asemointi
- Raiteen paikalleen mittaus
- Betonoinnin valmistelu
- Tarkistusmittaus

Vaiheen I läpiviennin kannalta ratkaisevin tekijä on raiteen asemointi ja paikalleen mittaus. Lisäksi tulee huomioida tuotejärjestelmään mahdollisesti sisältyvät raudoitteet ja niiden edellyttämä asennustyö.

Vaihe II

- Betonointi
- Asemointirakenteen vapautus ja purku
- Muottien purku
- Raidetyöt
- Tarkistusmittaus
- Kiskon ja komponenttien puhdistus
- Muut viimeistelytyöt

Vaiheessa II merkittävin seikka on betonoinnin logistiikka yksiraiteisessa tunnelissa. Lisäksi tulee huomioida tuotejärjestelmään mahdollisesti sisältyvät erikoisbetoni ja muut materiaalit sekä niihin liittyvä asennustyö.

6.4 Kiintoraiteen kunnossapitomenetelmät

Kiintoraiteen kunnossapito käsittää tukikerrokselliseen rataan verrattuna vain muutamia yksittäisiä toimenpiteitä. Päätehtävä tulee olemaan kiskon ja kiinnitysten kunnan tarkkailussa. Raidetta tukeva betoninen peruslaatta voidaan olettaa pääosin huolto-vapaaksi. Ratapölkkyjen ja värähtelyä vaimentavien osien kuntoa on myös tarkkailtava säännöllisesti. Kokemukset muualta Euroopasta antavat viitteitä, että satunnaisiin ”selittämättömiin” vaurioihin viimeksi mainituissa rakenneosissa tulee varautua.

Kunnossapitoon liittyvät toimenpiteet vaikeutuvat merkittävästi ja kasvavat kustannuksiltaan suuremmiksi siirryttäessä kiintoraiteen rakenneosissa ”ylhäältä alaspäin”.

Kiskon vaihdon tulisi olla tuotejärjestelmästä riippumatta normaali toimenpide samoin kiskon kiinnitysten uusiminen. Kiinnitysten irrottamisen yhteydessä saatetaan tarvita erikoisvalmisteisia kiskoja tukevia rakenteita käytettäessä värähtelyä vaimentavaa tai joustavaa pölkyn tuentaa.

Raidegeometrian pienten muutosten toteuttamisen tulisi myös olla mahdollista ilman laajamittaisia tukirakenteen purkamistoimenpiteitä.

Betonipölkkyjen uusiminen tulisi tehdä aina tuotejärjestelmän toimittajan tai suunnittelijan ohjeiden mukaisesti. Yleisesti uusimiseen on käytetty ns. korjauspölkkyä, joka on mitoiltaan normaalia järjestelmän ratapölkkyä pienempi. Toimenpide saattaa edellyttää erikoistyövälineiden käyttöä. Pölkyn uusiminen voi edellyttää myös alustan betonilaatan osittaista purkamista ja korjaamista.

Varautuminen itse kiintoraidejärjestelmän rakenneosien korjaamiseen voidaan huomioida ns. riskivaruksena määrittäessä kunnossapidon vuosikustannuksia. Lähtökohdaksi voidaan ottaa normaalin kiskonkiinnitysten korjausten lisäksi esim. 2/1000 pölkyn vaihto suunnitellun käyttöiän aikana. Erikoiskaluston hankinta ja ylläpito sekä tuotejärjestelmään kuuluvan korjausmateriaalin hankinta- ja varastointi tulisi myös sisällyttää kustannusarvioon. Erot tuotejärjestelmien kunnossapitotarpeissa voivat olla huomattavia, joten yleistä arviota vuotuisista kustannuksista ei ole tarkoituksenmukaista esittää. Yleisesti voidaan todeta, että mitä vähemmän kiintojärjestelmässä on rakenneosia, sitä riskittämpi se on kunnossapidon kannalta.

7 KIINTORAITEEN KUSTANNUSARVIO

7.1 Kustannuslaskentaan liittyvät ongelmat ja käytetyt laskentamenetelmät

7.1.1 Operatiivisen laskentatoimen ongelmia ja niiden ratkaisuperusteita

Kustannuslaskennassa kaikki kustannukset eivät aina ole yksiselitteisesti mitattavissa tai niiden arvostus voi olla vaikeaa. Usein kustannuslaskennan ongelmille on olemassa useampia ratkaisuja ja riippuu tilanteesta, miten ongelma on järkevintä ratkaista. Ongelmat voidaan jakaa viiteen eri pääryhmään: *laajuusongelma*, *mittausongelma*, *arvostusongelma*, *kohdistamisongelma* ja *jaksotusongelma*. /33/

Laajuusongelmassa on kyse siitä, mitä kustannuksia ja tuottoja tulisi ottaa mukaan laadittaessa erilaisia laskelmia. Laskelmien tulee antaa riittävät perusteet päätöksenteolle. *Mittausongelma* liitetään yleensä tuotannon tekijöiden ja suoritteiden määrän mittaamiseen. *Arvostusongelmalla* tarkoitetaan sitä, miten esimerkiksi tuotteeseen tarvittavan raaka-aineen arvo tulisi määritellä. /33/

Laajuusongelma on kiintoraiteen yhteydessä pyritty ratkaisemaan ottamalla huomioon ainoastaan ne komponentit, joissa oli eroja sepeli- ja kiintoraiderakenteiden välillä. Laskennassa siis oletettiin, että laskennan ulkopuolelle jätettyjen rakenteiden tai teknisten komponenttien hinta olisi joko a) sama tai b) kustannuslaskennan kannalta epärelevantti. Kustannuslaskennan kannalta epärelevantti rakenne voidaan valita useista vaihtoehdoista riippumatta siitä, valitaanko sepeli- vai kiintoraide. Tällainen rakenne on esimerkiksi kiintoajojohto vs. tavallinen ajojohtojärjestelmä.

Mittaus- ja arvostusongelmaa pyrittiin vähentämään käyttämällä kustannuslaskennassa olemassa olevia komponentteja ja työmenetelmiä, joiden materiaali- ja suoritelmäärät sekä yksikkökustannukset voitiin arvioida melko luotettavasti. Kustannuslaskennassa on siten käytetty kunkin rakenteen osalta ainoastaan sellaisia työmenetelmiä ja siten kustannuksia, joille on ollut saatavissa perusteltu määrä sekä yksikköhinta joko asiantuntija-arviona tai RAPALin taulukoista.

Sekä mittaus-, laajuus- että arvostusongelmaan liittyy joukko kiintoraiteen hankintaan liittyviä, piilokustannusten luonteisia kustannustekijöitä. Näitä ovat mm.

- uusien työmenetelmien opettelu, osaamisen tuominen Suomeen ja soveltaminen paikallisiin oloihin
- jo olemassa olevat erityiskoneet, niiden kuljetus, käyttö sekä varaosien ja huollon järjestäminen
- uusien erityiskoneiden mahdollinen kehittämistarve.

Koska kustannukset ovat piilokustannusten luonteisia, niitä ei ole voitu ottaa kustannuslaskennassa huomioon. Osalle edellä mainituista kustannustekijöistä voidaan saada arvo, jos kiintoraiteesta päätetään pyytää tarjoukset. Näiden tekijöiden huomioonottaminen voi nostaa kiintoraiteen vertailuhintaa olennaisestikin.

Kohdistamisongelma viittaa sellaisten kustannusten kohdistamiseen, jotka ovat yhteisiä useille tuoteryhmille, tuotteille tai osastoille /33/. Usein tässä yhteydessä puhutaan myös yleiskustannuksista, jotka ovat kiinteiden kustannusten luonteisia. Yleiskustannukset

voidaan jakaa soveltuvin osin nauhakustannuksiksi [€/rd-m] tai olettaa niiden sisältyvän radan kunnossapitäjän ilmoittamiin yksikkökustannuksiin.

Jaksotusongelma liittyy kysymykseen, miten usealle eri laskentajaksolle ulottuvat kustannukset jaetaan eri laskentakausille /33/. Kiintoraiteen osalta jaksotusongelma on itse investoinnin osalta vähäinen, koska investointi tehdään heti tarkastelujakson alussa yhtenä suurena eränä. Suurempi kysymys on investoinnin hyötyjen jaksottaminen ja diskonttaus siten, että niiden arvo vastaa investointihetkeä. Sepeliraiteen kohdalla käytetään kunnossapidon osalta radan kunnossapitäjän ilmoittamia ajankohtia kunnostustarpeille sekä tämänhetkisiä yksikkökustannustietoja.

7.1.2 Käytetyt laskentamenetelmät

Investoinnin kannattavuutta voidaan arvioida esimerkiksi investoinnin takaisinmaksu-aikamenetelmällä, nettohyötyarvomenetelmällä tai sisäisen korkokannan menetelmällä.

Investoinnin takaisinmaksu-aikamenetelmässä arvioidaan tarvittavan investoinnin suuruus ja sen tietyssä aikayksikössä aikaansaama positiivinen kassavirta, jonka jälkeen investoinnin suuruus jaetaan positiivisella kassavirralla. Esimerkiksi 1000 yksikön investointi, josta seuraa vuosittainen 200 yksikön tuotto, maksaa itsensä takaisin viidessä vuodessa.

Investoinnin takaisinmaksu-aikamenetelmä ei ota huomioon rahan aika-arvoa. Se soveltuu parhaiten sellaisten investointien arviointiin, joiden takaisinmaksu-aika on korkeintaan joitakin aikayksiköjä ja joiden aikaansaama positiivinen kassavirta on etupainoinen. Jo ennen laskelmia voidaan siis olettaa sen soveltuvan kiintoraiteen kaltaisen investoinnin arviointiin varsin huonosti. Investoinnin takaisinmaksu-aikaa käytetäänkin yleensä lähinnä vain yhtenä valintatyökaluna, kun arvioidaan kassavarojen riittävyyttä useiden pienten ja lyhytaikaisten investointien yhteydessä.

Nettonykyarvomenetelmän (Net Present Value, NPV) lähtötietoja ovat alkuinvestointi, mahdolliset myöhemmät lisäinvestoinnit, investoinnilla aikaansaatu positiivinen kassavirta tietyssä aikayksikössä ja laskentakorkokanta. Tässä menetelmässä investoinnin aikaansaama kassavirta eli tulevat tuotot diskontataan tämänhetkiseen rahan arvoon laskentakorkokannan avulla ja lopputulos lisätään negatiiviseen alkuinvestointiin. Investointi on kannattava, jos $NPV > 0$. Nettonykyarvomenetelmä sallii myös ajan myötä muuttuvan positiivisen kassavirran. Englanninkielisessä Excelissä nettonykyarvo voidaan laskea funktiolla NPV.

Nettonykyarvon laskennassa laskentakorkokannan oletetaan pysyvän vakiona koko tarkasteluajanjakson ajan, kun taas kustannustason oletetaan nousevan tietyllä vakio-prosentilla per vuosi. Nettonykyarvoa tarkastellaan useilla eri laskentakorkokannan ja kustannustason nousun yhdistelmillä.

Nettonykyarvomenetelmä ottaa huomioon rahan aika-arvon diskonttauskoron myötä ja sillä voidaan mallintaa investointien ja tulojen/säästöjen kassavirta varsin tarkasti, mutta senkin epätarkkuus lisääntyy ajan myötä diskonttaukseen käytetyn korkokannan muutosten ja tulevaisuuden kassavirtojen epävarmuuden kasvaessa.

Sisäisen korkokannan menetelmä (Internal Rate of Return, IRR) on tavallaan nettonykyarvomenetelmän sovellus. Siinä etsitään korkokanta, jolla investoinnin ja siitä saatavien kassavirtojen nykyarvo on nolla. Jos rahoitusta on saatavana tätä korkoa edullisemmin, investointi on kannattava. Tätä menetelmää ei kuitenkaan tule soveltaa silloin, kun projektit ovat toisensa poissulkevia, vaan ainoastaan arvioimaan yksittäisen projektin kannattavuutta. Kiintoraideinvestointia ei siten ole järkevää arvioida sisäisen korkokannan menetelmällä.

7.2 Materiaali- ja asennuskustannukset

Kustannuslaskennan pohjana käytettiin kohdissa 4.3 ja 4.4 määriteltyjä kahta kiintoraiderakennevaihtoehtoa, joita vertailtiin soveltuviin sepeliraideratkaisuihin. Rakennevaihtoehdot on esitetty taulukossa 11 sekä liitteessä 2.

Taulukko 11. Sepeli- ja kiintoraiderakenteiden esittely.

Ve	Kuvaus
0	Sepeliraide, ratasuunnitelmassa määritelty tunnelipoikkileikkaus.
1a	Kiintoraide, paikalla valettava teräsbetonilaatta ja kalliopintaan perustettu maakostea betoni, nostettu tunnelipohja, syvät kanaalit.
1b	Kiintoraide, paikalla valettava teräsbetonilaatta ja murskekerroksen varaan perustettu maakostea betoni, sama louhintasyvyys kuin sepeliraiteella.
2a	Kiintoraide, ≥ 150 mm murskekerroksen varaan perustettu betonikaukalorakenne, madalletut kanaalit.
2b	Kiintoraide, ≥ 150 mm murskekerroksen varaan perustettu betonikaukalorakenne, syvät kanaalit.

Kiintoraiderakenteita tarkasteltiin sekä kalossilla että System 304 -järjestelmällä varustettuna. Rakenteella 1a saavutetaan säästöjä kalliolouhinnassa ja täyttömurskeen määrässä. Toisaalta rakenne aiheuttaa lisäkustannuksia, koska kanaalit joudutaan tekemään erillisenä työvaiheena. 40 metrin välein tarvittavat alitukset voidaan tehdä vain kalliolaattaan louhittavissa poikittaisissa kanaaleissa.

Rakenteessa 1b saadaan rakenteeseen 1a verrattuna säästöjä kanaalin louhintakustannuksissa, koska Savion kokemusten mukaan alle 400 mm kanaalit voidaan tehdä muun tunneliprofiilin louhinnan yhteydessä. Rakenteella saadaan enemmän kalliolouhetta, mutta toisaalta täyttömateriaalia tarvitaan enemmän. Myös alitukset ovat helpompia toteuttaa kuin rakenteessa 1a.

Rakenteet 2a ja 2b ovat todennäköisesti kalliimpia kuin rakenteet 1a ja 1b. Lisäkustannuksia aiheutuu mm. betonielementin sekä siihen liitettävien runkomelua ja tärinää vaimentavien rakenteiden suunnittelusta ja koekäytöstä sekä tarvittavan elementtitehtaan perustamisesta. Koska kustannuslaskennan yksi tavoite oli etsiä edullisin rakennevaihtoehto, näiden rakenteiden tarkempi tarkastelu on tässä vaiheessa sivuutettu.

Kiintoraiderakenteiden laadullinen kustannusvertailu sepelirataan nähden esitetään taulukossa 12. Rakenteista 1a ja 1b esitetään SAT S 312 ja System 304 -ratkaisut. Oranssi pohjaväri tarkoittaa, että kiintoraiteessa kyseinen rakenneosaa on kalliimpi ja vihreällä merkitty vastaavasti halvempi. Arvioinnissa on käytetty asteikkoa - - ⇔ 0 ⇔ + +, jossa 0 on kustannusneutraali.

Taulukko 12. Sepeliraiteen ja kiintoraiderakenteiden 1a / 1b laadullinen kustannusvertailu.

Rakenneosaa	Sepeliraide	Kiintoraide, rakenne 1a / 1b	
		Kalossi	System 304
<i>Kisko</i>	0	0	0
<i>Pölkkyt</i>	0	++	+
<i>Kiskonkiinnitykset</i>	0	+	+
<i>Tukikerros sepelistä</i>	0	-	-
<i>Eristys- ja välikerros</i>	0	-	-
<i>Sähkökaapelointi</i>	0	+	+
<i>Kuivatus</i>	0	0	0
<i>Palovesijohto</i>	0	0	0
<i>LVISAT</i>	0	0	0
<i>Kanaalien mursketäyttö (pinta-ala)</i>	0	+	+
<i>Hienosepeli</i>	0	0	0
<i>Tunnelipoikkileikkaus ilman kanaaleja</i>	0	-	-
<i>Kanaalien poikkileikkaus</i>	0	+	+
<i>Alituksia varten tehtävä louhinta</i>	0	+	+
<i>Muut järjestelmät</i>	0	0	0

7.2.1 Kustannuslaskennan jakoperusteet, lähtöarvot ja muut oletukset

Kustannuserät on jaettu seuraaviin asiakokonaisuuksiin:

- tunnelipoikkileikkaus
- alusrakenne
- päällysrakenne
- sepeliraiteen (vastaavasti kiintoraiteen) tarvitsemat muut rakenteet ja niiden kustannukset.

Kustannuslaskennan lähtöarvoina käytettiin seuraavia:

- hintataso: MAKU-indeksi 150, aluekerroin 110 (Vantaa)
- yksikköhinnat: RAPALin InInfra.net, asiantuntija-arviot
- lukumäärät: asiantuntija-arviot.

Muina oletuksina käytettiin seuraavia:

- Kuljetusmatka murskeelle, muille kiviaineksille yms. on 5–10 km.
- Betonipölkkyjen, kalossien yms. hinnat olivat Parmalta saadun tarjouksen mukaisia.
- Louhintatöissä kiinteiden kustannusten eli lähinnä louhintakoneiden osuus koko m³ktr-yksikköhinnasta on ainakin 50 %. Tunnelipoikkileikkauksen pienentäminen vähentää siten louhintakustannuksia vain marginaalisesti. Myös injektointi-kustannuksissa on vain vähäisiä eroja.

Kaikissa tutkituissa vaihtoehdoissa on käytetty normaalia ajojohdinta. Voidaan olettaa, että kiintoajojohdinten käyttö vaikuttaa ainoastaan tunnelin yläosan louhintakustannuksiin samansuuruisena kaikissa vaihtoehdoissa, joten tämä tarkastelu voidaan sivuuttaa.

Näillä oletuksilla tehdyillä laskelmilla saatiin sepeli- ja kiintoraiteen vertailukelpoisiksi kustannuksiksi taulukossa 13 esitetyt nauhakustannukset.

Taulukko 13. Sepeli- ja kiintoraiderakenteiden kustannusvertailu, nauhakustannus [€/rd-m].

Kokonaisuus	Ve 0	Ve 1a, System 304	Ve 1b, System 304
Tunnelipoikkileikkaus	3955	3862	3939
Alusrakenne	122	378	439
Päällysrakenne	417	894	894
Yhteensä	4494	4945	5085

Kalossiratkaisu on noin 190 €/rd-m kalliimpi kuin System 304, jolloin Ve 1a:n nauhakustannus olisi 5 134 €/rd-m ja Ve 1b:n 5 272 €/rd-m. Koska kalossiratkaisu on kalliimpi, sen jatkotarkastelu voidaan kustannusmielessä sivuuttaa.

Kiintoraiteen kiinteät kustannukset kuten siirtymärakenteet sekä investoinnit olemassa oleviin pölkky- ja vaihdetuotantolinjoihin tehtäviin muutostöihin on jaettu nauhakustannuksiksi koko kiintoraiteen pituudelle. Näiden kustannusten suuruus on 26–68 €/rd-m riippuen kiintoraiteen pituudesta ja siitä, valitaanko kalossi- vai System 304 -ratkaisu. Tämä kustannus tulee vielä lisätä yllä olevan taulukon kustannuksiin.

Verrattaessa sepeliraidevaihtoehtoa edullisimpaan kiintoraidevaihtoehtoon Ve 1a (raidepituus 6600 m, System 304) kustannuseroksi saadaan **503 €/rd-m**.² Kiintoraiteen raidepituuden ollessa 10900 m kustannusero on **486 €/rd-m** (System 304).

Edullisimman kiintoraiderakenteen ja kapeaan tunnelipoikkileikkaukseen tehtävän sepeliraiteen kokonaiskustannusero tietyillä raidepituuksilla esitetään taulukossa 14. Sepeliraidevaihtoehdon vertailukustannustaso on 0.

Taulukko 14. Edullisimpien sepeli- ja kiintoraiderakenteiden kustannusvertailu, kokonaiskustannusero [M€].

Raidepituus [m]	Ve 0	Ve 1a (System 304) [M€]	Ve 1a (kalossi) [M€]
6600	0	3,3	4,6
10900	0	5,3	7,4

7.3 Kiintoraiteen ja sepeliraiteen kunnossapitokustannusten vertailu

Sepelitukikerroksellisen raiteen kunnossapito tunnelissa käsittää pääsääntöisesti samat toimenpiteet kuin avoraideosuudella. Kiskojen ja kiinnitysosien kunnossapidossa ei ole nähtävissä kustannuseroa. Betonipölkyn kestävyys sepelitukikerroksella on nykytietojen mukaan 40 vuotta. Ulkomailta saadun arvion mukaan betonipölkyn käyttöikä olisi kiintoraiteessa 60 vuotta.

Sepelitukikerroksen kestävyys kalliitunnelissa vaikuttavat seuraavat tekijät:

- Tunnelirakenteessa alusrakenne on lähes stabiili.
- Oikomis- ja tukemiskertoja voidaan vähentää.
- Raiteen sepelitukikerroksen murskaantuminen ja särmien pyöristymisen vähentyminen.

Pitkäaikaisten kokemusten puuttuessa voidaan olettaa, että sepelitukikerrosraiteen tukemista ja oikomista olisi kalliitunnelissakin tehtävä läpituentana noin 6 vuoden välein. Lisäksi raiteen läpituenta tulisi tehdä noin vuoden kuluttua raiteen valmistumisesta varsinkin, jos raidetta ei ole rakentamsvaiheessa stabiloitu. Sepelitukikerroksen uusintaan tai seulontaan tulee varautua noin 40 vuoden käytön jälkeen. Samalla kertaa on hyvä tehdä myös pölkynvaihto, jotta voidaan minimoida liikenteelle aiheutuva haitta.

Kiintoraidevaihteella saavutetaan merkittävä etu sepelirataan asennettuun vaihteeseen nähden, koska vaihteen tukemisen työvaihe jää pois kiintoraiteen pysyvyyden ansioista. Kiintoraidevaihteen kiskojen ja kiinnitysosien kulumisessa ei ole eroa sepelitukikerroksella olevan vaihteen osiin.

² Kustannusero System 304:llä on $(4\,945 - 4\,494 + 53)$ €/rd-m raidepituuden ollessa 6 600 m ja $(4\,945 - 4\,494 + 34,5)$ €/rd-m, kun raidepituus on 10 900 m.

Kiintoraide- ja sepelitukikerrosraiteen siirtymäalueella saattaa kiskoon ja kiinnitysoosiin aiheutua ylimääräisiä vaaka- ja pystyrasituksia, koska raiteeseen muodostuu epä-jatkuvuuskohta.

Seuraava arvio kunnossapidon kustannuksista vuosina 1–39 on tehty vuoden 2008 hintatason mukaan. Sepeliraiteen vuosittainen lisäkustannus esitetään positiivisena, kiintoraiteen negatiivisena. Kunnossapidon kustannukset on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Edullisimpien sepeli- ja kiintoraiderakenteiden kustannusvertailu, kokonaiskustannusero [M€].

Toimenpide	€/rd-km/vuosi
Raiteen oikominen ja tukeminen 6 vuoden välein vuodesta 1 alkaen	1 300
Tukikerroksen puhdistaminen 40 vuoden kuluttua valmistumisesta	4 700
Pölkynvaihto 40 vuoden kuluttua tukikerroksen vaihdon yhteydessä	3 500
Kiintoraiteen pölkynvaihto 60 vuoden käytön jälkeen	-2 500
Sepeliraiteen lisäkustannus yhteensä	7 000

7.4 Elinkaarikustannukset

Pelkästään vertaamalla kiinto- ja sepeliraiteen komponenttien kunnossapitokustannusten suuruutta voidaan todeta, että kiintoraiteen kunnossapitokustannukset ovat lähes vastaavat kuin sepeliraiteella kiskojen, kiskonkiinnitysten ja vaihteiden teräsosien osalta. Kiintoraiteen kunnossapito on sepeliraideetta edullisempaa tukikerroksen tukemisen sekä seulonnan osalta, koska näitä työvaiheita ei tarvita. Tämän vastapainoksi kiintoraiteen kunnossapito on kalliimpaa kuin sepeliraiteella, jos pölkkyjä joudutaan vaihtamaan. Sama koskee betonilaatan vaihtoa, mutta myös betonilaatan mahdollinen paikkaus nostaa kustannuksia.

Elinkaarilaskennassa käytettiin Kehäradan osalta seuraavia oletuksia:

- Sepeliraiteen pölkkyjen ja raidesepelin tekninen käyttöikä on 40 vuotta.
- Kiintoraiteen tekniseksi käyttöiäksi oletettiin 60 vuotta.

Kohdan 7.3 perusteella kiintoraiteen kunnossapito olisi 7 000 €/rd-km/vuosi edullisempaa kuin sepeliraiteella. Kaikissa arvioissa käytetään investointina kiintoraiteen suurempaa asennuskustannusta – 486 000 tai 503 000 €/rd-km riippuen raidepituudesta – ja positiivisena kassavirtana investoinnin aikaansaamaa vuosittaista kunnossapitosäästöä.

Investoinnin takaisinmaksuaika verrattaessa edullisimpia kiinto- ja sepeliraideratkaisuja sepeliraiteen kunnossapitotasolla 2 on 69–72 vuotta. Tämä ei vielä sisällä kohdassa 7.1.1 käsiteltyjä todennäköisiä piilokustannuksia, joiden mukaan ottaminen pidentää takaisinmaksuaikaa.

Kun kiintoraideinvestointia tarkastellaan *nettonykyarvomenetelmän* avulla aikavälillä 0–59 vuotta eli juuri ennen uutta kiintoraideinvestointia, voidaan todeta, että vuotuisen kustannusnousun ollessa 3–6 % kiintoraideinvestointi tulisi rahoittaa koko sen käyttöajan 0,8–1,1 % vuotuista kustannusnousua alhaisemmalla korkokannalla. Jos tämä ehto toteutuisi, kiintoraideinvestointi olisi yhtä kannattava kuin sepeliraide. Koska sijoittajat haluavat riskittömällekin sijoitukselle yleensä vähintään kustannustason nousun suuruisen tuoton, ehdon toteutuminen ei vaikuta todennäköiseltä edes lyhyellä aikavälillä. Lisäksi laskelmaan ei ole otettu mukaan kohdan 7.1.1 todennäköisiä piilokustannuksia.

7.5 Tulosten arviointi ja herkkyysanalyysi

Edellä esitetyn perusteella kiintoraideinvestointi on taloudellisesti varsin vaikeasti perusteltavissa: alkuinvestointi on suuri verrattuna sen aikaansaamaan kassavirtaan, joka lisäksi jakautuu hyvin pitkälle aikavälille. Tällöin investoinnilla aikaansaataviin säästöihin liittyvä epävarmuus on hyvin suuri.

Edellä mallinnettiin kiintoraideinvestointia samana pysyvällä korkokannalla ja kustannustason nousulla, mikä on pitkällä aikavälillä selkeä virhelähde. Menetelmillä saadut tulokset ovat kuitenkin niin selkeitä, ettei korkokannan ja kustannusnousun vaihteluja vuosikymmenten aikana ole syytä tämän tarkemmin arvioida.

Herkkyysanalyysi (engl. what-if analysis, sensitivity analysis) tarkoittaa mallin antamien tulosten epävarmuuden arvioimista esimerkiksi muuttamalla mallin parametrien arvoja ja tarkastelemalla, muuttuvatko mallin antamat tulokset suuresti pienillä lähtöarvojen muutoksilla. Herkkyysanalyysiä sovelletaan etenkin silloin, kun mallien syötteiden ja tulosten välinen suhde on monimutkainen ja vaikeasti ymmärrettävä. Koska kiintoraiteen kustannuslaskenta perustuu yksinkertaisiin yhteen- ja kertolaskuihin, malli ei ole kovinkaan monimutkainen ja suurten kustannusmuutosten todennäköisyys on varsin pieni. Edellä esitetyn perusteella tarkempaa herkkyysanalyysiä esimerkiksi yksittäisten kiintoraidekomponenttien hintamuutoksista ei tässä vaiheessa tarvita.

8 KIINTORAITEEN HANKINTAMENETTELYN VAIHTOEHDOT

Kiintoraide on vaativa erikoisrakenne, jollaista ei ole Suomessa raitioteitä ja joitain paikallisia kokeiluja lukuun ottamatta vielä toteutettu. Käyttökokemusten puutteen takia kiintoraiteen hankintamenettelyn valintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota. Oleellisinta kiintoraiteen hankintamenettelyn onnistumiselle on, että komponenttitoimittajien kokemus, osaaminen ja innovaatiopotentiaali saadaan hankkeen käyttöön mahdollisimman kattavasti.

Seuraavassa esitellään neljä mahdollista kiintoraiteen hankintamenettelyä. Menettelyt eivät ole ainoat mahdolliset ja niitä voidaan myös keskenään yhdistellä.

Tilaaajan hyväksymät tuotteet

Tässä hankintamenettelyssä tilaaja tarjouspyynnössä ilmoittaa, mitkä kiintoraideratkaisut ovat hyväksytyjä. Vastuu hyväksytyjen tuotteiden toimivuudesta jää tilaajalle. Käytännössä muitakaan ratkaisuja ei voitaisi kieltää, mutta niiden vastaavuuden osoittamisvastuu jää urakoitsijalle. Jotta vastaavia tuotteita voitaisiin arvioida, joudutaan kuitenkin laatimaan hyväksytyjen tuotteiden tuotevaatimukset.

Kiintoraideratkaisujen ominaisuudet ovat erilaisia. Jos hyväksytyjä ratkaisuja on useita, on mietittävä, miten muut kuin hintatekijät otetaan huomioon urakoitsijoiden tarjousten vertailussa. Ainakin odotettavissa olevat liikennekatkokset, ylläpitokustannukset ja rakenteen kestoikä tulisi ottaa vertailussa huomioon.

Hankintamenettely voi muodostua hankalaksi, mikäli ei-hyväksytyjen tuotteiden valmistajat ryhtyvät valittamaan hankinnasta. Samoin myös urakoitsijat, jotka haluavat tarjota vaihtoehtoista tuotetta, jota ei hyväksytä, saattavat valittaa.

Hankinta kannattaisi tässä tapauksessa aloittaa tietopyynnöllä (RFI - Request For Information). Tällöin saataisiin viralliset osallistumishakemukset kaikilta halukkailta komponenttivalmistajilta, eivätkä yritykset voisi siten myöhemmin väittää heitä sivuutetun.

Tilaaajan suunnitelma

Tässä hankintamenettelyssä tilaaja suunnitteluttaa oman kiintoraideratkaisunsa, jota urakoitsijat tarjoavat. Vaihtoehtoiset ratkaisut voidaan joko sallia tai olla sallimatta. Todennäköisesti urakoitsijat eivät kuitenkaan lähde kehittämään omia vaihtoehtoisia ratkaisujaan, koska tarjolla on ratkaisu, jonka toimivuudesta vastaa tilaaja.

Urakoitsijan kannalta hankintamenettely on helppo ja houkutteleva. Tarjouksen teko ei vaadi merkittäviä taloudellisia ja henkisiä ponnistuksia. Urakoitsijan kannalta menettely on myös vastuiden suhteen selkeä, koska tilaaja vastaa perusratkaisun toimivuudesta. Mikäli suunnittelussa kehitetään uudentyyppinen kiintoraideratkaisu, ovat nk. perusratkaisuvirheet mahdollisia. Tilaaja vastaa näistä. Urakoitsijat saattavat jopa kieltäytyä antamasta takuuta ratkaisulle, jota ei ole koeteltu aiemmin.

Komponenttitoimittajien osaaminen ja innovaatiopotentiaali on ratkaisuja laadittaessa käytettävissä, mutta rajoitetusti. Oleellista olisi tässä mallissa laatia sellainen suunnitelma, että mahdollisimman monen komponenttivalmistajan tuotteita voitaisiin

käyttää. Mallissa saatettaisiin jopa päätyä siihen, että tehdään vaihtoehtoiset suunnitelmat eri komponenttivalmistajien tuotteille.

Myös tilaajan suunnitelman tapauksessa kannattaisi hankinta aloittaa tietopyynnöllä. Tällöin saataisiin kaikkien halukkaiden komponenttivalmistajien osaaminen mukaan hankinnan valmisteluun, eivätkä yritykset voisi sitten myöhemmin väittää heitä sivuutetun.

Urakoitsijan suunnitelma

Urakoitsijan suunnitelmaan perustuvassa menettelyssä tarjouspyynnössä esitetään tuotevaatimukset, jotka urakoitsijoiden kiintoraideratkaisujen tulee täyttää. Kestäviin ratkaisuihin voidaan tilaajan toimesta kannustaa normaalia pidemmällä takuuajalla.

Tuotevaatimuksissa kuvataan kiintoraiteen tekniset vaatimukset. Vastuu tuotevaatimukset täyttävän perusratkaisun löytämisestä ja valinnasta on urakoitsijalla.

Menettely on urakoitsijan kannalta tarjousvaiheessa työläs ja kallis. Vaatii urakoitsijalta sekä taloudellista että henkistä panostusta tarjouksen tekemiseen. Toisaalta urakoitsijan motivaatio löytää toimiva kiintoraideratkaisu on vastuun kautta korkea. Komponentti-toimittajien osaaminen ja innovaatiopotentiali on sataprosenttisesti urakoitsijoiden käytettävissä.

Urakoitsijan suunnitelma on tilaajan kannalta turvallinen vaihtoehto, koska vastuiden rajapintoja ei ole. Vastuu on urakoitsijalla.

Palvelusopimusmalli

Palvelusopimusmallin ajatus on, että tilaajan omistamaan Kehäradan tunneliin ostetaan pitkäaikaisella sopimuksella tasaista, runkomelutonta ja katkoksetonta ratakapasiteettia tuotevaatimusten avulla. Rahoitus on mahdollista järjestää palvelumaksuperiaatteella, jolloin urakoitsijalle maksetaan rata osamaksulla radan käyttöön ja sopimuskauden aikana.

Tilaaaja esittää tarjouspyynnössä tuotevaatimukset. Tuotevaatimuksissa otetaan enemmän kantaa raiteen toimivuuteen ja sen kuvaamiseen kuin teknisiin vaatimuksiin. Vastuu perusratkaisun valinnasta ja toimivuudesta on tässäkin menetelmässä urakoitsijalla. Palvelumaksuperiaate saattaa aiheuttaa sen, että ratkaisu on kokonaisuudessaan tilaajalle kalliimpi kuin se, että investointi maksettaisiin kokonaan heti. Palvelumaksu voisi tämän takia olla etupainoinen huomioiden siten investointikustannuksen.

Palvelusopimusmalli motivoi kaikkein parhaiten urakoitsijaa löytämään toimintavarman ratkaisun, mikäli liikennekatkoksista aiheutuu sille tuntevia taloudellisia menetyksiä. Juuri tämä lienee syy siihen, miksi Keski-Euroopassa on siirrytty kiintoraideratkaisuihin. Myös pitkä sopimusaika motivoi löytämään kestäviä ratkaisuja. Raide olisi urakoitsijan omaisuutta sopimuskauden päättymiseen saakka, jolloin se siirtyy tilaajalle tuotevaatimusten mukaisessa kunnossa.

Urakkarajat

Hankintamenettelyn valinnassa tulevat ratkaistavaksi myös urakkarajat: mikä osa kiintoraiteen rakentamisesta kuuluu kalliorakennusurakkaan, mikä osa sisustusvaiheen rakennusurakkaan, vai onko kiintoraiteen rakentaminen kokonaan oma erillisurakkansa sisustusvaiheessa.

Mikäli kiintoraiteen perustaminen tehdään puhdistetun kalliopinnan ja maakostean betonin varaan, kannattaa kalliopinnan puhdistus ja maakostean betonin asennus sisällyttää kalliorakennusurakkaan. Tällöin kalliorakennusurakoitsijan intressi on louhia tunnelin pohja mahdollisimman tarkasti ylimääräisten täyttöjen minimoimiseksi. Maakostean betonin pinnasta seuraavan urakoitsijan on selkeä aloittaa kiintoraiteen rakentaminen.

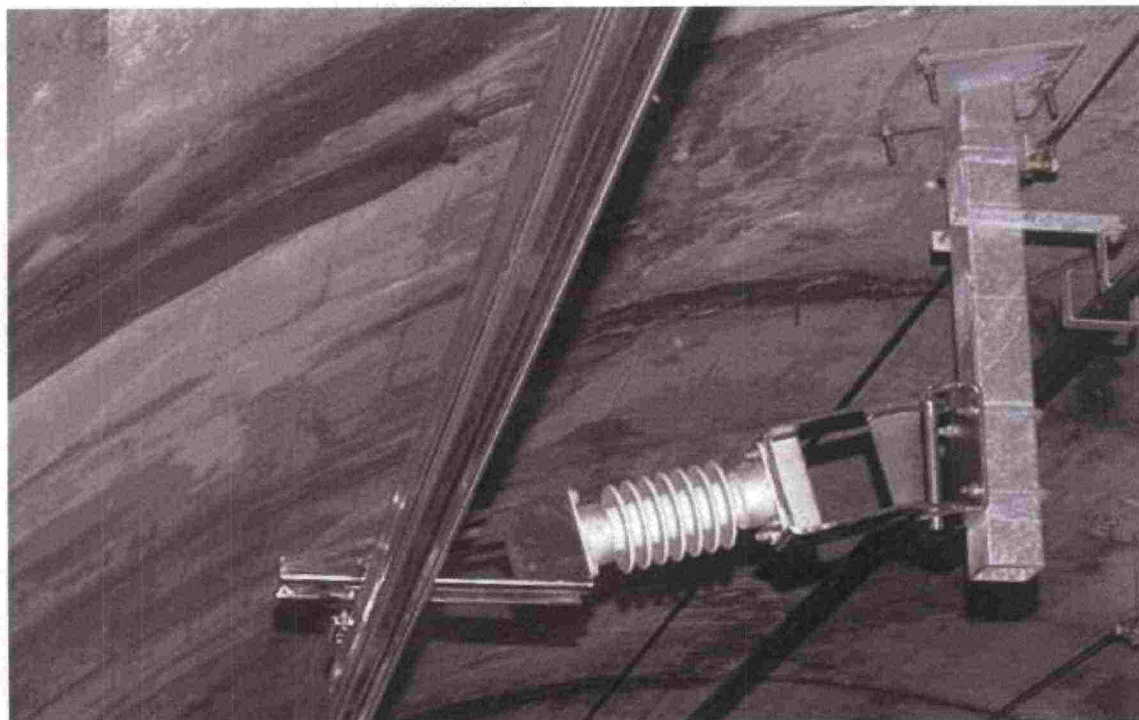
Mikäli kiintoraide perustetaan tiivistettyjen maakerrosten varaan, kannattaa kalliopinnan puhdistus ja tiivistetyn täytön teko määrättyyn korkoon saakka sisällyttää kalliorakennusurakkaan. Lopullisen asennus- tai valualustan teon ja tasauksen tulee kuulua samaan urakkaan kuin itse kiintoraiteen rakentaminen.

Kiintoraiteen rakentaminen voi olla oma erillisurakkansa tai se voi sisältyä sisustusvaiheen rakennusurakkaan. Kiintoraiteen rakentamisen yhteensovittaminen muiden tunnelin sisustusvaiheen rakennustöiden kanssa voi olla hankalaa, joten tätä taustaa vasten se voisi kuulua rakennusurakkaan. Kiintoraiteen onnistunut toteutus edellyttää joka tapauksessa niiden rakentamiseen erikoistuneiden aliurakoitsijoiden käyttöä asennustöissä.

9 MUUT SELVITETYT RAKENTEET

9.1 Kiintoajojohto

Kiintoraideselvityksen yhteydessä selvitettiin kiintoajojohdon käyttömahdollisuuksia Kehäradan tunneliosuudella. Ratahallintokeskus on aikaisemmin selvittänyt kiintoajojohdon ominaisuuksia ja mahdollisuuksia mm. rautatietunneleissa Kiintoajojohdinselvityksessä 14.6.2007. Kiintoajojohdossa ajojohtimen lanka on kiinnitetty alumiiniprofiiliin ja kannattimet asennetaan tunnelikattoon 8–12 metrin välein. Kuva tunneliin asennetusta kiintoajojohtojärjestelmästä on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Tunneliin asennettu kiintoajojohdin /34/.

Perinteisesti käytettyyn ajojohtojärjestelmään verrattuna kiintoajojohdolla saavutetaan mm. seuraavia etuja: /34/

- pienempi tilantarve ajojohtimen yläpuolisten kannatinrakenteiden osalta
- pienempi tilantarve ajojohtimen pienemmän korkeusvaihtelun ansioista (tukiväli, jäykkyys)
- parempi kestävyys onnettomuustilanteissa (pysyy pidempään jännitteisenä palotilanteessa)
- parempi käyttövarmuus ja turvallisuus
- tunneliin ei tarvita erillisiä tilavaroituksia perinteisen ajojohtimen painoille.

Kehäradan tunnelissa, jossa suurin nopeus on 120 km/h, kannatinten väli tulee selvityksen perusteella olla 10 metriä. /34/. Kiintoraiteen suhteen kiintoajojohdolla saavutettava säästö on sama kuin sepeliraiteelle.

Kiintoajojohdinselvityksessä on esitetty kiintoajojohdon aiheuttamaksi kustannuslisäykseksi noin 40 000–60 000 € verrattuna perinteiseen ajojohtimeen. Hinta vaihtelee

kuitenkin valmistaja- ja tuotekohtaisesti. Hintaero muodostuu pääasiassa materiaali-kustannuksista mutta myös asennus on kalliimpaa. Kunnossapidon kannalta kiinto-ajojohdissa voidaan sallia suurempi ajolangan kuluma (max 50 %, perinteisellä ajojohdilla 20–30 %), koska ajojohdin ei ole vetorasituksen alainen. Ajolanka on myös helposti vaihdettavissa tarkoitukseen suunnitellulla laitteistolla. Kokonaisuutena kunnossapitotarve ajojohdinten osalta vähenee. /34/

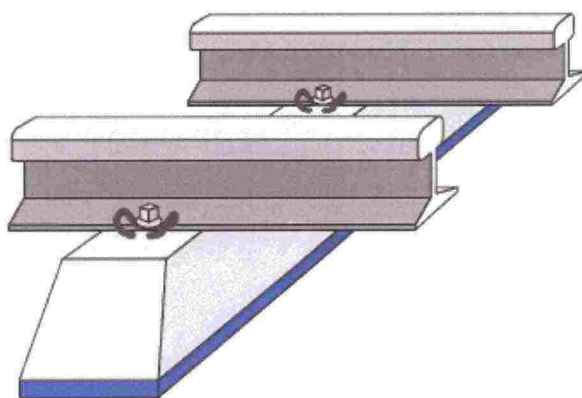
Kiintoajojohdon selkeä etu on sillä saavutettava tunneliturvallisuuden paraneminen erityisesti palotilanteissa. Ferrer+Frey'n tekemien tutkimusten mukaan perinteinen ajojohdin, joka on jatkuvan vedon alainen, on katkennut 3–7 minuutin sisällä palotilanteessa. Kiintoajojohdissa ei todettu vaurioita vielä 25 minuutin palon jälkeen. Tämä mahdollistaa ongelmatilanteissa turvallisuustoiminnan, jossa juna voi todennäköisemmin ajaa ulos tunnelista tai tunneliasemalle, josta poistuminen onnistuu helpommin. /34/

Selvityksessä tehdyn tarkastelun mukaan tunnelin kattoa voidaan laskea tunnelin suorilla osuuksilla 300 mm kiintoajojohdon ansiosta. Lisäksi kiintoajojohdo mahdollistaa omalta osaltaan tunnelikaton laskemisen tunneliasemilla. Poikkileikkauspinta-alan pienenemisellä saavutetaan säästöjä louhintamäärissä, mutta ei merkittävästi kalliolujituksissa eikä injektioinneissa. Alenemisella saavutettava kustannussäästö on noin 90 €/rd-m, mikä kattaa kiintoajojohdimesta aiheutuvan lisäinvestoinnin.

Tunnelin katon laskemisen suhteen on huomioitava, että tunnelikaton laskeminen lisää paineenvaihtelua rautatietunnelissa. Paineenvaihtelun tasaamiseksi hyväksyttävälle tasolle saatetaan tarvita lisäinvestointeja esim. pystykuiluihin tehtävien paineentasaukuilujen osalta. Paineentasauksen arviointi on kuitenkin monipuolinen prosessi, minkä takia tarkempi tarkastelu on tehtävä rakentamissuunnittelun aikana.

9.2 Pohjain

Pohjain, englanniksi "Under Sleeper Pad" tai lyhyemmin "USP", on pölkyn alapintaan asennettava joustoelementti, jonka avulla voidaan parantaa sepelitukikerroksellisen päällysrakenteen pysyvyyttä sekä runkomelun eristystä. Sitä voidaan käyttää vaihtoehtoisena ratkaisuna kiintoraiteelle tai sillä voidaan parantaa yksittäisen kohteen, kuten vaihteen, pysyvyyttä. Pohjain asennetaan pölkyn alapintaan pölkyn valmistusvaiheessa, minkä ansiosta ratkaisu ei aiheuta muutoksia radan rakennusprosessiin tai kunnossapitotoimenpiteisiin. Kuvassa 33 on esitetty sinisellä elementin sijoittuminen rakenteessa.



Kuva 33. Pölkyn alle asennettavan pohjaimen sijoittuminen raiteessa (sinisellä).
/35/

Pohjaimilla on useita eri valmistajia. Keskeinen toimittaja on Getzner, jonka materiaalivalikoimaan kuuluvat mm. Sylodyn- tai Symoler-tuotteet. Näitä tuotteita on käytetty sekä sepelitukikerroksellisen radan että eri kiintoraideratkaisujen tärinä- ja runkomelun eristeinä. Pohjain onkin näistä jatkokehitetty tuote. Pohjaimen valmistusvaiheessa elementtiin tehdään tartunnat, joilla se kiinnittyy tehokkaasti pölkkyyn valun yhteydessä.

Pohjain parantaa sepelitukikerroksen pysyvyyttä erityisesti vähentämällä raideseppelin kulumista. Normaalisissa sepeliraiteissa pölkyn alapinnan kosketuspinta-ala suhteessa raideseppelin teräväreunaisiin kivrakeisiin on 5–9 prosenttia. Pohjaimella kosketuspinta-alaa voidaan kasvattaa noin 35 prosenttiin. Kuormituksen jakautuminen laajemmalle pinta-alalle vähentää pölkyn ja sepelitukikerroksen jauhautumista kontaktipinnassa ja parantaa raiteen pysyvyyttä. Koko pölkyn alapintaan asennettaessa pohjain lisää rakenteen joustavuutta ja parantaa radan tärinän ja runkomelun eristystä. Koska pölkky tukeutuu kuitenkin edelleen sivultaan suoraan sepelitukikerrokseen, saattaa runkomelun eristys jäädä pieneksi.

Kehäradan osalta pohjain soveltuu asennettavaksi erityisesti tunneliosuudelle asennettaviin vaihteisiin. Lisäksi koemittausten avulla voidaan selvittää mahdollisuudet käyttää pohjainta runkomelun eristyksen keinoina alueilla, joilla eristystarve jää alle 10 dB:n, kuten Aviapoliksen ja Lentoaseman alueilla. Elementin pitkäaikaiskestävyydestä kontaktissa sepelitukikerrokseen ei ole vielä laajasti kokemuksia, mutta pohjaimen asentamisesta ei aiheudu ylimääräistä riskiä rakenteen toiminnallisuuden kannalta. Parma Oy:n hinta-arvio ratkaisun lisäkustannuksista on 40–50 €/pölkky. Hinta riippuu paljon valittavasta toimittajasta sekä joustoelementiksi valittavasta tuotteesta.

10 YHTEENVETO, PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

10.1 Yleistä kiintoraiteesta

Kiintoraide on rakenneratkaisu, jossa perinteinen sepelitukikerroksellinen raide korvataan yleensä betoni- tai asfalttilaattaan tuetulla raiteella. Maailmalla käytetyt kiintoraiderakenteet jakautuvat perinteisiin betoniratapölkkyihin perustuviin, esivalmistetuista elementeistä valmistettuihin sekä kokonaan paikalla valettuna tehtäviin rakenteisiin ja perustuvat usein maa- ja kohdekohtaisiin lähtökohtiin. Pääosassa ratkaisuihin on betonipölkkyissä tyypillisesti käytetty pistemäinen kiskonkiinnitys-järjestelmä, jonka jousto-ominaisuuksia sekä korkeuden säätövaraa on tarpeen vaatiessa muutettu. Rautatieliikenteeseen liittyen kiintoraiderakenteita on ollut käytössä 1960-luvulta alkaen. Pitkäaikaisin kokemus on Japanista (Shinkansen) sekä Sveitsistä ja Ranskasta (Stedef). Useissa Euroopan maissa kiintoraide asennetaan lähtökohtaisesti yli 500 metriä pitkiin tunneleihin ja suurnopeusradoille. Lisäksi raitioteiden yhteydessä, mm. Helsingissä, rakenteessa käytetään yleisesti kiintoraideratkaisua.

Kiintoraiteella saavutettavia keskeisiä hyötyjä ovat

- vähäisempi kunnossapitotarve pysyvän ratageometrian ansioista
- pidempi elinikä
- suurempi käytössä oleva liikenteellinen kapasiteetti
- mahdollisuudet tunnelipoikkileikkauksen tai sillan rakennepaksuuden pienentämiseen
- pysyvyys, tasalaatuisuus ja vakioidumpi kuormitustila.

Toisaalta kiintoraiteen kannalta on huomioitava seuraavat keskeiset asiat

- suuremmat investointikustannukset verrattuna sepeliraiteeseen
- vioittumistilanteessa rakenteen korjaus on hitaampaa ja korjauskustannukset ovat suuremmat
- ratageometrian muutokset edellyttävät raskaita toimenpiteitä ja pitkiä liikennekatkoja
- rakentamisen asennustoleransseihin, työmenetelmiin ja laadunvalvontaan on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta päästään kestävään lopputulokseen
- avorataosuuksilla tiukat vaatimukset alusrakenteessa sallittaville painumille
- riittävä runkomelun vaimennus varmistettava.

Kiintoraiteen vaihtoehtona on tavanomainen sepeliraide, jonka pysyvyyttä voidaan tarvittaessa parantaa pohjainten käytöllä. Yksiselitteistä suositusta kiinto- ja sepeliraiteen välillä ei ole mahdollista tehdä, vaan soveltuva rakenne määräytyy hankekohtaisten tekijöiden ja elinkaarikustannustarkastelun avulla.

10.2 Kiintoraiderakenteen määrittäminen

10.2.1 Lähtökohdat

Kiintoraiderakenteen määrittelyn lähtökohdat muodostuvat Kehäradan suunnitellun rautatietunnelin ominaisuuksista ja alueen olosuhteista. Rakenteellisiksi lähtökohdiksi asetettiin Suomessa käytössä olevan betoniratapölkyn käyttö sekä jousto-ominaisuuksia varten ranskalaisen Sateban SAT S 312 -järjestelmä ja itävaltalaisen Vosslohin System 304 -kiinnitys-järjestelmä.

Kiintoraiteen suunnittelussa keskeinen tekijä on rakenteen käyttöikä, joka voidaan asettaa esim. laatuvaatimusten muodossa koko rakenteelle tai rakenneosittain. Rakenteellisen mitoituksen lähtökohtana on, että käyttöiän aikana kiskoon sekä kiinnitys- ja tukirakenteisiin ei muodostu pysyviä kuormista, muuttuvien ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta tai junaliikenteestä määriteltyä suurempia pysyviä tai hetkellisiä muodonmuutoksia. Alustavassa mitoituksessa voidaan yhdistää Eurokoodi ja nykyiset RHK:n suunnitteluohjeet junakuormien määrittelyä ja yhdistelyä varten. Betonirakenteiden mitoitus voidaan tehdä rakentamismääräyskokoelman osan B4 sekä soveltuvien osin RHK:n ja Tiehallinnon ohjeiden mukaisesti. Suunnittelun aikana määritettiin suunnitteluperusteet kiintoraiteen rakenteellista mitoitusta varten.

10.2.2 Rakenteiden määrittely

Kiintoraiteen rakenne jaettiin toiminnallisuuden mukaan raide-elementtiin, raiteen paikalleen sitovaan pintalaattaan sekä kantavaan pohjalaattaan, jolle raide-elementti voidaan tukea geometrian säätöä varten asennusvaiheessa. Kiintoraiteen rakenteelle määritettiin selvityksessä kaksi vaihtoehtoa.

- Rakenteessa 1 komponentit ovat raide, teräsbetoni-laatta (ns. pintalaatta) ja maakosteasta betonista tehtävä pohjalaatta. Rakenne voidaan perustaa suoraan puhdistettuun kalliopohjaan tai tiivistetylle eristys- ja välikerrokselle. Rakenteen etuina ovat parempi soveltuvuus suomalaisille rakennusmenetelmille sekä alhaisempi rakennepaksuus perustettaessa suoraan kalliopohjaan.
- Rakenteessa 2 komponentit ovat raide, pintalaatta teräskuitubetonista sekä esivalmistetuista elementeistä tai liukuvaluna valmistettava teräsbetonikaukalo. Rakenne perustetaan tiivistetylle eristys- ja välikerrokselle. Kerroksen yläpinnassa voidaan käyttää asennushiekkaa.

Rakenteessa 2 rakennekerrosten kokonaispaksuus on suurempi ensimmäiseen vaihtoehtoon verrattuna, mutta kun rakenne toteutetaan liukuvaluna tai esivalmistetuista elementeistä, tehostuu myös kiintoraiteen rakennusprosessi. Liukuvalu on erityisesti Saksassa yleinen tapa betonikaukalon tai pohjalaatan valmistamiseen.

10.2.3 Rakenteen sovittaminen tunnelipoikkileikkaukseen

Selvityksessä tarkasteltiin myös tunnelipoikkileikkauksen pienentämismahdollisuuksia. Ratasuunnitelman mukaisen sepeliradan tunnelipoikkileikkaus on teknisten järjestelmien sallimassa minimissä, minkä seurauksena kiintoraiteen käytöllä ei saavuteta mahdollisuutta kaventaa poikkileikkausta. Kiintoraideratkaisujen rakennepaksuus vaihtelee 480–630 mm välillä, minkä ansiosta kalliopohjaa voidaan nostaa sepelirataan verrattuna. Maksimissaan tunnelipoikkileikkausta voidaan pienentää noin 4 m². Kiintoajojohtimen avulla tunnelipoikkileikkausta voidaan lisäksi pienentää noin 2 m².

10.2.4 Kiintoraiteen erityisrakenteet

Kiintoraiteen erityisrakenteita ovat vaihteet sekä siirtymärakenteet kiinto- ja sepeliraiteen välillä. Selvityksessä kiintoraidevaihteelle YV60-300-1:9 laadittiin linjakaavio SAT S 312 -järjestelmään perustuvalla kalossirakenteella. Vaihteen teräsosat ovat samat kuin sepeliraiteen vastaavassa vaihteessa ja pölkyt voidaan valmistaa nykyisellä tuotantolinjalla vain pienin muutoksin nykyisiin valumuotteihin. Lisäksi kalossiratkaisussa pölky ja joustoelementti ovat vaihdettavissa. Kiintoraidevaihteella merkittävä etu suhteessa sepeliradan vaihteeseen saavutetaan, kun vaihteen tukemisen työvaihetta ei tarvita.

Siirtymärakenteiden avulla tasataan sepeli- ja kiintoraiteen välistä painumaeroa, minkä hallinta on tärkeää sekä radalla liikkuvaan kalustoon, että radan komponentteihin kohdistuvien voimien kannalta. Kiintoraiteelle on ominaista, että runkomelun vaimennuksen edellyttämä joustoelementti aiheuttaa kiskossa suuremman painuman verrattuna sepeliraiteeseen. Painumaeroa voidaan tasata sepelitukikerroksen alueella tärinäeristemattojen avulla. Lisäksi siirtymärakenteessa sepelikiviaineksen viskoosia painumaa ja muodonmuutosta voidaan rajoittaa lujiteverkkojen avulla. Selvityksessä on määritetty alustavat siirtymärakenteet SAT S 312 ja System 304 -järjestelmiin perustuville kiintoraideratkaisuille.

10.2.5 Runkomelun tarkastelut

Raideliikenteen runkomelu aiheutuu ratarakenteiden ja maaperän välityksellä rakennuksiin kytkeytyvästä värähtelystä. Runkomeluhaitat rajoittuvat yleensä alueille, joissa rata ja läheiset rakennukset ovat kallioperustaisia, tai radan ja rakennusten välinen etäisyys on hyvin pieni. Kehäradan tunneliosuuden alueella on pääasiassa toimistorakennuksia, joille runkomelun enimmäistaso L_{ASmax} on 40 dB. Tunnelin itäpäässä Ruskeasannan asuinalueella enimmäistaso on 30 dB. Kiintoraiteessa runkomelun vaimennuksen toteutusta rajoittaa kiskon sallittu painuma, joka kasvaa suhteessa saavutettuun eristykseen.

SAT S 312 -järjestelmällä riittävä runkomelun eristys on saavutettavissa alle 3 mm painumalla 10 dB eristykseen asti. Ruskeasannan asuinalueella vaadittuun 14 dB eristykseen käytettävällä materiaalilla painuma kasvaa mutta jää alle 4 mm. System 304 -kiinnitysjärjestelmällä runkomelun eristys on heikompi SAT S 312 -järjestelmään verrattuna, koska joustoelementin yläpuolella värähtelevä massa jää pienemmäksi. System 304 -järjestelmällä voidaan todennäköisesti saavuttaa riittävä eristys 40 dB enimmäistason alueella, jolloin myös kiskon painuma jää alle 2 mm. Sepeliradan 10 dB eristykseen System 304 -kiinnityksen dynaamisella joustolla ei kuitenkaan päästä.

10.3 Kiintoraiteen rakentaminen, kunnossapito ja hankintamenettelyt

Kiintoraiteen asennus- ja kunnossapitomenetelmät ovat yleisesti sidoksissa tuotejärjestelmän toiminnallisiin ominaisuuksiin. Betonipölkyyn perustuvassa rakenteessa rakentaminen on tarkoituksenmukaista tehdä ylhäältä alaspäin siten, että raide asemoidaan tilapäisten tukirakenteiden avulla kiintoraiteen pohjalaatan päälle ja raide sidotaan paikalleen pintavalun avulla. Vaihtoehtoisesti rakentaminen voidaan toteuttaa myös alhaalta ylöspäin, jolloin lopullinen raidegeometria säädetään kiinnitysjärjestelmään liittyvien asennuslevyjen avulla. Kiintoraiteen etujen

saavuttamiseksi työn tarkkuus ja laatuvaatimukset on asetettava tiukoiksi ja työn valvonta on toteutettava huolellisesti.

Kiintoraiteen kunnossapito käsittää tukikerrokselliseen rataaan verrattuna vain muutamia yksittäisiä toimenpiteitä. Päätehtävä tulee olemaan kiskon ja kiinnitysten kunnan tarkkailussa. Raidetta tukeva betoninen peruslaatta voidaan olettaa pääosin huolto-vapaaksi, jolloin vältytään sepeliraiteen edellyttämiltä linjatukemiselta (noin kuuden vuoden välein) sekä sepelin puhdistamiselta (noin 40 vuoden välein). SAT S 312 -järjestelmässä etuna on betonipölkyn vaihdettavuus kalossin ansioista. System 304 -järjestelmään perustuvan rakenteen osalta on myös laatan halkeilua seurattava.

Kiintoraide on vaativa erikoisrakenne, jollaisia ei ole Suomessa vielä toteutettu ioissa ratahankkeissa, minkä takia myös kiintoraiteen hankintamenettelyyn tulee kiinnittää erityistä huomiota. Vaihtoehdossa vastuu kokonaisratkaisusta vaihtelee tilaajan ja urakoitsijan välillä. Perusratkaisuja ovat 1) tilaajan hyväksymät tuotteet, jossa määritellään hyväksytyt kiintoraideratkaisut, 2) tilaajan suunnitelman tai 3) urakoitsijan suunnitelmien mukaisen rakenteen toteuttaminen sekä 4) palvelusopimusmalli, jossa tilaaja ostaisi urakoitsijalta ratakapasiteettia. Tunneli- ja kiintoraide urakoiden urakkaraja on tarkoituksenmukaista asettaa tunnelipohjalle tehtävän tasauserroksen yläpintaan.

10.4 Kiintoraiteen kustannustarkastelu

Kiintoraiteen kustannuslaskennan pohjaksi otettiin kaksi rakennevaihtoehtoa, joita tarkasteltiin sekä SAT S 312 että System 304 -järjestelmiin perustuvat ratkaisut. Kustannuslaskennan hintatasona käytettiin MAKU-indeksitasoa 150 aluekertoimella 110. Komponenttien yksikköhinnat olivat RAPALin InInfra.netin sekä asiantuntija-arvioiden mukaisia niiden lukumäärien perustuessa asiantuntija-arvioihin.

Verrattaessa edullisinta sepeliraidevaihtoehtoa edullisimpaan kiintoraidevaihtoehtoon tulokseksi saatiin, että kiintoraiteen investointikustannus on sen pituudesta riippuen 486 000–503 000 €/rd-km suurempi kuin sepeliraiteella. Kustannuseron osatekijät ovat tunnelipoikkileikkaus, jossa kiintoraide oli 93 000 €/rd-km edullisempi sekä alus- ja päällysrakenteet, joissa kiintoraide oli 256 000 € tai 477 000 €/rd-km kalliimpi kuin sepeliraide riippuen valittavasta järjestelmästä. Kiintoraiteen kunnossapidon todettiin olevan 7 000 €/rd-km/vuosi edullisempaa kuin sepeliraiteella, minkä perusteella investoinnin takaisinmaksuajaksi muodostuu 69–72 vuotta.

Kustannuslaskennan painopiste oli olemassa olevissa komponenteissa ja työmenetelmissä, joiden materiaali- ja suoritemäärät sekä yksikkökustannukset voitiin arvioida melko luotettavasti. Tämän lisäksi kiintoraiteeseen liittyy joukko piilo-kustannuksia, joille voidaan joissakin tapauksissa laskea arvo. Näiden huomioon-ottaminen nostaa kiintoraiteen vertailuhintaa entisestään.

Edellä esitetyn perusteella kiintoraideinvestointi on taloudellisesti varsin vaikeasti perusteltavissa: alkuinvestointi on suuri verrattuna sen aikaansaamaan kassavirtaan, joka lisäksi jakautuu hyvin pitkälle aikavälille. Tällöin investoinnilla aikaansaataviin säästöihin liittyvä epävarmuus on hyvin suuri.

10.5 Suositukset

Kiintoraide on osoittautunut maailmalla kilpailukykyiseksi ratkaisuksi erityisesti tunneleiden ja siltojen osalta. Esimerkiksi TBM-menetelmällä tehdyissä tunneleissa sekä rataosuuksilla, joilla liikenteellinen kapasiteetti on oltava mahdollisimman suurilta osin käytettävissä, kiintoraiteella saavutettavat edut usein perustelevat hankinnan. Kiintoraide voi myös tietyissä tapauksissa olla perusteltavissa tunneleissa, joilla runkomelun vaimennustarve on jatkuvasti sepeliraiteella saavutettavaa vaimennusta suurempi. Vertailu kiinto- ja sepeliraiteen välillä onkin riippuvainen useista hankekohtaisista tekijöistä.

Selvityksen tulosten perusteella Kehäradan tunneliosuudelle suositeltava rakennevaihtoehto on perinteinen sepelitukikerroksellinen rata, koska kiintoraiteella ei saavuteta elinkaarikustannuksien osalta tai muiden ominaisuuksien ansiosta riittäviä etuja suhteessa alkuvaiheen suurempaan investointikustannukseen. Keskeinen tekijä on tunnelipoikkileikkaus, jonka suhteen kiintoraiteella voidaan saavuttaa säästöjä vain tunnelipoikkileikkauksen pohjan nostosta.

Tutkituista kiintoraidejärjestelmistä SAT S 312 -järjestelmään perustuvan kiintoraiteen selkeitä etuja ovat parempi runkomelun eristys sekä pölkyn vaihtomahdollisuus, mitkä puoltavat järjestelmän käyttöä. System 304 -kiinnitysjärjestelmään perustuva ratkaisu on halvempi toteuttaa, mutta pölkyn ankkurointi peruslaattaan on ongelmallinen eikä ratkaisulla voida todennäköisesti saavuttaa 30 dB runkomelualueilla vaadittavaa eristystä. Maailmalla on käytössä myös lukuisia muita kiintoraideratkaisuja, jotka ovat soveltuvia Kehäradan tyyppiselle rataosuudelle ja joista on käytön aikaista kokemusta. Kiintoraideratkaisun käyttö kannattaa selvittää uusilla rataosuuksilla, joilla ratakapasiteetin käyttöaste on alusta pitäen suuri tai joiden varrella on laajoja 30 dB enimmäistason runkomelualueita.

Selvityksen yhteydessä tutkittiin lyhyesti myös kiintoajojohton sekä pohjaimien käyttömahdollisuudet Kehäradan tunneliosuudella. Kiintoajojohto kannattaa asentaa Kehäradan tunneliosuudelle, koska sen avulla voidaan merkittävästi parantaa tunneliturvallisuuutta järjestelmän paremman palonkestävyyden ansiosta. Lisäksi kiintoajojohdolla saavutettavat säästöt tunnelilouhinnoissa kattavat sen suuremmat materiaali- ja asennuskustannukset. Pohjaimet kannattaa asentaa Kehäradan rautatie-tunneliin asennettavien vaihteiden pölkkyihin, koska niiden avulla voidaan vähentää vaihteiden kunnossapitotarvetta. Pohjaimien osalta suositellaan tutkittavaksi myös pohjaimen käyttömahdollisuudet runkomelun vaimennuselementtinä Aviapoliksen ja Lentoaseman toimistoalueilla.

LÄHDELUETTELO

1. Esveld, Coenraad. Modern Railway Track, 2nd Edition. Hollanti 2001.
2. Lichtberger, Bernhard. Track Compendium, 1st Edition, Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH&Co KG. Saksa 2005.
3. Bastin, Roger. 2006. Development of German non-ballasted track forms. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport 159, February 2006 Issue TR1, p. 25–39.
4. Schilder, R. Diederich, D. 2007. Installation Quality of Slab Track – A Decisive Factor for Maintenance. RTR Special 2007.
5. Väylät ja liikenne I & II, RIL, Helsinki 2005
6. Esveld, Coenraad. 1999. SLAB TRACK: A Competitive Solution. Delft University of Technology.
7. Sagar, S.C. Verma, Y. 2007. CASE STUDIES – HIGH SPEED RAIL SYSTEM (> 250 KMPH).
8. 1st international forum - new technologies and building techniques in the railway industry -seminaarijulkaisu. Euskal Trenbide Sarea/MBN Comunicación. BI-3720-07. Bilbao
9. Penny, Charles. 2006. A State of the Art Embedded Rail System. BalfourBeatty Rail Technologies.
10. Freudenstein, Stephan. 2006. RHEDA 2000 - The ballastless track system for high-speed train traffic by RailOne. RTR Special 2006.
11. Maas, G. Rickes, T.M. Winter, T. 2006. PRODUCTIVITY IN RAIL CONSTRUCTION - LESSONS LEARNED FROM THE DEVELOPMENT OF THE RHEDA 2000 TRACK CONSTRUCTION SYSTEM. ISARC2006.
12. Mathur, R. Negi, S.K. 2005. SENIOR PROFESSIONAL COURSE P. WAY-PROJECT ON INNOVATIVE TRACK SYSTEMS UNDER DEVELOPMENT ON FOREIGN RAILWAYS. INDIAN RAILWAY INSTITUTE OF CIVIL ENGINEERING, PUNE
13. Züblin-yleisesite 2006.
14. Bögl-yleisesite 2004.
15. Takai, Hideyuki. 2007. 40 Years Experiences of the Slab Track on Japanese High Speed Lines. Railway Technical Research Institute, Japan.
16. Sateba SAT S 312-järjestelmän kalvosarja saatu 17.3.2008 (Parma Oy)

17. edilon)(sedra rail systems. EDILON Corcelast Embedded Block System. Kalvosarja, esitelty 2008-03-27.
18. Edilon tuote-esittely, muistio 27.3.2007
19. EDILON Corcelast Embedded Block System PLUS LR 54E1-MS -esite. edilon)(sedra. 13.2.2008.
20. EDILON Corcelast Embedded Block System Installation 27.11.2007
21. EDILON EBS For Switches (Citytunneln Malmö) 18.12.2007
22. Edilon Embedded Rail System HR 60E1-MS. System information sheet. Esite, saatu 2008-03-27.
23. edilon)(sedra rail systems. Edilon Embedded Rail System (ERS). Kalvosarja, esitelty 2008-03-27.
24. Sateba SAT S 312 -järjestelmään perustuva pölkkypiirustus, Parma Oy 9.4.2008
25. Sateba SAT S 312 -järjestelmään perustuva vaihdepölkkypiirustus, Parma Oy 9.4.2008
26. Parma Oy:n kustannusarvio SAT SAT S 312 -järjestelmän asennushinnoista 28.3.2008
27. Vossloh esittely, muistio 2.4.2008
28. Vossloh System 304 tuote-esite 22.11.2007
29. Parma Oy:n kustannusarvio System 304 -järjestelmän asennushinnoista 18.4.2008
30. Raportti Akukon 073061-04 Kehäradan ratasuunnittelu, raideliikenteen runkomelua ja värinäselvitys. Runkomelualueiden selvitys. Insinööritoimisto Akukon Oy, 15.2.2008.
31. Runkomelualueiden kartat Akukon 073061-RV03 ja -RV04. Kehäradan ratasuunnittelu, runkomeluselvitys. Tunnelin runkomelualueet. Insinööritoimisto Akukon Oy, 15.2.2008.
32. Getzner Werkstoffe GmbH, <http://www.getzner.com> kuva ladattu osoitteesta: <http://www.railway-technology.com/contractors/noise/getzner/getzner1.html>
33. Jyrkkiö, E. Riistama, V. 2003. Laskentatoimi päätöksenteon apuna. WSOY.
34. Kiintoajohdinselvitys RHK 14.6.2007
35. Getzner esite (USP): Elastic Solutions for Track Superstructure

TUTUSTUMISMATKAT KIINTORAIDEKOHOEISIIN

1	Yleistä	2
2	Pariisi–Strasbourg välin kiintoraiteen koekohde	2
2.1	Taustaa	2
2.2	Rakenne	3
2.3	Päätelmät	6
3	Sveitsin kiintoraideratkaisut ja Lötschbergin tunneli	6
3.1	Taustaa	6
3.2	Lötschbergin tunnelijärjestelmä	7
3.3	Kiintoraiteen rakentamismenetelmä	8
4	Malmön Citytunneln -hanke	9
4.1	Matkan tarkoitus ja tavoitteet	9
4.2	Citytunneln-hankkeen esittely	10
4.3	Rakentamiskustannukset ja rakennusurakoiden jako	12
4.4	Suunnittelun lähtökohdat ja valitut kiintoraideratkaisut	12
4.5	Kiintoraideratkaisujen kilpailutus ja tarjouksiin liitetyt tiedot	13
5	Kööpenhaminan metro	16
5.1	Yleisesittely	16
5.2	Metrotunneli ja kiintoraide	17
5.3	Yhteenveto Kööpenhaminan metrosta	19
6	Frankfurt–Köln-suurnopeusrata	20
6.1	Matkan tarkoitus ja tavoitteet	20
6.2	Hankekokonaisuus, sen perustelut ja vaikutukset junaliikenteeseen	20
6.3	Kiintoraide Saksassa ja sen tilaus sekä kilpailutus	21
6.4	Radan rakentamisen ja infratöiden muita haasteita	25
6.5	Kunnossapito, elinkaarikustannukset	25
6.6	Yhteenveto Saksan matkasta	26

1 Yleistä

Kehäradan kiintoraideselvityksen lähtökohdaksi asetettiin kaksi olemassa olevaa kiintoraiderakennetta, joista on olemassa rakentamisen ja käytön aikaisia kokemuksia. Kiintoraideselvityksen yhteydessä tehtiin kirjallisuusselvityksen ohella tutustumismatkoja toteutettuihin tai toteutusvaiheessa oleviin kohteisiin Ranskassa, Sveitsissä, Saksassa, Tanskassa ja Ruotsissa. Näin kartoitettiin Euroopassa saatuja kokemuksia ja lähtökohtia kiintoraiteen soveltamiseen rataverkolla. Pääpainona oli löytää kiintoraiteen osalta vastauksia mm. seuraaviin kysymyksiin:

- Milloin ja minkä vuoksi on päädytty kiintoraideratkaisuihin
- Mitkä ovat käytetyt kiintoraiteen mitoitusperiaatteet
- Kiintoraiteen siirtymärakenteet ja niiden toteutus
- Vaihteisiin liittyvät erityiskysymykset
- Kiintoraideratkaisujen runkomelun torjunta
- Kiintoraiteen asennusmenetelmät
- Kokemuksia kiintoraiteen kunnossapidosta
- Kiintoraiteen kustannukset

Koekohteiden osalta selvitettiin seuraavat rakenteet:

- Sateban Stedef-malliin perustuva SAT S 312 -järjestelmä (Ranska)
- Sonneville LVT (Sveitsi/Lötschberg sekä Tanska/Kööpenhamina)
- Rheda-rakenteet Frankfurt–Köln-radalla (Saksa)
- Edilon, Pandrol Vanguard ja Sonneville LVT-HA (Ruotsi/Malmö)

Seuraavassa esitellään tiivistettynä keskeiset vierailukohteet sekä niistä tehdyt havainnot ja päätelmät.

2 Pariisi–Strasbourg välin kiintoraiteen koekohde

2.1 Taustaa

Ensimmäinen tutustumiskohde oli kiintoraideselvityksessä tutkittavaksi asetetulla rakenteella toteutettu kiintoraiteen koekohde Pariisi–Strasbourg-suurnopeusradalla. Kohteessa kiintoraide on asennettu noin kolmen kilometrin pituiselle kaksiraiteiselle osuudelle. Lisäksi kohteeseen on asennettu myös kaksi 1:46 kiintoraidevaihdetta, joilla erkanevan suunnan suurin sallittu nopeus on 170 km/h. Suurin sallittu nopeus oli matkan aikana 220 km/h. Kohdetta olivat esittelemässä Olivier Lombarey SNCF:stä sekä Charles Petit Satebasta. Lisäksi koekohteeseen tutustumisen jälkeen pidettiin keskustelutilaisuus SNCF:n Marcel Fumeyn kanssa.

Ranskassa rataverkon omistaa Réseau Ferré de France (RFF), joka on Ratahallinto-keskusta vastaava viranomainen. SNCF eli ”Société Nationale des Chemins de fer Français” on radan liikennöintiin, rakentamiseen ja kunnossapitoon erikoistunut yritys, jolla on keskeinen markkina-asema Ranskassa. Sateba on osa Consolis Groupia, joka on kansainvälinen betonituotteita valmistava yhtiö.

2.2 Rakenne

Koekohteella käytetty kiintoraiderakenne oli kehitetty SNCF:n ja Sateban yhteistyönä. Pölkkytyyppinä on käytetty Ranskassa yleisesti käytettyä ”twin-block” -pölkkyä, jossa pölkyn päätyosat on keskiosasta yhdistetty pelkästään terästangon avulla. Elastisuus rakenteessa on toteutettu jäykästä muovista valmistetulla kalossilla, jonka pohjalle on asennettu tärinä- ja runkomelunvaimennuselementti. Vastaavaa rakennetta on käytetty myös esimerkiksi Englannin ja Ranskan välisessä kanaalitunnelissa sekä Pariisin RER-verkolla. Koekohteen rakenne on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Kiintoraiteen rakenne ja komponentit.

Koekohteessa kiintoraiderakenteen osat olivat kiskosta alaspäin:

- kiinnitysjärjestelmä Pandrol fastclip aluslaatalla, joka sallii jonkin verran korkeussäätöä
- Twin-block-pölkky ja Getznerin toimittama joustoelementti, jotka on asennettu jäykkään muoviseen kalssiin
- täyttövalu kuitubetonista, jonka paksuus kalossin pohjalta 70 mm
- raudoittamaton betonikaukalo, kokonaiskorkeus max 400 mm
- maakosteabetoni, joka on avoimilta alueilta päällystetty ohuella asfalttikerroksella.

Betonilaatta oli siirtymärakennetta lukuun ottamatta pinnoitettu vesitiiviiden parantamiseksi, joka näkyy kuvissa keltaisen sävyisenä pintana. Siirtymärakenteessa oli havaittavissa, että betonikaukalossa oli liikuntasaumot noin viiden metrin välein. Raiteen kallistukset kaarteisilla osuuksilla on toteutettu pääosin maakosteaan betonikerrokseen tehtävän valun avulla.

Koekohteelle asennetuissa 1:46 vaihteissa (kuva 2) rakenne perustui myös perinteisiin vaihteen komponentteihin. Pölkkyinä käytettiin normaaliin betonivaihdepölkkyyn perustuvaa ratkaisua, jossa rauditus on sama mutta pölkyn alapintaa on muotoiltu

kalossin asentamista varten. Ratkaisun etuna on, että vaihteiden teräsosat ovat tässä tapauksessa samanlaiset, kuin sepelirataan asennettavissa vaihteissa.



Kuva 2. Kiintoraideosuudelle asennettu 1:46 vaihde.

Kiintoraiteeseen oli säännöllisin välein asennettu mittausantureita, joilla seurattiin kiskon liikettä (painumaa) kuormituksen alla. Rakenteen painumat vaihtelivat seurannan mukaan 0,9–1,4 mm välillä. Kuvassa 3 on esitetty mittausantureiden sijoitus raiteessa.

Rakenteen asennus on tehty ns. top-down-menetelmällä, jolloin maakosteabetonikerros sekä betonikaukalo on rakennettu ensimmäiseksi. Tämän jälkeen kaukalon päälle on rakennettu raide, joka on asennettu oikeaan geometriseen asemaan. Geometrian säätöjen jälkeen raide on valettu paikalleen kuitubetonisen täyttövalun avulla. Rakentamisen suoritteista ja menetelmistä ei saatu tarkempaa tietoa paikan päällä.



Kuva 3. Koekohde on varustettu laitteistolla, jolla seurataan rakenteen painumia eri olosuhteissa. Vasemmassa alakulmassa on veden poistoreikä ilmeisesti täyttövalun alueelle.

Koekohteen siirtymärakenne (kuva 4) oli suunniteltu kiintoraiteen ja sepeliraiteen välisten painumaerojen avulla. Lähtökohtaisesti näissä esiintyvä ero on tasattava riittävän pitkällä matkalla, jotta muutos ei aiheuta junan kulkuun liiallisia kiihtyvyyksiä/nykäyksiä. Koekohteen siirtymärakenteessa sepelikerroksen alle on asennettu kaksi joustavuudeltaan eritasoista värinäeristemattoa, joilla sepeliraiteen joustavuutta lisätään siirryttäessä kiintoraiteelle. Käytännön kokemus on osoittanut, että siirtymärakenteen osalta rakennetta on vielä kehitettävä.



Kuva 4. Siirtymärakenne kiintoraiteelta sepeliradalle.

2.3 Päätelmät

Ranskan koekohteella käytetty rakenne on yksi kiintoraideselvityksen lähtökohdaksi asetettu rakenne, minkä seurauksena rakenteen toiminnallisuuden selvittäminen oli hyvin tärkeää. Koekohteen alueella tehtiin havaintoja kuitubetonivalun halkeilusta sekä siihen tehdyistä paikkauksista. Myös kalossin vesitiivyydessä huomattiin puutteita. Rakenne on kuitenkin jo ollut käytössä.

Haastattelussa tuli esiin, että rakenteessa käytetty twin-block-pölkyn valinta perustui tuotantoteknisiin seikkoihin. Pölkyn pituus voisi olla myös lyhyempi verrattuna normaalia sepelitukikerroksessa käytettävään pölkkyyn. Kunnossapidon kannalta todettiin, että rakenteessa on ollut ongelmia pölkyn vaihdon suhteen, koska pölkky on ollut liian tiukasti kiinni kalossissa.

3 Sveitsin kiintoraideratkaisut ja Lötschbergin tunneli

3.1 Taustaa

Sveitsissä kiintoraiteeseen liittyvä tutustumiskohde oli joulukuussa 2007 liikenteelle avattu Lötschbergin tunneli. Tutustumiskohteen lisäksi matkalla haastateltiin mm. SBB:n, Rhomberg AG:n sekä Pöyry Infra AG:n edustajia.

Sveitsissä on usean vuosikymmenen kokemus kiintoraiteesta. Ensimmäinen Stedefin malliin perustuva kiintoraiderakenne asennettiin 1960-luvulla. Nykyisin käytettävä kiintoraiteen rakennemalli on LVT eli ”Low Vibration Track”, jossa rakenteeseen asennetaan erilliset pölkkyt kullekin kiskolle (ei yhdistävää välisosaa). Kiintoraiteesta saatujen kokemusten perusteella SBB on tehnyt selkeitä määrittäviä erityyppisillä radoilla käytettäviä rakenteita varten:

1. Avoradalla käytetään lähtökohtaisesti sepelitukikerroksellista rataa, koska se on helpommin muokattavissa vaihteiden jne. suhteen.
2. Tunneleissa, joiden pituus on yli 500 metriä, käytetään lähtökohtaisesti kiintoraiderataa, koska alhaisemman kunnossapitotarpeen ansioista saavutetaan radalle parempi käyttöaste.

Sveitsiläisten kokemusten mukaan kiintoraide maksaa rakenteena enemmän kuin sepelitukikerroksellinen rata (investointikustannukset +10 %) mutta koska sillä voidaan saavuttaa säästöjä muissa infratöissä kuten louhinnassa sekä radan kunnossapidossa, rakenne tulee usein edullisemmaksi. Tämä tulee kuitenkin tutkia tapauskohtaisesti. Tarkasteluissa kiintoraiteen laskennallisena elinikänä on käytetty 60 vuotta.

Kiintoraiderakenteiden osalta Sveitsissä on kertynyt kokemusta myös kiintoraiteen vikaantumisista sekä niiden edellyttämistä korjaustoimenpiteistä mm. seuraavasti:

- Stedef-järjestelmään perustuva 1960-luvulla Basel-Zürich välille rakennettu kiintoraide vikaantui kiskoilta suistumisen takia 90-luvulla. Rakenne uusittiin vaihtamalla rataa uudet pölkkyt, muut elementit pidettiin paikallaan.

- Vuonna 1974 Heitersbergin tunnelissa on jouduttu tekemään kunnossapitoa, jossa vaihdettiin 50 vikaantunutta pölkkyä sekä kaikkien pölkkyjen aluslevyt (kiskon ja pölkyn välissä).
- Zürichin lentoasemalle asennetussa Stedefin järjestelmään perustuvassa pölkkyrakenteessa on todettu vikaantumisia kalossirakenteen osalta. Vian on todettu johtuvan rataan jarrutuksesta ja kiihdytyksestä kohdistuvista pituussuuntaisista voimista.
- Siirtymärakenteiden alueella on lisäksi jouduttu vaihtamaan Skl 14 -järjestelmän kiskonkiinnityksiä.

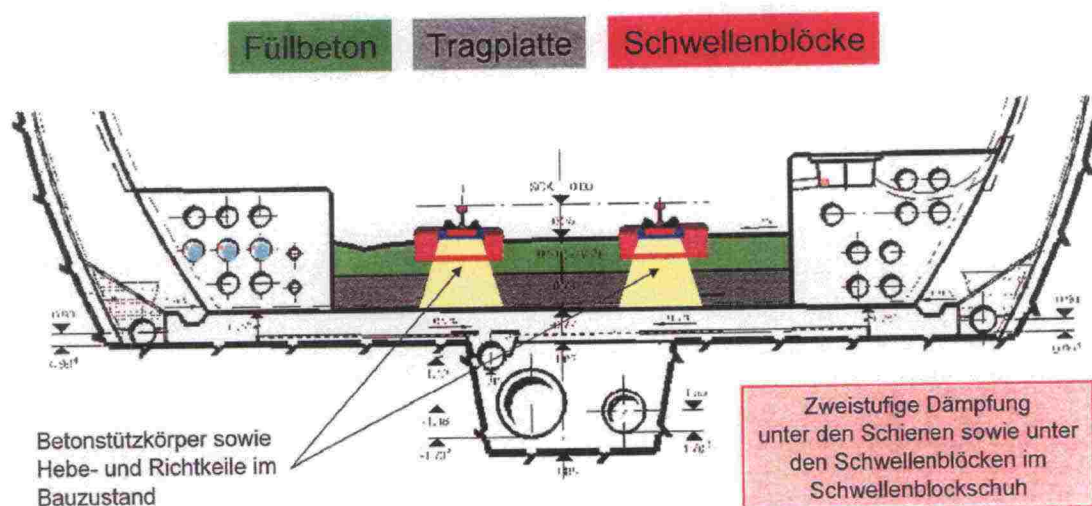
3.2 Lötschbergin tunnelijärjestelmä

Tunneli on avattu liikenteelle v. 2007. Tällä hetkellä tunnelin läpi kulkee maksimissaan 109 junaa vuorokaudessa ja jo avaamisesta alkaen tunneliyhteyttä on käytetty lähes täydellä kapasiteetilla. Tunneliyhteys on lisännyt matkustajamääriä linjalla keskimäärin 30 prosentilla ja ruuhka-aikoina jopa 50 prosentilla.

Lötschbergin tunnelijärjestelmä koostuu mm:

- eteläpäässä kahdesta yksiraiteisista tunneleista, joiden välinen etäisyys on 40 metriä
- pohjoispäässä yksiraiteisesta tunnelista ja ajoneuvojen kulkuun sekä pelastukseen tarkoitetusta huoltotunnelista
- yhdystunneleista, joiden väli on enintään 333 metriä.
- savunpoistojärjestelmästä
- ajotunneleista.

Lötschbergin tunnelipoikkileikkauksen alaosa on esitetty kuvassa 5. Tunnelissa käytetty kiintoraiderakenne on Sonneville LVT, josta Sveitsissä on jo paljon kokemusta asentamisen, kunnossapidon ja käytön kannalta.



Kuva 5. Lötschbergin tunnelin alapohjan poikkileikkaus

Lötschbergin tunnelin kuivatusjärjestelmissä on eroteltu kalliopohjavesi sekä tunneliin mahdollisesti johtuva vesi (junista tms). Kalliosta tuleva pohjavesi kerätään poikkileikkauksen sivuilla olevilla salaojilla ja poistetaan läheiseen vesistöön. Tunnelin sisältä kertyvä vesi kerätään erilliseen kuivatusjärjestelmään, joka voidaan tarpeen vaatiessa kerätä talteen (esimerkiksi öljyvuodon sattuessa). Kuvassa 6 on esitetty rakenteen tunnelipoikkileikkaus koerakentamisosuudella.



Kuva 6. Tunnelipoikkileikkauksen komponentit olivat esillä koerakentamisosuudella.

3.3 Kiintoraiteen rakentamismenetelmä

Kiintoraiteen rakentamisesta Lötschbergin tunneliin vastasi Rhomberg AG, jolla on pitkä kokemus erityyppisten kiintoraideratkaisujen rakentamisesta eri puolella Eurooppaa.

Lötschbergin tunnelissa raide on tuettu paikalleen kiskosta, siten, että tuet ovat kahden pölkkyvälin etäisyydellä toisistaan. Raideväli varmistetaan kiskojen varteen tuettavalla tukiraudalla. Tukijärjestelmä sallii liikkumisen raiteen päällä täyden akselipainon kiskokalustolla. Tukijärjestelmä on esitetty kuvassa 7.

Raiteen korkeusaseman sekä kiskonkallistusten säätöä varten tuissa on säätöruuvit, joita voidaan säätää yksinkertaisesti jakoavaimilla. Tiedot raidegeometrian säätöihin saadaan kiskoilla kulkevan mittauslaitteiston avulla. Mittaustarkkuus varmistetaan koko tunnelin läpiviedyllä mittauspisteverkolla, joita on 35 metrin välein. Mittaustarkkuudessa on 3 mm koko 35 km matkalla. Mittausjärjestelmä on yksi tärkeimpiä edellytyksiä oikean raiteen aseman ja geometrian saavuttamisen kannalta.



Kuva 7. Rhombergin käyttämä raiteen tukemismenetelmä sekä raidevälin varmistamiseen käytettävä tukirauta.

Kohteessa on rakennusvaiheessa käytetty väliaikaisia kiskoja. Tietyillä ehdoilla rakentaminen voidaan toteuttaa käyttämällä lopullisia kiskoja asennusvaiheessa. Rakennusvaiheessa on otettava huomioon myös kiskon mahdollinen lämpöliike sekä tunnelin kosteusolosuhteet. Rhomberg AG käyttää rakenteessa omaa erikoisbetoniaan. Sen suunnittelussa on huomioitu betonin saavuttama rakenteellinen lujuus, asennuksen aikainen juoksevuus/asennettavuus sekä betonin kutistumiskäyttäytyminen.

Lötschbergin tunnelin kiintoraideurakoitsijan valinnassa tarjoajien oli todistettava, että heidän on mahdollista päästä haluttuihin tuloksiin. Tilaajan tehtävä on määrittää asennustarkkuudet ja toleranssit sekä rakenteen halutut laatuvaatimukset. Todettiin myös, että Rhomberg on mukana tarjouskilpailussa Malmön Citytunnelniin suunnitellun kiintoraiteen toteutuksessa.

Esi-asennetut 50 metriset raide-elementit toimitettiin asennuskohteeseen Donnelin kaltaisella laitteella, jonka minimitoimitaleveys on karkeasti arvioiden seitsemän metriä (tarkastettava vielä). Loppuvalu tehdään raiteen päältä erityislaitteistolla, Lötschbergin tunnelissa pinta tasattiin vielä käsivoimin. Keskimääräinen työsaavutus kaikki työvaiheet huomioon ottaen on noin 100 m/vuorokausi (ilmeisesti, kun tehdään kolmivuorotyötä). Kustannustehokkaan asennuksen olennainen vaatimus on, että tunnelin suuaukolla on riittävän suuri työmaa-alue, jossa voidaan hoitaa logistiikkaan liittyvät järjestelyt.

4 Malmön Citytunneln -hanke

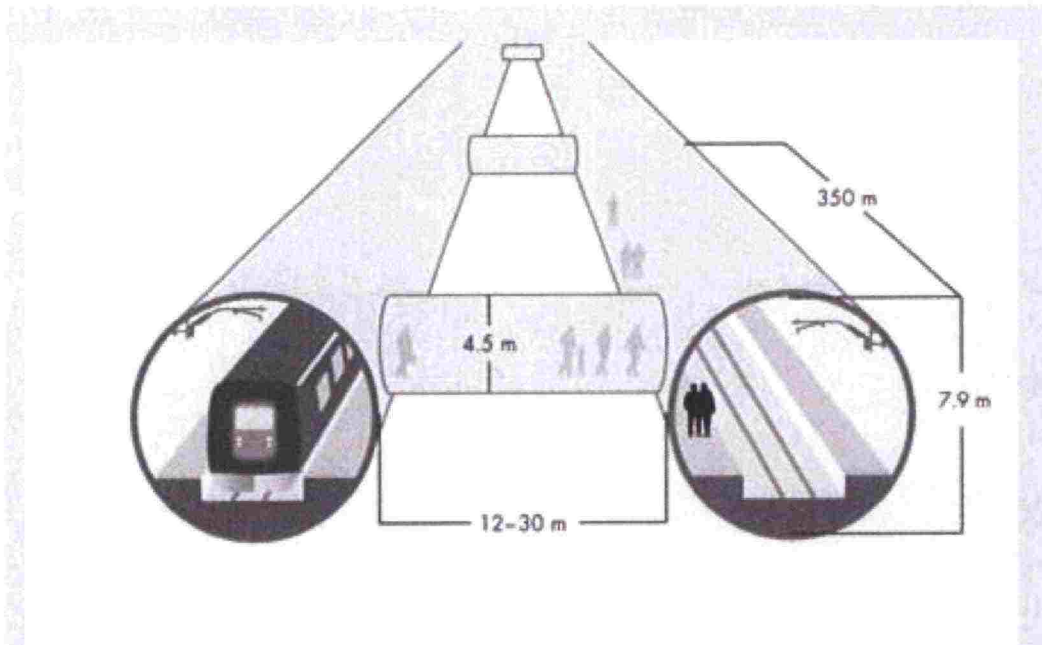
4.1 Matkan tarkoitus ja tavoitteet

Malmön matkan tavoitteena oli selvittää Citytunneln-hankkeen tarjouskilpailuun valittujen kiintoraideratkaisujen perustiedot sekä niiden valinta- ja vertailuperusteet. Matkalla pyrittiin myös selvittämään malmöläisten näkemys elinkaarikustannuksista ja niiden laskentaperusteista. Matkan aikana keskusteltiin Citytunneln-hankkeen toimis-

tolla kiintoraiteen kehittämisestä vastaavan projektipäällikkö Sven-Åke Petterssonin kanssa sekä käytiin Citytunnelnin työmaalla.

4.2 Citytunneln-hankkeen esittely

Citytunneln-hankkeen keskeinen osa on uusi henkilöliikenteen ratayhteys, joka alittaa Malmön keskustan TBM-menetelmällä toteutettavassa tunnelissa. Rautatietunneli koostuu alla olevan kuvan mukaisesti kahdesta 6 km pituisesta ratatunnelista sekä 320–350 metrin välein toteutettavista yhdystunneleista, joita tarvitaan teknisten järjestelmien kuten virransyötön takia. Turvallisuusjärjestelyt esim. palon aikana on toteutettu siten, että matkustajat siirtyvät viereiseen paloeristettyyn ratatunneliin yhdystunnelin kautta, kuten Kehäradallakin on suunniteltu. Banverketin käyttämä yhdystunnelien standardietäisyys on 500 metriä. Hyökkäystienä käytetään joko asemia tai erillisiä kuiluja. Pelastusjärjestelyjä on esitetty kuvassa 8.



The bored tunnel comprises two parallel tunnel tubes with an internal diameter of 7.9 metres. A total of 13 cross tunnels are built between the two tunnel tubes. The distance between the cross tunnels is approximately 350 metres.

Kuva 8. Ratatunnelin ja yhdystunnelien keskeiset mitat.

Kummastakin tunnelista noin 4,5 km tehdään poraamalla ja loput kaivantoon tehtävänä betonitunnelina. Hankkeeseen liittyy myös muita ratatöitä Malmössä kuten uusia siltoja, vaihteita ja raideyhteyksiä.

Citytunneln parantaa Malmön nykyisiä ratayhteyksiä erityisesti Kööpenhaminan suunnasta. Ratayhteys laajentaa nykyistä päärautatieasemaa neljällä raiteella ja lisäksi rataosuudelle rakennetaan kaksi uutta henkilöliikenteen asemaa. Nämä parantavat keskustan joukkoliikenteen palvelutasoa sekä mahdollistavat uuden maankäytön

alueella. Uudet asemat ovat Hyllien uuden lähiön pinta-asema ja Malmön kaupallista keskusta sekä läheistä sairaala-aluetta palveleva Triangeln-tunneliasema. Jatkossa pääosin tavaraliikenteen käyttöön jäävä nykyinen rataosuus sijaitsee Citytunnelnin itäpuolella. Ratalinjaus on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Malmön Citytunneln-hanke ja siihen liittyvät ratatyöt.

Hankkeen yhteydessä nykyinen Malmö Central-asema (jatkossa Malmö C) muutetaan läpiajettavaksi rakentamalla uusi maanalainen osa, jolloin aseman raidekapasiteetti kasvaa junien kääntämistarpeen vähentyessä merkittävästi. Malmö C:n kautta kulkee henkilöliikenteessä sekä alueellista lähiliikennettä, kaukoliikennettä että Tanskaan suuntautuvaa liikennettä. Nykyisellä avoradalla liikennöidään nyt päivässä 270 junaa, joista 200 on henkilöjunia. Raideliikenteen kasvu mm. Öresundin sillan myötä on

yllättänyt kaikki: esimerkiksi Triangeln-asema tarvitsisi neljä raidetta kahden sijaan ja laituripituuden tulisi olla pitempi kuin 8 vuotta sitten suunniteltu.

Hankkeen ansiosta nykyisin käytössä olevan, tiheästi asuttujen alueiden läpi avorotana kulkevan rataosuuden käyttöaste vähenee, mikä vähentää rautatien aiheuttamia melu- ja värinähaittoja. Noin 70 päivittäistä dieseltavarajunaa jäävät kuitenkin vanhalle radalle mm. paloturvallisuussyistä.

Junien suurimmat nopeudet (Sn) Citytunneln-radalla ovat seuraavat: tunnelin eteläisellä suuaukolla Sn on 160 km/h. Tunnelissa Sn on Triangelniin asti 120 km/h, Triangelnin ja Malmö C:n välillä 100 km/h ja Malmö C:llä 80 km/h. Junien ajonopeudet ovat yleensä näitä alhaisempia, mutta suuret Sn:t antavat mahdollisuuden aikataulun kiinniajoon.

4.3 Rakentamiskustannukset ja rakennusurakoiden jako

Rakentamiskustannuksiin oli suunnittelun alkuvaiheessa budjetoitu 9,45 miljardia kruunua eli noin miljardi euroa, mutta epävirallinen kustannusarvio on nyt 15–20 miljardia kruunua. Tunneli- ja radanrakentamisurakat olivat toisistaan erillisiä. Tunnelirakentamisesta tehtiin kaksi urakkasopimusta: tunnelirakentaminen Malmö C:lle ja tunneliasemien rakentaminen. Tunneli- ja radanrakentamisen rajapinnaksi on määritetty -500 mm kiskon selästä. Ensimmäinen radanrakentamisurakka tunnelin ulkopuolella on pysynyt budjetissa, mutta tunneliin asennettavan kiintoraiteen osalta urakan hinta näyttää nousevan hieman yli budjetin.

Muista Citytunnelniin liittyvistä urakoista esimerkiksi opastinjärjestelmän rakentaminen on erillinen urakkansa, jonka Banverket rakennuttaa ja Bombardier rakentaa ERTMS-kelpoiseksi.

4.4 Suunnittelun lähtökohdat ja valitut kiintoraideratkaisut

Suunnittelun lähtökohdaksi oli otettu Pohjoismaissa yleisesti sovellettu asuinrakennusten maksimirunkomelutaso 30 dB. Malmössä käynnistä jäi vaikutelma, että runkomelun vaimennusvaatimus ohjasi suunnittelua hyvin vahvasti ja muut tekijät kuten elinkaarikustannukset olivat toissijaisia.

Työn aikana Citytunneln on tutkinut useita eri kiintoraide- ja runkomelunvaimennusratkaisuja kuten massajousijärjestelmät, upotetut pölkkyjärjestelmät ja embedded rail -järjestelmät. Järjestelmille on tehty vertailulaskelmia Citytunnelnin toimesta. Kiintoraideratkaisun etsimisen aikana on käyty pitkiä keskusteluja kiintoraidetoimittajien kanssa ja haettu Malmöön soveltuvia ratkaisuja. Selvitysten perusteella todettiin, että Malmössä ei haluttu päätyä massajousi-järjestelmään sen merkittävästi kalliimman hinnan takia. Lisäksi massajousi-järjestelmässä joustoelementin vaihto (kiintoraiteen tärkein kriteeri) on vaikeaa.

Lopulta Malmön tarjouskilpailuun valittiin Pandrol Vanguard, Sonneville HA-LVT (High Attenuation-Low Vibration Track) sekä Edilon Embedded Block System (EBS) ”low stiffness”. Sonneville HA-LVT on jatkokehitetty Sveitsissä käytetystä LVT-järjestelmästä Malmön vaatimuksia varten, joten tätä järjestelmää ei sellaisenaan ole asennettu mihinkään muualle. Kiintoraideratkaisut on optimoitu 19 tonnin akselipainolle.

Citytunnelnin rakentaminen on kestänyt kauan mm. hitaan YVA-prosessin vuoksi. Rakennusten, maaperän ja muiden runkomeluvaimennukseen vaikuttavien tekijöiden mallinnus aloitettiin v. 1999, mutta vasta v. 2004 ympäristöoikeus teki lopullisen päätöksen, jonka mukaan Citytunnel sai viiden vuoden aikana tekemiensä laskelmien perusteella luvan olla käyttämättä massajousijärjestelmiä. Kiintoraideratkaisujen tarjoajat ja urakoitsijat olivat olleet mukana prosessissa alusta eli vuodesta 1999 alkaen. Järjestelmän vaatimukset ja asentamis- ja kunnossapitotarjoukset voitiin määrittää kuitenkin vasta ympäristöoikeuden päätöksen jälkeen. Runkomelun vaimennukselle on asetettu samat vaatimukset koko tunnelissa, koska sen yläpuolisten alueiden tulevaa maankäyttöä ei tiedetä.

Elokuussa 2007 solmittiin radanrakennussopimus, jolloin tarjouskilpailuun valitut kolme kiintoraideratkaisua olivat jäljellä. Vaikka eri ratkaisujen hyödyt vaikuttavat erilaisilta, järjestelmät ovat suunnilleen samanlaisia Malmössä tärkeän runkomelun – vaimennuksen osalta. Näin ollen kustannukset todennäköisesti ratkaisevat valinnan.

4.5 Kiintoraideratkaisujen kilpailutus ja tarjouksiin liitetyt tiedot

Tarjousdokumentissa käytettiin normaaleja sepeliradan säännöksiä ja vaatimuksia mahdollisuuksien mukaan kuitenkin 30 dB:n maksimirunkomeluvaatimus huomioonottaen. Saatujen tarjousten määrää rajoittivat etenkin seuraavat tekijät:

- Urakoitsijan tuli olla kokenut kiintoraiteen rakentaja tai tehdä yhteistyötä sellaisen kanssa. Itse rakenteen onnistumisen kannalta on tärkeää, että kiintoraiteelle saadaan kokenut urakoitsija, jolla on tietotaitoa asentaa rakenne oikein.
- Kiintoraideurakan budjetti oli varsin suuri (390 milj. kr, noin 40 M€).
- Kunkin urakoitsijan piti antaa tarjous kaikista kolmesta hyväksytyistä kiintoraiderakenteesta.

Tarjouksia saatiin lopulta ainoastaan kaksi, joista Rhombergin ja Banverket Produktionin muodostaman konsortion tarjous Sonnevillen LVT-HA -rakenteella olisi alustavien tietojen perusteella edullisin. Raiteenasentamisurakkaan kuuluivat ainakin raiteen asennus (urakkaraja kiskon päältä -500 mm), sähkö- ja teknisten laitteiden järjestelmät sekä opastinjärjestelmät.

Koska molemmat tarjouskilpailuun osallistuneet urakoitsijat olivat kokeneita, rakennekuvaukset eri osakokonaisuuksille voitiin pitää lyhyinä, käytännössä rakennepiirustuksina ja muutaman sivun dokumentteina. Urakoitsijat huolehtivat ratatöiden käytännön hallinnasta ja laadunvalvonnasta. Koko asennusprosessi aikatauluineen ilmoitettiin tarjouksen yhteydessä eikä salailua tai yllätyksiä ole näiden urakoitsijoiden kanssa esiintynyt.

Järjestelmän komponenteille on asetettu laatuvaatimukset nykyisin käytössä olevien komponenttien laatuvaatimusten ja/tai säännösten (regulations) avulla. Urakoitsijalla on vain normaali rakennustyön takuu, joka on Ruotsissa viisi vuotta. Lisäksi tarjouspyynnössä on tarkasti määritelty eri kiintoraideratkaisujen komponenttien tyypit ja mitat, jolloin urakoitsijat eivät voi tarjota halvempia tai heikompia tuotteita. Erityyppiset kuormitukset on myös määritelty.

Elinkaarikustannukset, työsuorite

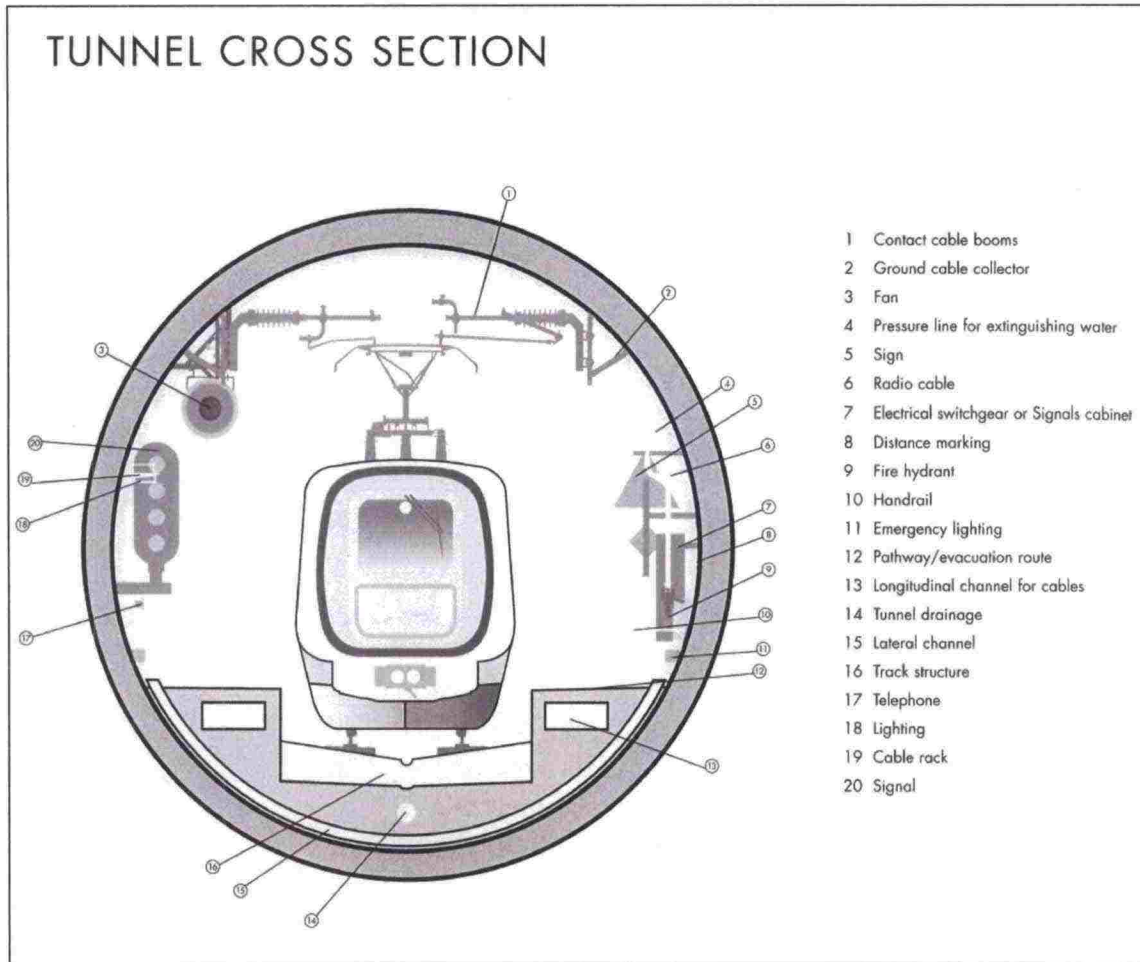
Kiintoraiteen elinkaarikustannuksista todettiin Malmöön valittavan kiintoraiderakenteen olevan uusi, joten esimerkiksi kiskon kulumisesta tietyllä joustomateriaalin jäykkyydellä ei ole käytännössä kokemuksia. Citytunneln on siksi tehnyt laskelmat itse ja urakoitsijat toteuttavat mahdollisimman hyvän kokonaisuuden oman ratkaisunsa komponenteilla. Tarjouksia arvioitaessa tiedetään myös, mitä muille kyseisten ratkaisujen käyttäjille on kerrottu ja miten hyvin ratkaisut ovat toimineet.

Kiintoraiteen avulla on saavutettu säästöjä tunnelin poraus- ja asennuskustannuksista pienemmän tunnelipoikkileikkauksen ansioista. Merkittävimmät perusteet kiintoraiteen valinnalle ovat kuitenkin olleet runkomeluneristyksen tarve, vähäisempi huoltotarve ja pidempi käyttöikä. Liikenteellisen kapasiteetin kannalta todettiin, että jo alkuvaiheessa rataosuus tulee toimimaan lähes täydellä kapasiteetilla, mikä on yksi peruste kiintoraiteelle.

Kiintoraiteen kustannuksista todettiin, että Keski-Euroopassa kustannukset voivat olla 30–50% suurempia kuin sepeliradalla. Tämän lisäksi kustannuksia kasvattaa itse kiintoraidejärjestelmän ja siihen liittyvän osaamisen tuominen Ruotsiin. Lisäksi Ruotsille ja Suomelle on ominaista Keski-Eurooppaa halvempi sepeliraiteen asennushinta, joka kasvattaa eroa kiintoraiteeseen verrattuna.

Tunneli- ja radanrakentamisurakkaan liittyvät tekniset kysymykset, turvallisuus

TBM (Tunnel Boring Machine)-menetelmällä rakennetun tunnelin sisähalkaisija on 7,9 m. Tunnelin poikkileikkaus (kuva 10) teknisten järjestelmien ja muiden komponenttien sijoitteluineen esitetään seuraavassa kuvassa.



Kuva 10. Tunnelin poikkileikkaus teknisine järjestelmineen.

Tunnelipoikkileikkaukseen sijoittuvalle kiintoraiderakenteelle ei ole Malmössä tehty suuria varauksia geometrian säätömahdollisuuksia varten (pysty- ja vaakasuunnassa). Kilpailutuksessa laatuvaatimukset on määritetty siten, että raide asennetaan oikeaan geometriaan. Maksimikallistus radan kaarteissa on 110 mm.

Kiintoraiteessa käytetään samaa 600 mm:n pölkkyväliä kuin sepeliraiteella Ruotsissa. Sonneville ratkaisuun päädyttyessä pölkkyt tuodaan Sveitsistä junalla. Vaihdepölkkyinä käytetään Sonneville pölkkyjä, jotka eroavat tavallisista vaihdepölkkyistä ainoastaan siten, että ne ovat hieman jäykempiä.

Siirtymärakenteen toteutus kirjataan sopimukseen ja urakoitsijan tulee erikseen todistaa siirtymärakenteen toimivuus. Urakoitsija tai kiintoraiteen toimittaja toimittaa piirustuksia kiintoraiteen siirtymärakennetta varten sekä kuvauksen kiintoraiteen asennuksen menetelmästä. Esimerkiksi Rhomberg on selvittänyt, miten siirtymärakenne toteutetaan Sonneville HA-LVT -rakenteessa. Tukemista ei tarvita kiintoraiteen välittömässä läheisyydessä, koska siirtymärakenteessa myös sepeliraide rakennetaan jäykemmäksi mm. lisäkiskojen käytöllä.

Muita kysymyksiä

Myös embedded rail -ratkaisuja olisi harkittu, jos kumipyöräajoneuvoilla olisi pitänyt päästä tunneliin. Näitä ei kuitenkaan tutkittu tarkemmin, koska tarkasteltu järjestelmä ei

täyttänyt Malmön runkomeluvaimennusvaatimuksia. Embedded rail -järjestelmien ongelma on kiskonvaihto, koska käytännössä ratageometria joudutaan tällöin asentamaan uudestaan.

Suunnittelutyötä on hankaloittanut se, että eurooppalaisen kiintoraidestandardin laatumisesta on luovuttu sekä radan käyttäytymis- että rakentamisvaatimusten osalta. Esim. Hollannissa on kuitenkin käytetty luonnosversiota. Osakomponentit ja niiden yhdistelmät voitaneen kuitenkin hyväksyttää erikseen.

Keskustelussa todettiin, ettei sepeliraide itsessään lisääsi ilmassa olevaa pölyä. Tukholmassa on havaittu likaongelma, joka paikallistettiin kiskoista ja junien jarruista lähteviin metallipartikkeleihin. Täten pienhiukkaset eivät olisi peruste kiintoraiteen valinnalle.

Johtopäätökset

Malmössä valittuja ratkaisuja ei voida suoraan soveltaa Kehärataan mm. erilaisesta kallioperästä ja tunnelin rakentamisperiaatteesta sekä suunnittelua voimakkaasti ohjanneesta vahvasta runkomelun vaimennuksen vaatimuksesta johtuen. Runkomeluvaatimuksen vuoksi Malmöä varten jouduttiin kehittämään uusia kiintoraideratkaisuja, joiden toimivuudesta ei vielä ole näyttöä. Tämän vuoksi Citytunneln-organisaatio on tehnyt tarvittavat laskelmat itse ja valinnut tunneliin soveltuvat rakenneratkaisut, jonka jälkeen urakoitsijat tarjoavat mahdollisimman hyvää kokonaisuutta näille kiintoraideratkaisuille.

Hankkeen kokemusten mukaan kiintoraiteen käyttöä ei todennäköisesti voi perustella investointi- ja kunnossapitokustannusten säästöillä, vaikka tunnelin rakentamiseen liittyvistä töistä on saatu kustannussäästöjä kiintoraiteen ansioista. Tärkein peruste kiintoraiteelle oli runkomelun eristyksen tarve. Lisäksi kiintoraiteella saavutettava suurempi liikenteellinen kapasiteetti on merkittävä peruste Malmön hankkeessa, koska rataosalla liikennöidään alusta pitäen lähes täydellä kapasiteetilla.

5 Kööpenhaminan metro

5.1 Yleisesittely

Malmön Citytunnelnin jälkeen tutustuttiin lyhyesti myös Kööpenhaminan automaattimetroon, jonka tunneliosuudelle on asennettu Sonneville LVT-tyyppinen kiintoraide. Avorataosuuksista ainakin rataosuus lentoasemalle on toteutettu sepeliratana. Tekniset tiedot on varmistettu metron internet-sivuilta¹.

Kööpenhaminan metro on laiturioellinen, kuljettajaton ja ottaa käyttäjänitteensä sivuvirtakiskosta. Metrossa on tällä hetkellä kaksi linjaa, joista lentoasemalle liikennöitävä suora linja on avattu lokakuussa 2007. Järjestelmää täydennetään vuoteen 2018 mennessä ”Kehäradalla” (Cityringen), joka tarjoaa mm. uusia yhteyksiä keskustassa. Kööpenhaminan metron vuoroväli runko-osuudella on 2/3/15 min ja haaroissa 4/6/15 min. Metro liikennöi sunnuntaista tiistaihin puoleenyöhön saakka ja keskiviikosta lauantaihin ympäri vuorokauden.

¹ Kööpenhaminan metron internet-sivut englanniksi: <http://intl.m.dk/>



Kuva 11. Kööpenhaminan automaattimetro avoradalla lähellä lentoaseman asemaa.

Alla oleva kuva on noin 300 metriä Kastrupin lentoaseman asemalta. Huomionarvoisia asioita ovat kaapelikourujen sijoitus, tasoristeys sekä tukikiskot, jotka jatkuvat kaarteeseen takana olevan sillan yli lentoaseman asemalle saakka. Tukikiskot puuttuvat ainoastaan sillan välittömässä läheisyydessä olevan raiteenvaihtopaikan vaihteiden kohdalta.

5.2 Metrotunneli ja kiintoraide

Kööpenhaminan metron tunneliosuus on rakennettu TBM-menetelmällä, New Austrian Tunnelling Methodilla (NATM) sekä cut-and-cover-menetelmällä. Käytännössä lähes koko tunneli on porattu ja verhoiltu betonivalulla/elementeillä. Rakennusmenetelmät vastaavat Malmössä käytettyjä samanlaisten kivilajien vuoksi. Tunnelin sisähalkaisija on vain 4,9 ja ulkohalkaisija 5,5 metriä. Liikkuva kalusto on räätälöity ahdasta tunneli-poikkileikkausta varten.

Kuvassa 12 näkyy hyvin toispuolinen poistumistie, jonka leveys on vain 0,70 m. Ensisijainen hätäpoistumisreitti tunnelissa on kiintoraiteella kiskojen välissä, mikä on mahdollista LVT-rakenteessa käytettyjen erillisten pölkkyjen ansiosta. Ratkaisun hyväksymiseen lienee vaikuttanut vahvasti liikkuvan kaluston pieni yksikkökoko: 39 metriä pitkän ja 2,65 metriä leveän metrojunan kapasiteetiksi ilmoitetaan yhteensä 300 matkustajapaikkaa, joista 204 on seisomapaikkoja.



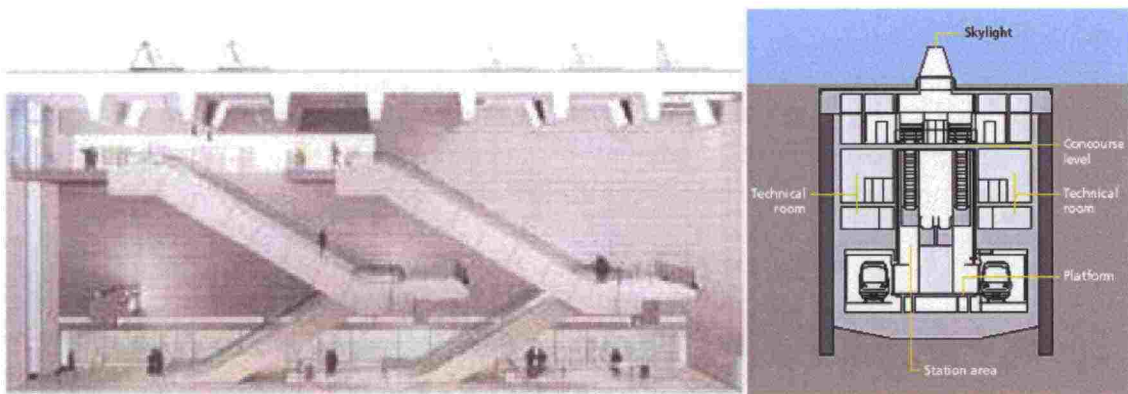
Kuva 12. Kööpenhaminan automaattimetron tunneliosuutta; sisähalkaisija vain 4,9 metriä.

Hätäpoistumisteiden etäisyys tunnelissa on 400–600 metriä. Lähin hätäpoistumistie ilmaistaan kuvassakin näkyvällä suorakaiteen muotoisella vihreällä opasteella, joita on 20 metrin välein. Kuvassa 13 on esitetty itse kiintoraide asemalla junan etuikkunan läpi otetussa lähikuvassa.



Kuva 13. Lähikuva Sonneville LVT -kiintoraiteesta.

Kaikki tunneliasemat ovat 60 metriä pitkiä ja 20 metriä leveitä. Laituritaso sijaitsee noin 20 metriä maanpinnan alapuolella. Kuvassa 14 on esitetty aseman pituus- ja poikkileikkaus.



Kuva 14. Metron tunneliaseman pituus- ja poikkileikkaukset

5.3 Yhteenveto Kööpenhaminan metrosta

Kööpenhaminan automaattimetrosta voidaan todeta, että monet sen perusominaisuuksista, kuten lyhyt vuoroväli, on toteutettu riittävän suuren kapasiteetin saamiseksi pienestä yksikkökoosta huolimatta. Kiintoraiteen keskeisiä valintaperusteita

ovat selkeästi saavutettu pienempi tunnelipoikkileikkaus, hyväksyttävä hätäpoistumistie raiteella sekä kiintoraiteen sallima suurempi käytössä oleva liikenteellinen kapasiteetti.

6 Frankfurt–Köln-suurnopeusrata

6.1 Matkan tarkoitus ja tavoitteet

Matkan tarkoituksena oli saada lisätietoja Rheda-tyyppisen kiintoraiteen suunnittelusta, rakentamisesta ja käyttökokemuksista. Kohteeksi valittiin v. 2002 valmistunut Köln–Frankfurt-suurnopeusrata. Radan suunnittelussa on ollut mukana Pöyry Infra GmbH:n Mainzin toimisto, jossa toimii myös Pöyryn kiintoraiteen ja radan rakenteiden osaamiskeskus.

Matkan aikana tutustuttiin rataan maastossa Frankfurtin ja Limburgin välillä sekä Limburgin asemaan. Lisäksi nähtiin radan suunnitteluun ja rakentamiseen liittyviä esityksiä Pöyry Infra GmbH:n Mainzin-toimistolla.

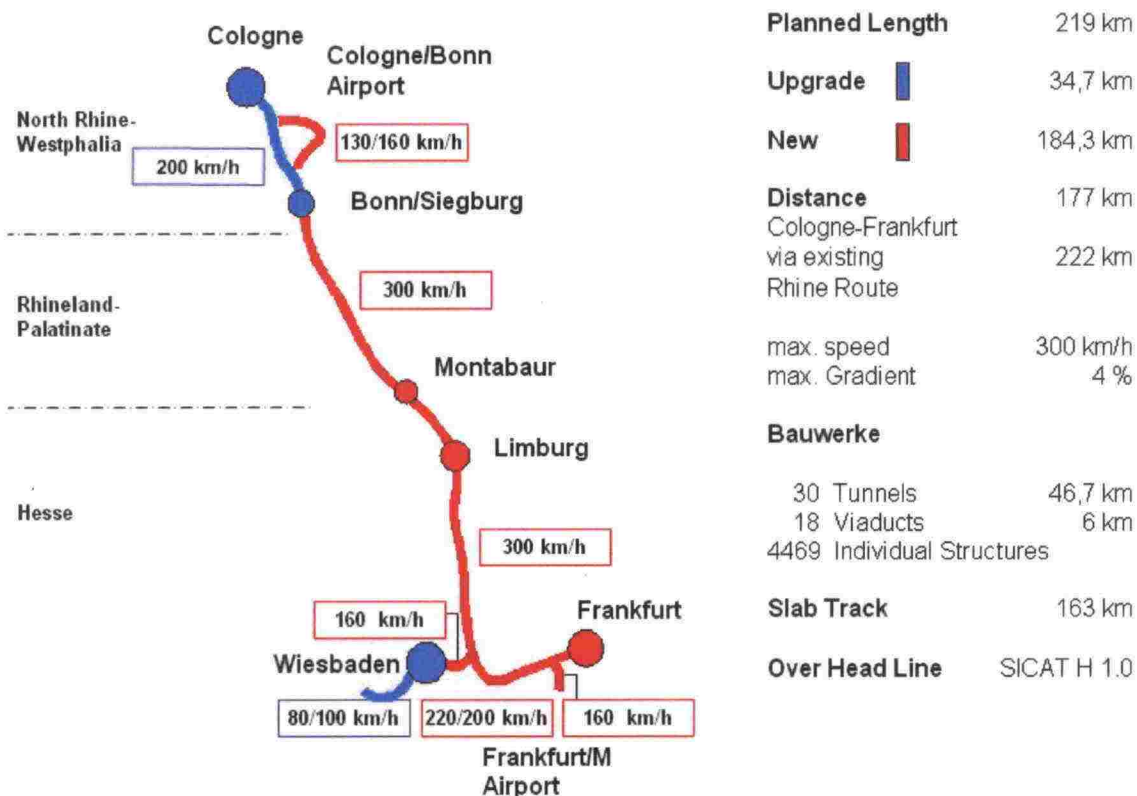
6.2 Hankekokonaisuus, sen perustelut ja vaikutukset junaliikenteeseen

Köln–Frankfurt-ratahanke perustuu Länsi-Saksan vuoden 1973 rataverkon modernisointiohjelmaan. Alkuperäistä ratasuunnitelmaa muutettiin 1985, jotta rata saataisiin ympäristövaikutusten minimoimiseksi kulkemaan samassa maastokäytävässä moottoritie A3:n kanssa. Samalla radasta tehtiin vain henkilöliikennerrata, jolle sallittiin maksimipituuskaltevuus 40 %, minimikaarresäde 3 350 m ja suurin kallistus 170 mm. Tämä on poikkeuksellista, koska useimmat uudet radat ovat Saksassakin seka-liikennerratoja. Suuremmalla pituuskaltevuudella ja pienemmällä kaarresäteellä oli lisäksi mahdollista saavuttaa linjaus, jolla tunnelien ja siltojen pituuksia sekä määriä voitiin vähentää.

DB:n tekemän linjauksen perusteella rataosuudelle päätettiin asentaa kiintoraide. Käytetyt rakenneratkaisun perustuvat Rheda-tyypin kiintoraiteeseen sen ollessa suunnitteluvaiheessa ainoa DB:n hyväksymä rakennetyyppi. Kiintoraiteen eduksi voidaan laskea sepeliraiteen kunnossapidon ja uusimisen välttäminen sekä rakenteella saavutettava suurempi sivuttaisvastus ja rakenteen pysyvyys.

Suuren pituuskaltevuuden vuoksi rataosalla voidaan liikennöidä ainoastaan ICE 3 -kalustolla. Rajoittava tekijä on kaluston jarrutusteho, joka radan käyttönopeudella ja pituuskaltevuudella ei ole riittävä muissa käytössä olevissa junayksiköissä kuten vanhemmissa ICE- tai TGV-junissa. Uudessa suurnopeus-YTEssä sallittu maksimipituuskaltevuus on vain 35 promillea, minkä seurauksena vastaavaa rataa ei voida jatkossa rakentaa EU:n alueella (ilman muutoksia YTEeseen).

Radasta tehtiin toteuttamispäätös v. 1989 ja se otettiin käyttöön v. 2002. Radan varsinainen rakennusaika oli kuusi vuotta ja budjetti kuusi miljardia euroa. Ratahankeeseen kuului itse Köln–Frankfurt-radana lisäksi ratayhteys Köln/Bonn-lentoasemalle sekä Wiesbadenin kautta Mainziin kulkevan radan perusrakennus. Koko ratahankeen ratapituus oli 219 km, josta uutta rataa on 184 km ja vanhan radan tasonnostoa 35 km. Ratapituudesta kiintoraidetta on 163 km. Ratahankeeseen perustiedot esitetään kuvassa 15.



Kuva 15. Köln–Frankfurt-suurnopeusrata ja siihen liittyneet ratatyöt.

Radan ansiosta matka Kölnistä Frankfurtiin lyheni 222 → 177 km ja matka-aika 134 → 58 min. Kulkuapajakauma on radan rakentamisen myötä jonkin verran muuttunut: esimerkiksi Limburgista on 2 500 ja Montabaurista 2 200 päivittäistä pendelöijää Frankfurtiin ja Kölniin. Huipputunnin matkustajamäärä kummaltakin asemalta on noin 300. Limburgissa pysähtyy päivittäin 40 ja Montabaurissa 39 junaa.

6.3 Kiintoraide Saksassa ja sen tilaus sekä kilpailutus

Vakiintunut käytäntö Saksassa on, että etenkin pitkissä tunneleissa käytetään kiintoraideita. Nykyisetkin sepeliraiteet on tunneleissa tarkoitettu korvata kiintoraideilla. Muutoin kiintoraide on käytännöllistä rakentaa ainoastaan uudelle radalle, koska rakennustyö vaatisi käytössä olevalla radalla pitkää totaaliakatkoa.

Köln–Frankfurt-radon kiintoraideen tilausvaiheessa laadittiin sivun mittainen kiintoraideen määrittelyteksti, jossa todettiin mm, että käytettävän kiintoraideratkaisun on oltava DB:n hyväksymä. Tämän seurauksena ainoastaan Rheda-tyyppinen kiintoraide ja sen eri versiot täyttivät tuolloin annetun määrityksen. Kiintoraideesta oli kokemuksia sekä tilaajilla että urakoitsijoilla vain vähän. DB on myöhemmin hyväksynyt käyttöön myös muita kiintoraideratkaisuja, kuten esivalmistetuista elementeistä tehtävä Bögl sekä asfalttipohjainen Getrac.

Kiintoraideen kilpailutus tehtiin siten, että rata jaettiin kuuteen osuuteen, joille pyydettiin kokonaistarjous. Urakkaan kuului koko radan rakentaminen kyseisellä osuudella huomioiden alusrakenteet, radan rakenteet, kiintoraideen sekä ainakin osa teknisistä järjestelmistä. Kilpailutus johti siihen, että urakoitsijat muodostivat

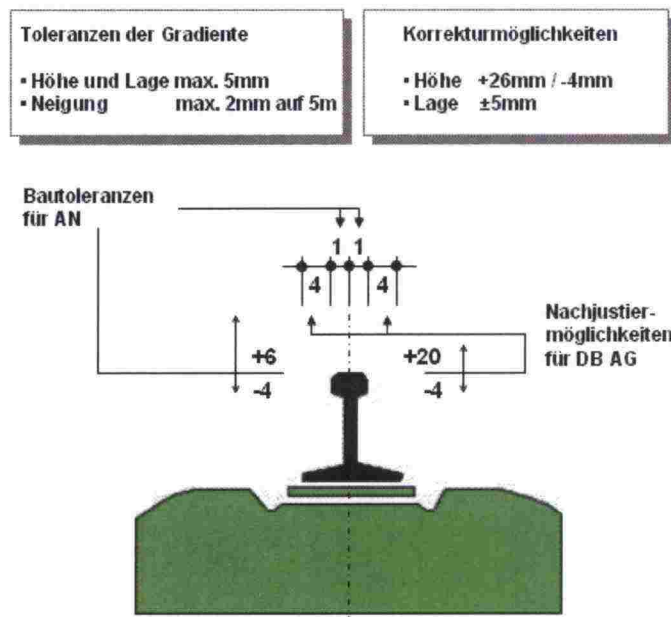
konsortioita ja kiintoraiteen osalta jokainen urakoitsija kehitti käytännössä omanlaisensa Rheda-konseptiin perustuvan kiintoraideratkaisun.

Tähän, kuten myös työmenetelmään, vaikutti merkittävästi osuuden sijoittuminen radalla. Keskimmaisilla osuuksilla ei ollut mahdollisuutta kuljettaa lopullisia 120-metrisiä kiskoja alueelle junalla, joten kiintoraiteen asentamisessa käytettiin työn-aikaisia 15–18 metrin pituisia kiskoja, jotka voitiin kuljettaa myös maantiekuljetuksena. Lopullista kiskoa käytettiin silloin aina kun se oli mahdollista, jolloin ne jouduttiin suojaamaan valun aikana ja puhdistamaan rakentamisen valmistuttua. Puhdistus jouduttiin käytännössä tekemään käsityönä, josta muodostui merkittävä lisäkustannus.

Kiintoraiteen rakentaminen, rakentamistoleranssit, HBL ja kiintoraidevaihte

Hydraulisesti sidottua kerrosta (HBL/HGT) on aiemmin käytetty tienrakennuksessa, joten kerros tehtiin tienrakentamiskoneilla. Sama koski liukuvaluna toteutettua betoni-kaukaloa. HBL-työsuorituksen mainittiin olevan 7000 m/d, jos tehdään vuorokauden ympäri 24–26 työryhmällä.

Kiintoraiteen kiskonkiinnitysjärjestelmä perustuu Vosslohin 300-sarjaan, jota on mahdollista säätää korkeussuunnassa on $+26/-4$ mm. Tästä rakentamistoleranssia on $+6/-4$ mm ja jälkikäteistä säätömahdollisuutta $+20/-4$ mm. Sivusuunnassa säätövara on ± 5 mm, josta rakentamistoleranssia on ± 1 mm ja jälkikäteistä säätömahdollisuutta ± 4 mm (kuva 16).



Kuva 16. Kiintoraiteen rakentamistoleranssit ja jälkikäteiset säätömahdollisuudet. (lähde: DB AG).

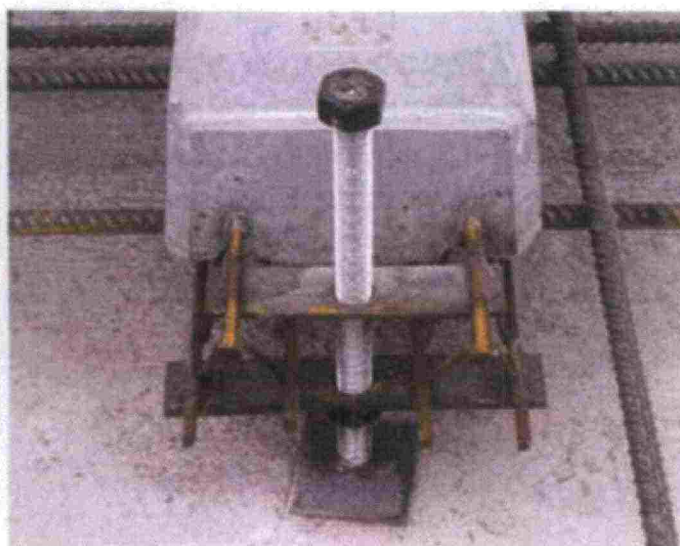
Kiintoraidetta varten jouduttiin kehittämään uusi vaihdetyyppi sekä uusi kone (kuva 17) vaihteen asentamista varten. Vaihteet tuotiin asennuspaikalle ja asennettiin Suomessa vaihteen asennukseen käytettävää ”kuukävelijää” muistuttavalla telaketjuilla kulkevalla koneella, joka kehitettiin vaihteen painon vuoksi sekä värähtelyn pienentämiseksi vaihdetta asennettaessa.



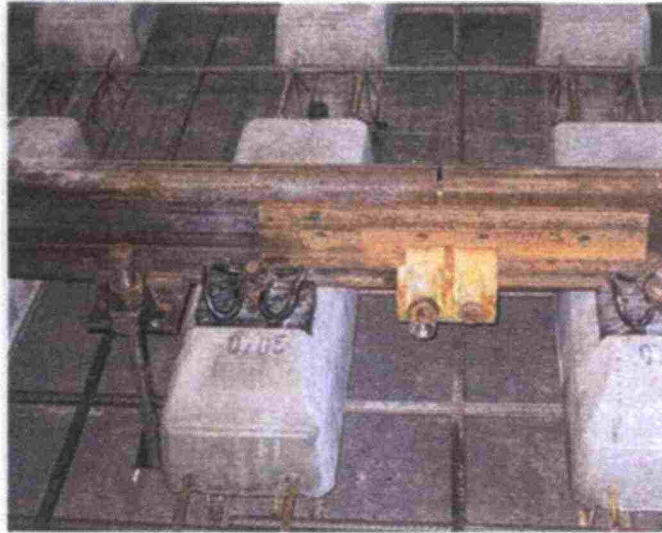
Kuva 17. Vaihteensiirto- ja asennuskone. (lähde: DB AG).

Raidegeometrian säätö, mittaukset ja tarkistukset

Rakennusvaiheessa asennettiin kiinteä mittauspiste raidegeometrian säätöä varten 50 m välein. Mittauspisteet määritettiin rakentamisen alkuvaiheessa tehdyn geodeettisen verkon perusteella. Jokainen pölkky on erikseen säädettävissä korkeussuunnassa joko joka toisessa pölkkyssä olevan tai kiskoon pölkkyjen väliin hitsatun ”säätöruuvien” avulla (kuvat 18 ja 19). Sivusuuntaan säätö voidaan tehdä myös pohjaan asennetulla tuella, jossa kolmionmuotoinen tuki siirtää raidetta sivuun, kun korkeusasemaa muutetaan.



Kuva 18. Raidegeometrian säätöruuvi tuettuna joka toisesta (lähde: Pöyry Infra GmbH).



Kuva 19. Raidegeometrian säätöruuvi tuettuna kiskosta (lähde: Pöyry Infra GmbH).

Raide-elementin tukemista joka toisesta pölkystä ei voida suositella, koska tuetun pölkyn osalta kiskon ja pölkyn välinen joustoelementti painuu kasaan, kun tukematon pölkky ”riippuu” ja joustoelementti on lepotilassa. Seurauksena on pölkkyjen korkeus-
asemien ero, jonka on todettu vaikuttavan kiskon käyttäytymiseen. Eroa voidaan kuitenkin pienentää kiskonkiinnityksiä kiristämällä.

Raidegeometria tarkastettiin (kuva 20) betonivalun jälkeen kevyellä mittavaunulla noin metrin välein. Lisäksi tarkastettiin erikoiskohteet kuten vaihteet ja siirtymärakenteet. Ratageometrian tarkkailua tehostettiin jo rakentamisen aikana. Betonirakenteiden osalta käytettiin tienrakentamisen direktiivejä, mikä tarkoittanee tässä kansallisia ohjeistuksia.



Kuva 20. Raidegeometrian mittaus ennen betonivalua (lähde: Pöyry Infra GmbH).

Valmis rata tarkastettiin veturivetoisella mittausjunalla nopeudella 40 km/h. Tarkastuksessa löydettiin muutamia pohjaveden virtauksen aiheuttamia vikoja, jotka olivat joko vajoamisia tai kohoamisia. Lopuksi tehtiin mittausajoja ICE-kalustolla maksiminopeudella 330 km/h.

6.4 Radan rakentamisen ja infratöiden muita haasteita

Ratatunnelien louhinnassa on jouduttu käyttämään useita erikoismenetelmiä, koska kiviaines ei ole lujaa. Esimerkiksi Limburgin tunnelissa louhittiin ensin sivut ja ne vahvistettiin, jonka jälkeen louhittiin keskiosa ja lopulta pohja². Vesisuojaus tehtiin muovikalvolla ennen tunnelin reunojen betonointia.

Pohjamaan kantavuuden parantamiseksi on käytetty esimerkiksi pohjamaan yläosan kalkkistabilointia sekä ns. sepelipilareita. Joidenkin alueiden pehmeän maaperän vuoksi maamassoja tiivistettiin esikuormituspenkereellä 18 kuukauden ajan. Ratakäytävän erityisongelma ovat entiset kaivosalueet, joiden vuoksi on varauduttava maanvajoamiseen. Myös Züblin-menetelmällä rakennetussa kiintoraiteessa oli aluksi ongelmia, mutta yritys paransi rakennusmenetelmiään esimerkiksi ottamalla käyttöön jäykän rakennuskehikon.

Hidasteita itse kiintoraiteen rakentamisessa olivat erikoistyökoneiden hajoamiset, betonin saatavuus, sunnuntaityölupien saanti sekä viimeistelyvaiheessa tarvittu käsityö esimerkiksi betonin tasoituksessa ja pölkkyjen puhdistuksessa.

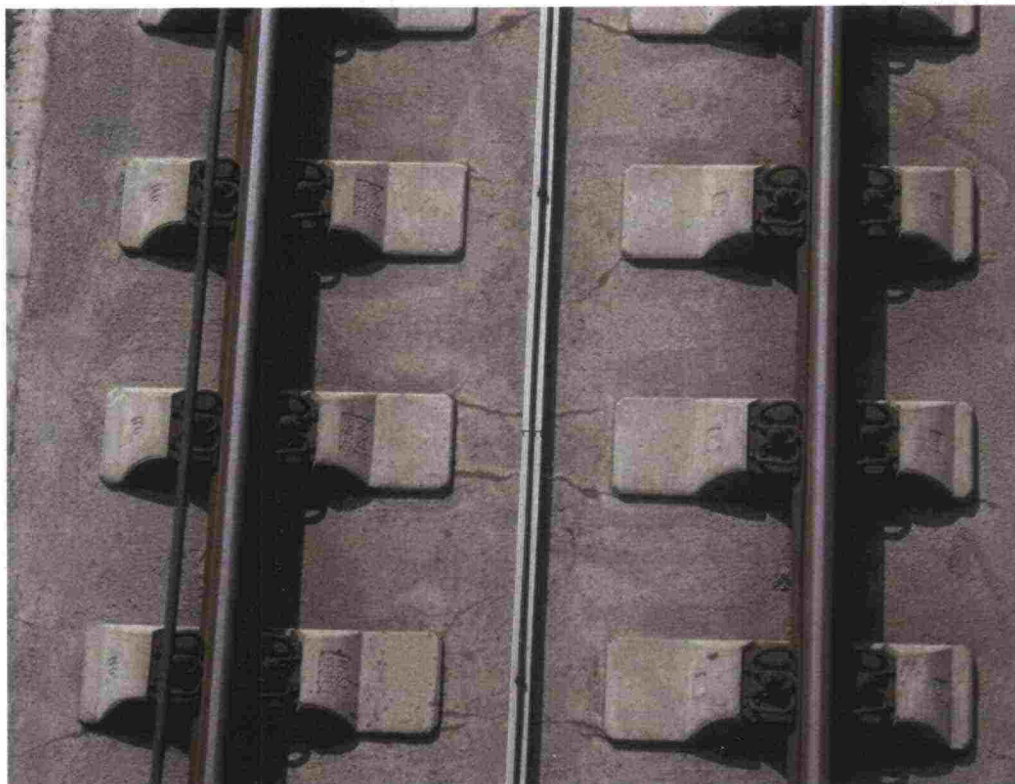
6.5 Kunnossapito, elinkaarikustannukset

Urakoitsijan takuu aika kiintoraiteelle oli viisi vuotta, jonka jälkeen rata siirtyi DB:n vastuulle. Tämä perustui oletukseen, että suurimmat viat on huomattu ja korjattu ensimmäisten vuosien aikana. Kiintoraiteen kunnossapitotoimenpiteitä Köln–Frankfurt-rataosalla ovat olleet tähän mennessä:

- Kiskon hionta, jota on jouduttu paikoin tekemään usein.
- Kiskon vaihto, joillakin alueilla jo 6 vuoden käytön jälkeen.
- Erityisongelma olivat siltojen päät, joissa kiskonjännitysvoimat kasvoivat liian suuriksi. Näitä vahvistettiin joko rakentamalla monoliitti tai lyhyt ”silta” saumakohdan yli.
- Betonilaatan pienempien halkeamien tarkkailu ja täyttö tarvittaessa.
- Betonilaatan halkeamien laajetessa ”liikaa” laattaa joudutaan korjaamaan, toleranssirajoja ei kuitenkaan saatu selville.

Saksalaisten kanta pintalaatan betonin laatuvaatimuksiin ja halkeiluun oli, että sen tarkoitus on sitoa raide paikalleen, jolloin sille ei tarvitse asettaa tiukkoja laatuvaatimuksia esimerkiksi halkeilua vastaan. Betonipölkkyjen suhteen laatuvaatimusten tulee olla riittävän tiukkoja. Limburgin seudulla käytetyn Rheda Berlin -kiintoraiteen betonilaatassa havaittiin ekskursion aikana halkeamia (kuva 21).

² Muita tunneliesimerkkejä: ks. tietopankista kalvosarja Poyry_9i_HSR_KRM-BMVBW-UK 20060509_pakatut_kuvat.ppt



Kuva 21. Halkeamia Limburgin aseman kiintoraiteessa, lähikuva (Rheda Berlin -tyyppi).

Elinkaarikustannusten osalta Saksassa merkittävä kiintoraidetta puoltava tekijä on sepeli, joka kivenlaadusta ja suurista liikennemääristä johtuen joudutaan vaihtamaan 25–30 vuoden välein normaalilla sepelitukikerroksellisella radalla.

6.6 Yhteenveto Saksan matkasta

Frankfurt–Köln-radalla Rheda-tyyppisiä kiintoraideratkoja asennettiin DB:n linjausten perusteella. Kiintoraiteella parannetaan myös rakenteen sivuttaisvastusta, mikä on eduksi radan tiukoissa kaarteissa ja suurilla kallistuksilla. Saksassa kiintoraidetta voidaan lisäksi perustella pölkkyjen ja sepelin nopeammalla kulumisella etenkin suurnopeusradoilla.

Saksan matka vahvisti aiempia tietoja ja oletuksia kiintoraiteen sopivasta käytöstä. Matka toi myös esiin kiintoraiteeseen liittyviä riskejä ja lisäkysymyksiä, joita ei välttämättä haluttu tuoda esiin. Vaikuttaa siltä, ettei kiintoraiteen käyttäytymisestä ja elinkaarenaikaisista korjaustoimenpiteistä vielä ole riittävästi kokemuksia tai tietoa ei haluta vapaasti jakaa.

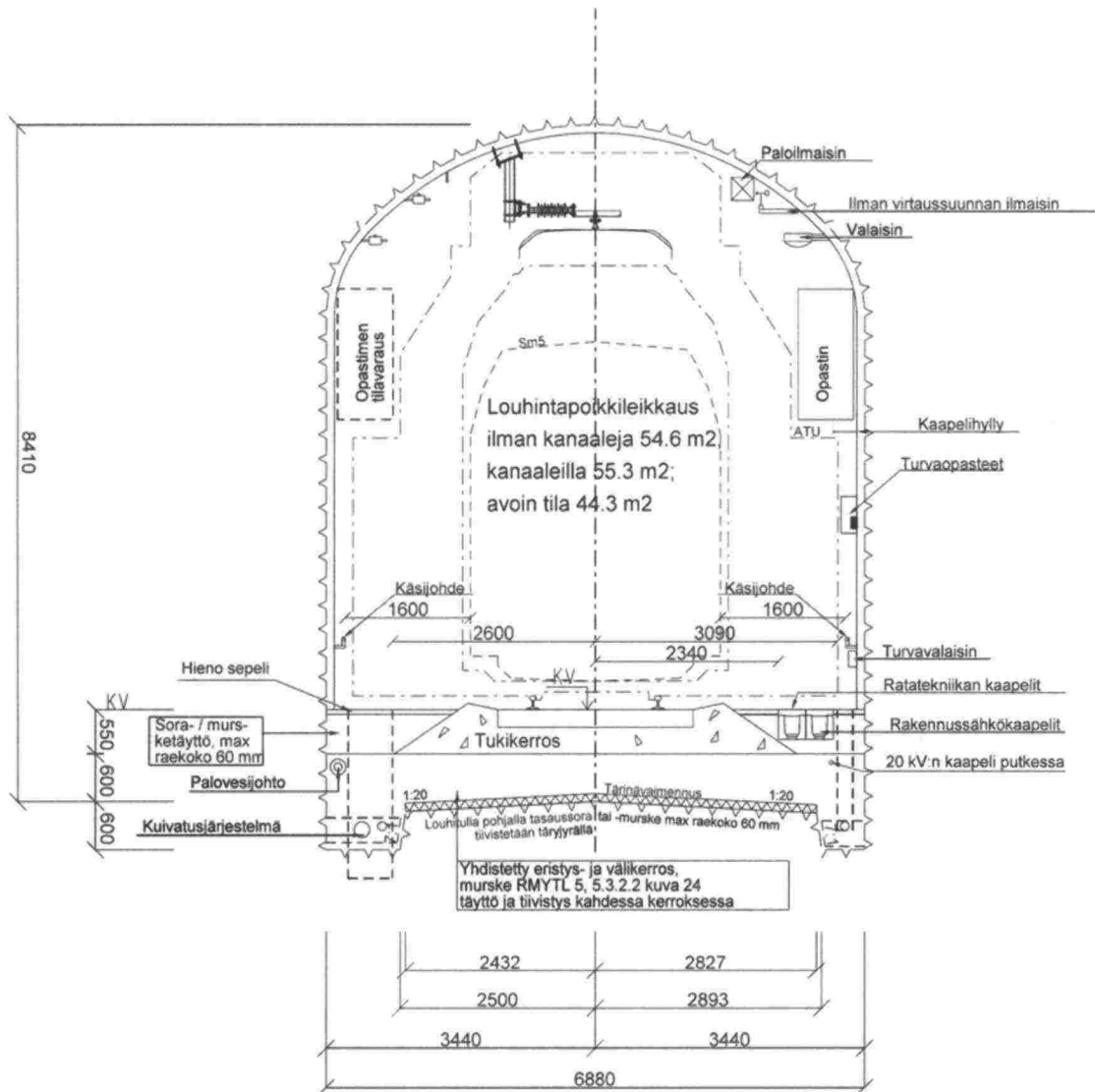
Kiintoraiteen investointikustannuksia nostavia tekijöitä ja riskejä ovat Saksan ja Malmön matkan perusteella mm.

- uusien työmenetelmien opettelu, osaamisen tuominen Suomeen ja soveltaminen paikallisissa oloissa
- erityiskoneiden tarve kiintoraideratkojen osalta sekä kaluston hankinta, käyttö ja huollon järjestäminen.

MUODOSTETUT TUNNELIPOIKKILEIKKAUKSET

Rakenne 0

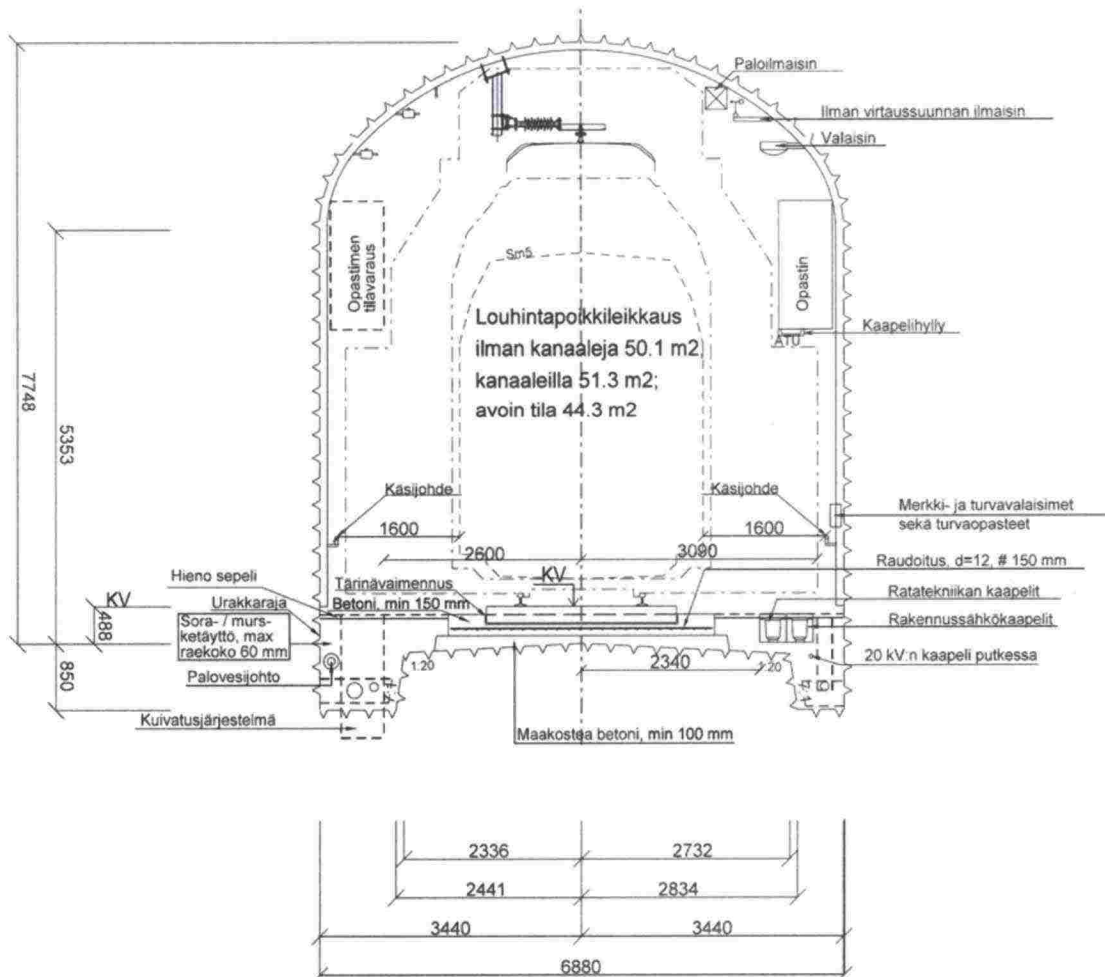
Sepelitukikerroksellisen raiteen tunnelipoikkileikkaus.



Rakenne 1a

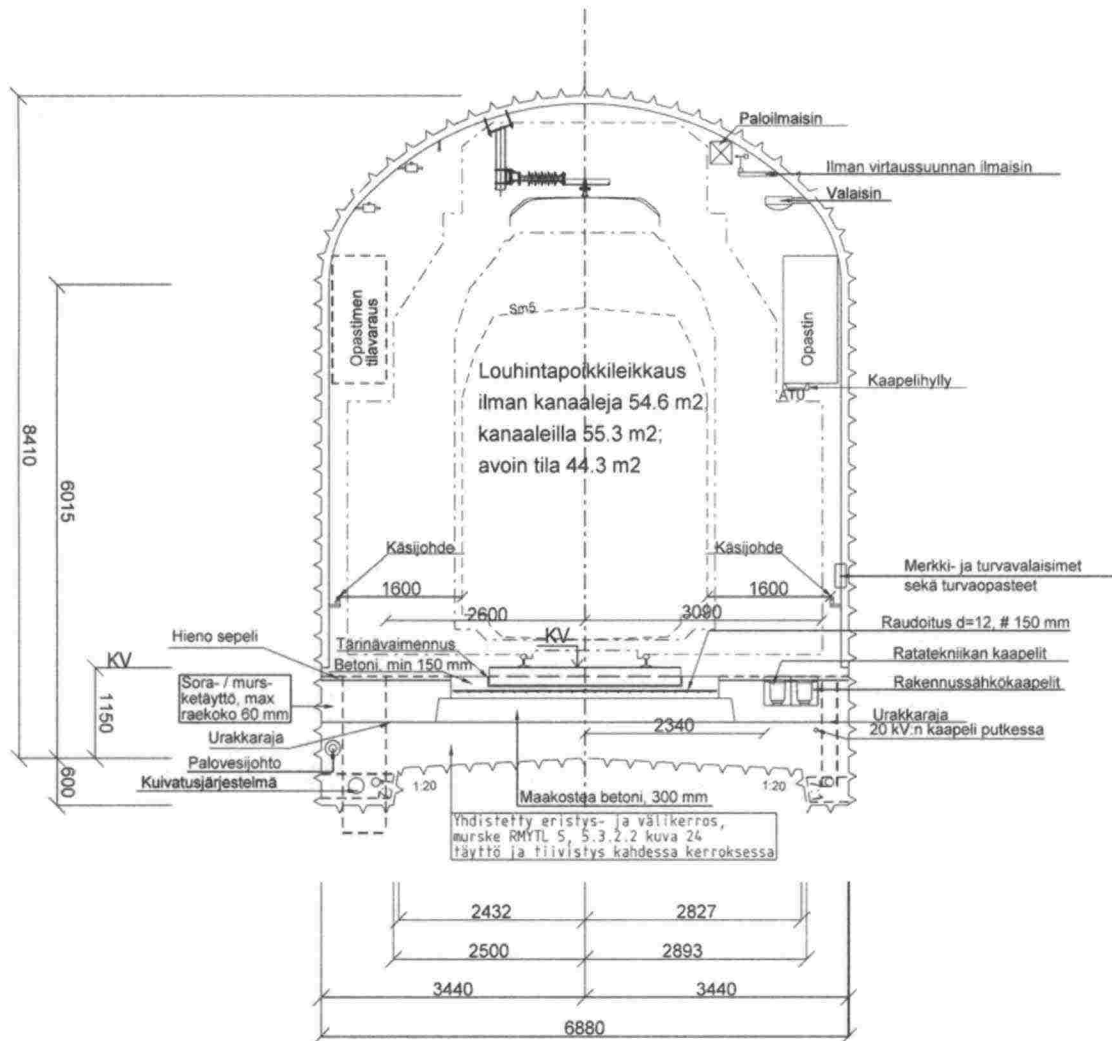
Paikalla valettavalla teräsbetonilaatalla ja kalliopintaan perustettavalla maakostealla betonilaatalla toteutettava kiintoraideratkaisu.

Rakenne soveltuu vain tunneliosuuksille, joilla rakenteeseen ei kohdistu jäätymis-/routimisriskiä.



Rakenne 1b

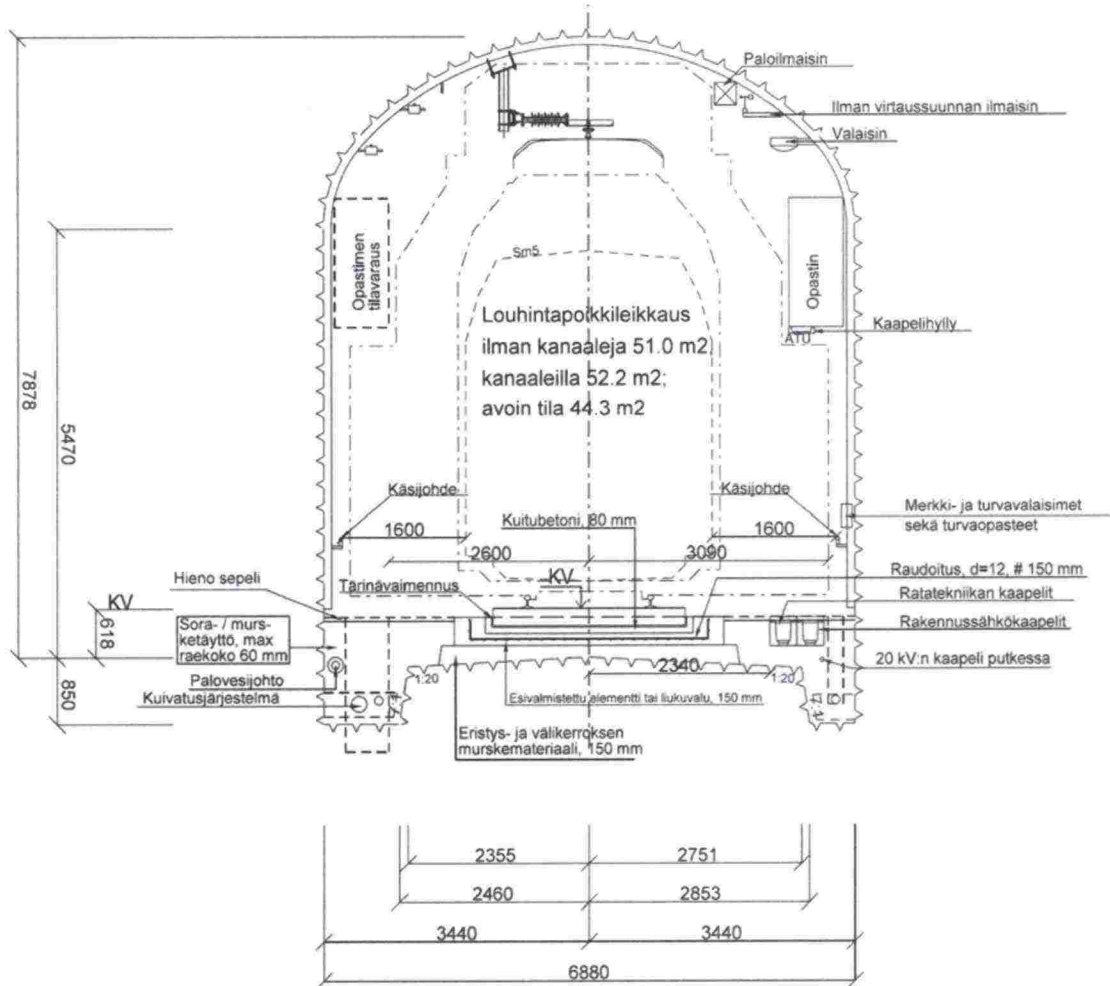
Paikalla valettavalla teräsbetonilaatalla ja murskekerroksen varaan perustettavalla maakostealla betonilaatalla toteutettava rakenne sovitettuna tunnelipoikkileikkaukseen. Louhintasyvyys on sama kuin sepelitulokierroksellisella raiteella, missä sivuilla olevat kanaalit voidaan toteuttaa profiililouhinnan yhteydessä.



Rakenne 2a

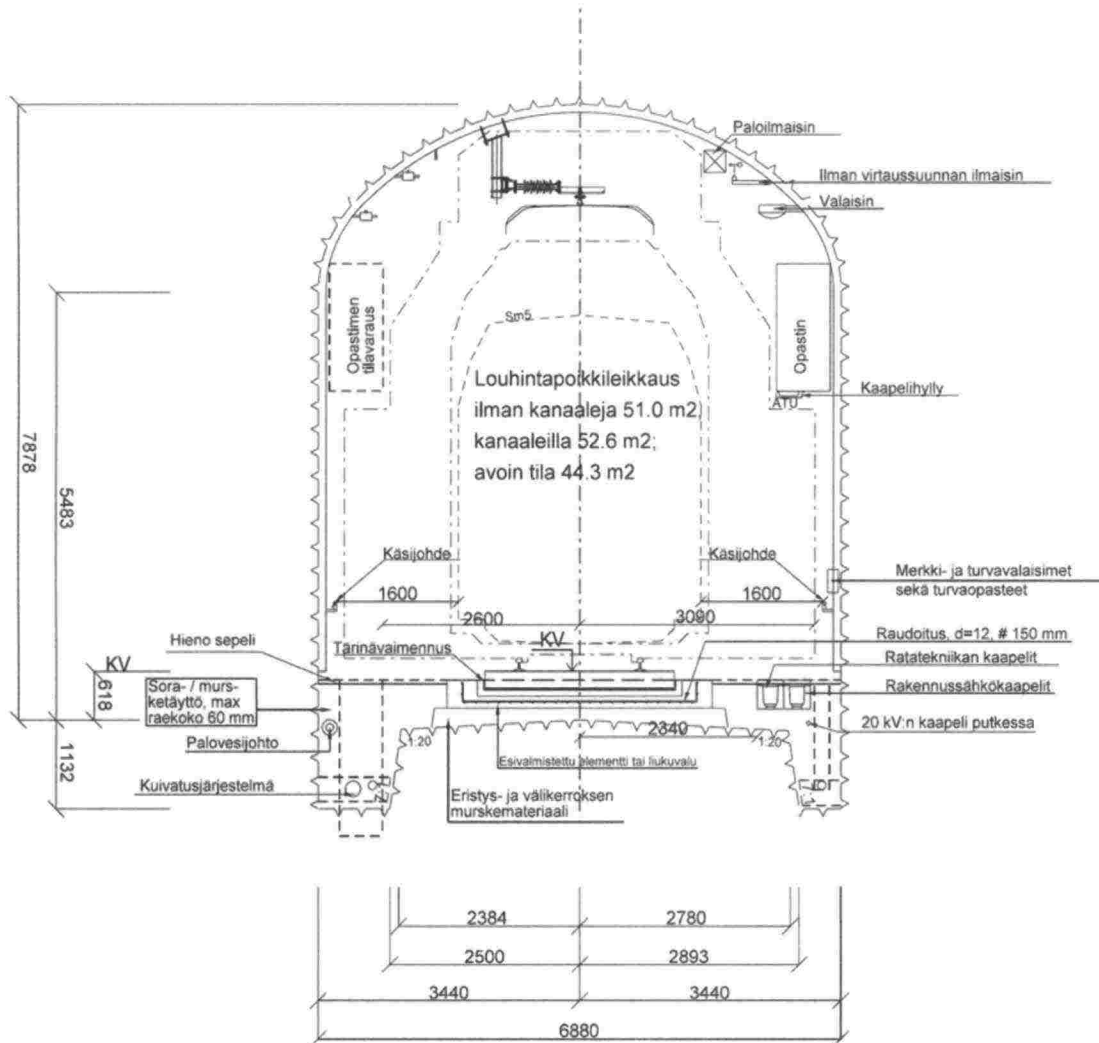
Betonikaukalarakenne, jossa on madalletut kanaalit. Rakenne perustetaan eristys- ja välikerroksen murskekerrokselle, jonka minimipaksuus on 150 mm.

Rakenne soveltuu vain tunneliosuuksille, joilla rakenteeseen ei kohdistu jäätymis-/routimisriskiä.



Rakenne 2b

Betonikaukalarakenne, jossa on syvät kanaalit. Rakenne perustetaan eristys- ja välikerroksen murskekerrokselle, jonka minimipaksuus on 150 mm.



RATAHALLINTOKESKUKSEN JULKAISUJA A-SARJASSA

- 1/2005 Sähköratamaadoitusten perusteet – suojarakenteet, rakennukset ja laiturirakenteet
- 2/2005 Kerava–Lahti-oikoradan ennen–jälkeen vaikutusarviointi, ennen–vaiheen selvitys
- 3/2005 Ratatietojen kuvaaminen – ratatietokanta ja verkkoselostus
- 4/2005 Kaakkois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
- 1/2006 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämisstrategia
- 2/2006 Rautatie ja sen vaarat osana lasten ympäristöä
- 3/2006 Matkustajainformaatiojärjestelmien arviointi Tampereen, Toijalan ja Hämeenlinnan rautatieasemilla
- 4/2006 Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen
- 5/2006 Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading
- 6/2006 Research and Development Strategy of the Finnish Rail Administration
- 7/2006 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman lähtökohdat ja vaikutustarkastelut
- 8/2006 Vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjaus
- 9/2006 Ratarakenteissa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys
- 10/2006 Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet
Kirjallisuustutkimus ja laskennallinen tausta-aineisto
- 11/2006 Rautatieinfrastruktuurin kehitystarpeet suuryksikkökuljetusten yleistyessä
- 12/2006 Pasilan aseman esteettömyyskartoitus ja toimenpideohjelma
- 1/2007 Akselipainon noston tekniset edellytykset ja niiden soveltuminen
Luumäki–Imatra-rataosuudelle
- 2/2007 Radan kulumisen rajakustannukset 1997–2005
- 3/2007 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997–2005
- 4/2007 Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiliteettitarkasteluihin
- 5/2007 Pohjois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
- 6/2007 Suomen rataverkon tärinäselvitys
Kirjallisuuskatsaus ja tärinäkohteet vuosina 2000–2006
- 7/2007 Luvattomien radanylytysten välttäminen
- 8/2007 Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnon arvioinnissa
- 9/2007 Markkinoilletulo ja rautatiemarkkinoiden muutos kotimaisen tavaraliikenteen avautuessa kilpailulle Suomessa
- 10/2007 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman liikenne-ennusteet
- 11/2007 Logistiikkakeskusten tie- ja ratayhteydet
- 1/2008 Aikataulusuunnittelu ja rautatieliikenteen täsmällisyys
- 2/2008 Rautatieliikenteen simuloinnin merkitys ratakapasiteettihakemusten yhteensovittamisessa
- 3/2008 Rautateiden liikkuvan kaluston kunnon valvonta runkoverkolla
- 4/2008 Raakapuukuljetusten tulevaisuuden haasteet
- 5/2008 Perussolmuratapihojen merkitys ja näkymät osana kuljetusjärjestelmää
- 6/2008 Tasoristeysten kansirakenteet
- 7/2008 Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkyys
- 8/2008 Kolarin seudun kaivoshankkeet
- 9/2008 Rataverkon pohjavesialueiden riskienhallinnan kehittäminen
- 10/2008 Rautatieliikenteen pitkän aikavälin suunnitteluprosessin kehittäminen
- 11/2008 Rautatieliikenteen häiriöiden analysoinnin kehittäminen
- 12/2008 Junan pyörävikojen havainnointi raiteeseen asennetulla mittalaitteella
- 13/2008 A Collaborative Process of Product Lifecycle Management for Railway Signalling Infrastructure
- 14/2008 Rataverkon jatkosähköistyksen hankearvioinnin päivitys
- 15/2008 Rautatieliikenteen täsmällisyyden mittaaminen
- 16/2008 Ilmastonmuutokseen sopeutuminen radanpidossa, esiselvitys



**RATAHALLINTOKESKUS
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN**

Julkaisija:

Ratahallintokeskus

Kaivokatu 8, PL 185, 00101 Helsinki
puh. 020 751 5111, fax 020 751 5100
www.rhk.fi

ISSN 1455-2604

ISBN 978-952-445-263-2