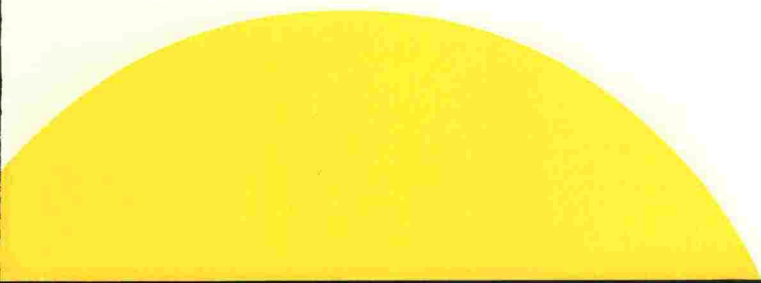
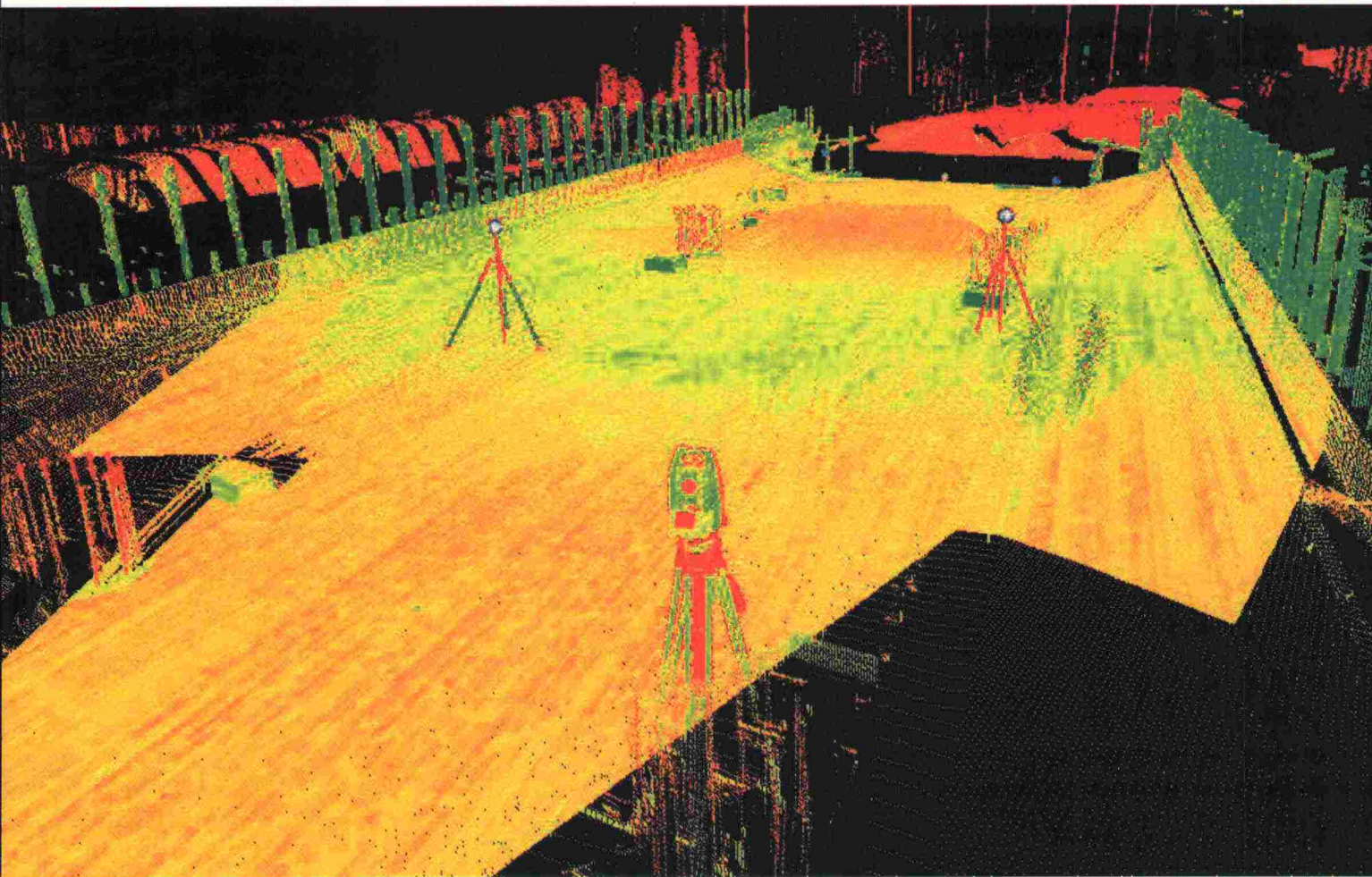


Rauno Heikkilä, Antti Karjalainen,
Pekka Pulkkinen, Esa Haapa-aho, Mauno Jokinen, Aarno Oinonen, Mika Jaakkola

Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönottaminen (Älykäs silta)

Tiehallinnon selvityksiä 12/2005



**Rauno Heikkilä, Antti Karjalainen,
Pekka Pulkkinen, Esa Haapa-aho, Mauno Jokinen, Aarno Oinonen, Mika Jaakkola**

Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönottoaminen (Älykäs silta)

Tiehallinnon selvityksiä 12/2005

Tiehallinto

Helsinki 2005

Kansikuva Vahur Joala

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-459-1
TIEH 3200924

Verkkojulkaisu pdf (www.tiehallinto.fi/julkaisut)
ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-460-5
TIEH 3200924-v

Edita Prima Oy
Helsinki 2005

Julkaisua myy/saatavana:
asiakaspalvelu.prima@edita.fi
Faksi 020 450 2470
Puhelin 020 450 011



Tiehallinto
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 2211

Rauno Heikkilä, Antti Karjalainen, Pekka Pulkkinen, Esa Haapa-aho, Mauno Jokinen, Aarno Oinonen, Mika Jaakkola: Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönotto. Helsinki 2005. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 12/2005. 64 s. ISSN 1459-1553, ISBN 951-803-459-1, TIEH 3200924.

Asiasanat: Sillat, sillansuunnittelu, mittausmenetelmät, tietotekniikka, rakentaminen
Aiheluokka: 35,43

TIIVISTELMÄ

Raportti dokumentoi vuosina 2001-2004 toteutetun Älykäs silta –projektin tuloksia. Projektin tavoitteena oli kehittää teräsbetonisiltojen 3D-suunnittelu- ja –mittausprosessia.

Silta-alalla geometrian hallinta luo perustan ja rungon siltojen suunnittelun ja rakentamisen onnistumiselle. Sillan kansi- ja päällysrakenteet on suunniteltava tarkasti tiegeometrian mukaisesti ja siihen liittyväksi yhdeksi osaksi. Siltaan tarvittavat alus-rakenteet riippuvat oleellisesti siltapaikan maastogeometriasta sekä maaperän ominaisuuksista. Dimensioiltaan silta on yleensä niin suuri, että rakennustyöt on välttämättä tehtävä pidemmällä aikavälillä vaiheittain jaksoteltuna. Tällöin yhden yhtenäisen ja tarkan toimintakoordinaatiston perustaminen, ylläpito ja siinä työskentely on ainoa mahdollisuus rakennustöiden läpivientiin. Geometriatiedon tarkka hallitseminen läpi kokonaistoimintaprosessin on sillan suunnittelun ja rakentamisen keskeisimpiä ellei kaikkein keskeisin avaintehtävä. Tiedonkulku tulee hallita varhaisista lähtötietojen mittauksista suunnitteluun, jossa lähtötiedoista jalostetaan mahdollisimman tarkasti optimaalinen tuotegeometria. Edelleen suunnittelun tuottamasta tiedosta on poimittava tai jalostettava työmaan eri mittauksiin tarvittavat ohjaustiedot, joihin verrataan mitattuja toteutumatietoja. Täten siltojen geometriahallinnan tehostamisen ja parantamisen kehittämispanokset kohdentuvat toimintaprosessin kehittämisen kaikkein merkittävimpään ja tärkeimpään ytimeen.

Siirtyminen uuteen 3D-toimintamalliin vaikuttaa projektin tulosten perusteella olevan erittäin perusteltavissa. Selviä teknisiä ja taloudellisia hyötyjä arvioitiin saavutettavan sekä sillansuunnittelussa että työmaalla suoritettavissa mittauksissa. Projektissa kehitettiin sillansuunnitteluun uusia pursotustyyppisiä mallinnustyökaluja teräsbetonisiltojen tyypillisten eri rakenneosien mallintamiseen. 3D-geometriamallia voidaan edelleen kehittää ja täydentää yhä enemmän tuotemallityyppiseksi geometriatiedon lisäksi myös muuta tietoa sisältäväksi malliksi.

Oleellista on myös suora tiedonsiirtoyhteys siltasuunnittelusta työmaan mittaus-suunnitteluun ja mittauksiin. Sillan 3D-mallista voidaan poimia paikalleenmittauksiin ja laaduntarkastusmittauksiin kulloinkin tarvittavaa geometriatietoa ilman erillistä koordinaattien laskentaa. CAD-mallista voidaan myös ohjata takymetrin mittaustoimintoja esimerkiksi pisteen paikalleenmittauksessa. Geometriseen malliin voidaan liittää tunnistetietoa myös mittauksia varten. Pistepilviä mittaavat laserkeilaimet vaikuttavat kokeiden perusteella soveltuvan muottien ja siltojen tarkastusmittauksiin erinomaisesti. Kehitetyillä uusilla työkaluilla sekä eräiden laserkeilainten analysointiohjelmilla voidaan jo suoraan ja havainnollisesti tarkastella muoteissa ja valmiissa silloissa olevia sijainti-, mitta- ja muotopoitteamia kolmiulotteisesti.

SUMMARY

The report documents the results of the "Intelligent bridge" project carried out 2001-2004. The aim was to develop the 3-D design and measurement process of concrete bridges.

In bridge engineering the management of geometry creates a basement and frame for successful execution of bridge design and construction. Superstructures of bridge must be accurately designed according to road geometry. The substructures needed for a bridge depend essentially on the terrain geometry of bridge site as well as ground features. The dimensions of bridges are often so large that construction works must inevitably be operated phased during a long time schedule. Therefore the creation and maintenance of a common and accurate coordinate system is an unique prerequisite to carry out different construction activities. The management of geometric information throughout the total process is one of the most essential key tasks in the domain of bridge engineering. It is important to control information flows from early initial measurements to design phase deriving the optimal geometry for the bridge. Again, different site control models must be derived from the design models enabling also the comparisons between as built measurements and control models. Hence, the R&D efforts on to the improvement of the geometric management will be directed to one of the most important core of the total process in bridge engineering.

The transition to this new 3-D process seems to be well-founded on account of the results of the project. Different technological and economic benefits were evaluated to be attained both in bridge design as well as in site measurements. New extrusion based design methods were developed for modeling the different parts of concrete bridges. In future, it is also possible to complete 3-D geometry model with non-geometry information.

The direct data transfer connection from bridge design to site measurement planning and operation is also very essential. It is possible to pick up different needed data from 3-D bridge model without separate coordinate calculation. Also it's possible to control a robotized total station using CAD model. The needed identification data can be connected to bridge model. Laser scanners enabling the measurements of 3-D point clouds seem to be very applicable to the control measurements of moulds and complete bridges. Using the developed new tools or alternatively the analyzing software of some laser scanning systems, the deviations in location, dimension and shape can be three-dimensionally examined.

ESIPUHE

Älykäs silta -projekti käynnistettiin selvittämään mahdollisuuksia käyttää nykyaikaista tietotekniikkaa sillan suunnittelun ja rakentamisen apuna. Nykyisiä ongelmia, joita uusilla menetelmillä voitaisiin helpottaa, ovat mm. mittaustietojen syöttö käsin suunnittelun ja rakentamisen eri vaiheissa, mallien rakentaminen moneen kertaan eri toimenpiteitä varten, "älyn" katoaminen malleista suunnittelun kuluessa ja tarkemittaustietojen työläs tekeminen ja tulosten havainnollistaminen.

Projektiryhmään koottiin tilaajien, suunnittelijoiden, laitevalmistajien, ohjelmistokehittäjien ja toteutuksen edustajat. Rahoitusta saatiin projektiryhmän lisäksi TEKES:lta. Projektin vastuullisena johtajana toimi sillansuunnittelu-päällikkö, DI Pekka Pulkkinen WSP SuunnitteluKORTES Oy:stä ja projekti-päällikkönä TkT Rauno Heikkilä Oulun yliopiston Rakentamisteknologian tutkimusryhmästä.

Projektin tueksi perustettiin johtoryhmä, jolle projektin etenemistä tiedotettiin jatkuvasti ja joka kokoontui projektin aikana säännöllisin väliajoin. Johtoryhmän puheenjohtajana toimi Tiehallinnon siltateknisestä tuesta Matti Piispanen, sihteerinä Rauno Heikkilä sekä muina aktiivisina jäseninä Timo Tirkkonen Tiehallinnosta, Pekka Pulkkinen ja Antti Karjalainen WSP SuunnitteluKORTES Oy:stä, Esa Haapa-aho Terrasolid Oy:stä, Mauno Jokinen Caema Oy:stä, Aarno Oinonen Tieliikelaitokselta, Harri Yli-Villamo Ratahallintokeskuksesta, Timo Rantakokko Rantakokko & Co Oy:stä ja Thomas Grönholm Tekla Oy:stä.

Projektiryhmässä sillansuunnittelun asiantuntijana oli WSP SuunnitteluKORTES Oy apunaan Rantakokko & Co. Käytännön työstä vastasi pääosin Antti Karjalainen. Tiedonsiirtoa, mallintamista ja mittauksen työkaluja kehittivät pääasiassa Terrasolid Oy ja Caema Oy. Pilottikohteita ja työmaateknistä asiantuntemusta saatiin Tieliikelaitokselta, Skanska Tekra Oy:ltä, Oulun kaupungilta sekä Ratahallintokeskuksen kautta myös ratasilloista. Projektia veti TkT Rauno Heikkilä Oulun yliopistosta. Hän kokosi ja pääosin myös kirjoitti raportit ja oli muutenkin projektin väsymätön innostaja ja eteenpäin työntäjä.

Projektin tulokset dokumentoitiin väliraporttiin ja tähän loppuraporttiin. Väliraportti dokumentoi projektin alkuvaiheen (2001-2003) tuloksia, pääasiassa työkalujen kehittelyä sekä suunnittelu- ja mallinnuskokeiden tuloksia. Tässä loppuraportissa on dokumentoitu pilottisilloista saadut tulokset ja yhteenveto projektista, sen tavoitteista, tuloksista ja jatkotoimenpide-ehdotuksista.

Haluan projektin johtoryhmän puheenjohtajana lausua lämpimät kiitokset onnistuneesta lopputuloksesta kaikille projektissa mukana olleille.

Helsinki, helmikuu 2005

Matti Piispanen
Tiehallinto

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
ESIPUHE
SANASTO

1	JOHDANTO	9
1.1	Siltojen geometriahallinnan haasteet	9
1.2	3D-suunnittelumenetelmät ja -tekniikat	10
1.3	3D-mittausmenetelmät ja -tekniikat	13
	1.3.1 Takymetrit	13
	1.3.2 Laserkeilaimet	16
1.4	Projektille asetetut tavoitteet	20
2	SILTOJEN 3D-TOIMINTAPROSESSIN KEHITTÄMINEN	22
2.1	Tienrakentamisen informaatio- ja automaatiotekniikkaa hyödyntävä kokonaistoimintaprosessi	22
2.2	Malli siltojen tulevaisuuden 3D-toimintaprosessista	23
2.3	Mallia testaava 3D-suunnittelu- ja -mittausjärjestelmä	27
2.4	Kokeiden suoritus	30
	2.4.1 Lähtötietojen sisäänluku	30
	2.4.2 Sillan yleissuunnittelu	30
	2.4.3 Sillan rakennesuunnittelu	31
	2.4.4 Paikalleenmittaukset	32
	2.4.5 Muotin tarkastusmittaukset	32
	2.4.6 Valmiin sillan tarkastusmittaukset	35
3	TULOKSET	42
3.1	Lähtötietojen sisäänluku	42
3.2	Sillan yleissuunnittelu	43
3.3	Sillan rakennesuunnittelu	46
3.4	Paikalleenmittaukset	47
3.5	Muotin tarkastusmittaukset	50
3.6	Sillan tarkastusmittaukset	52
4	PÄÄTELMIÄ	56
4.1	Kehitetyn suunnittelu- ja mittausjärjestelmän arviointi	56
4.2	3D-toimintaprosessin käyttökelpoisuus silta-alalla	57
4.3	Jatkotoimenpide-ehdotukset	59
	LÄHDELUETTELO	61

SANASTO

Affiininen muunnos	Yhdensuuntaissiirtymä, translaation perustuva koordinaatistomuunnos
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	Computer Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
CAC	Computer Aided Control, tietokoneavusteinen tarkastus tai ohjaus
Fotogrammetria	Valokuvaukseen perustuva mittaus
NC	Numeric Control, numeerinen ohjaus
Orientointi	Mittalaitteen toimintakoordinaatiston määrittäminen mittaamalla tunnettuja pisteitä ja suorittamalla orientointiin tarvittava koordinaatistomuunnos
Parasolidinen ydin	Useiden CAD-ohjelmien (mm. Unigraphics, SolidWorks, IronCAD, SolidEdge, MicroStation) soveltama kolmiulotteisen tilavuusmallinnuksen perusohjelmisto, mahdollistaa ja helpottaa monimutkaisen geometrian mallintamista
Prisma	Takymetrin kohdistusapuväline, mahdollistaa pisteen tarkan tähtäyksen ja liikkeen seurannan
RGB	Red Green Blue, laserkeilaimissa käytettävä perusvärikoodi
SOLID	Tilavuusmalli, tilavuuskappale, jähmö (Kielitoimiston suositus)
Stereolitografia	Kolmiulotteinen valmistustekniikka, jossa valokovetuvaa hartsia kovetetaan altaassa kerros kerrokselta käyttäen tarkoitukseen sopivaa laseria
WLAN	Wireless Local Area Network, langaton tietoverkko

1 JOHDANTO

1.1 Siltojen geometrianhallinnan haasteet

Siltojen suunnittelu ja rakentaminen on yksi keskeinen osa tieväylien suunnittelua ja rakentamista. Siltojen toimintaprosessissa tietojen siirtämisessä ja jalostamisessa osavaiheesta toiseen esiintyy edelleen erilaisia ongelmia, tietokatkoksia, ja päällekkäistä työtä. Sillansuunnittelun lähtötiedoista tärkeimpiä ovat siltapaikan tiegeometriatiedot, maaston pintamuodot ja maaperän geotekniset tiedot. Kolmiulotteisen geometriatiedon kokonaisvaltainen hallinta on onnistuneen sillan suunnittelun ja rakentamisen perusedellytys.

Tarkkojen ja mahdollisimman kattavien geometrialähtötietojen saanti siltapaikalta ja tiesuunnitelmasta luo ensimmäisen tärkeän perustan sillan suunnittelun ja rakentamisen toteutukselle. Ennuste suunnittelun ja rakentamisen onnistumiselle on sitä parempi, mitä paremmat lähtötiedot ovat käytettävissä. Lähtötietojen luku aidosti kolmiulotteisesti toimivaan suunnitteluohjelmaan mahdollistaa sillansuunnittelijalle perinteisiin toimintatapoihin nähden vastaavasti oleellisesti tehokkaammat ja virheettömämmät onnistumismahdollisuudet suunnittelussa.

Suunnitelmapmallin välitön käyttömahdollisuus rakentamista ohjaavissa ja tarkistavissa mittauksissa tehostaa rakennustyötä ja vähentää virheitä sekä mahdollistaa rakennustyön tarkan ohjauksen työmaan eri toteutusvaiheissa. Siten se yhdistää suunnittelua aikaisempaa enemmän työmaan toimintaan. Valmiin sillan geometrian kokonaisvaltainen lopputarkastus sisältyy yhdeksi keskeiseksi osaksi hallitun suunnittelu- ja rakentamisprosessin läpivientiin. Tarkkaan ja kokonaisvaltaisesti mitattu geometrinen toteutuma luo myös perinteisiä tapoja oleellisesti paremmat mahdollisuudet sillan elinkaaren aikaiseen geometrian seurantaan ja valvontaan.

Suurten siltojen mittakaavassa geometrianhallinnan tarpeet korostuvat. Wistbackan (2003) mukaan suuret sillat rakennetaan usein ulokeasennusmenetelmällä, jolloin geometrian hallinta on oleellisesti monimutkaisempaa aputukien käyttöön verrattuna. Asennuksen tavoitteena on mahdollisimman tasainen pystykuormien jakauma ja sillan jouheva geometria. Rasiusten tulee pysyä sallituissa rajoissa myös kaikkien eri asennusvaiheiden aikana. Asennettavien lohkojen on kohdattava toisensa riittävän pienellä pysty- ja vaakasuuntaisella poikkeamalla. Tyypillisesti jokaisessa työvaiheessa mitataan geometriset poikkeamat ja verrataan niitä työvaihekohtaiseen geometriseen malliin. Toleranssien ylitystapauksissa työt on keskeytettävä, kunnes poikkeamien syyt on saatu selville. Jokaisesta asennusvaiheesta tarvitaan tyypillisesti oma geometrinen malli. Esimerkiksi Kärkistensalmen vinoköysisillassa (pituus 787,5 m, pääjänne 240 m, suurin pyloni 96 m, köysipareja 30 kpl) erilaisia käytettyjä geometriamalleja oli yhteensä 165 kpl.

Viime vuosina automatiikan soveltaminen maarakentamisen työkoneiden ohjaukseen on kehittynyt voimakkaasti. Markkinoilla on tarjolla useimpiin eri tyyppiin työkoneisiin automaattisia 3D-ohjausjärjestelmiä. Järjestelmien ominaisuudet vaihtelevat tuotekohtaisesti. Kehittyneimmät ohjausjärjestel-

mät toimivat malliohjausperiaatteella, jossa automaattinen ohjaus perustuu suunnittelijan luomaan 3D-tuotemalliin sekä tästä edelleen jalostettuun 3D-koneohjausmalliin. Myös siltatyömaalla tyypillisesti käytettäviin työkoneisiin on jo saatavilla vaihtoehtoisia 3D-ohjausjärjestelmiä. Esimerkkeinä ovat kaivukone, tiehöylä ja lyöntipaalutuskone.



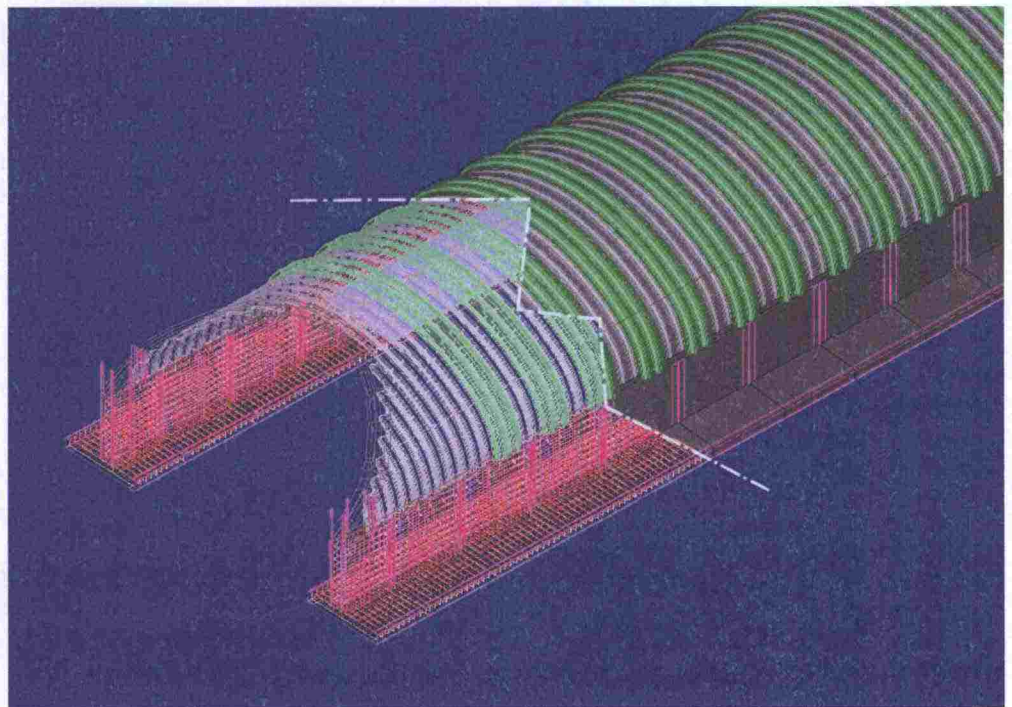
Kuva 1. Esimerkkejä automatiikan soveltamisesta työkoneiden ohjaukseen: kaivukoneen ja pontiniskijän 3D-ohjausjärjestelmät (Axiomatic Technologies Oy, Tampere).

1.2 3D-suunnittelumenetelmät ja -tekniikat

Kolmiulotteisessa suunnittelussa geometriatiedot pyritään hallitsemaan samanaikaisesti spatiaalisesti eli kolmessa eri suunnassa. Kolmiulotteisuus mahdollistaa kokonaisvaltaisen geometrian hallinnan suunnittelussa. Myös lähtötiedot on saatava kolmiulotteisesti. Suunnittelu luo kolmiulotteisen tuotemallin rakenteesta. Geometrisesti tarkasteltuna rakenne kuvataan vaihtoehtoisesti kolmiulotteisia pisteitä, käyriä, pintoja tai tilavuusmalleja käyttäen. Kehittynein mallinnus käyttää tilavuusmalleja, joihin on myös liitettävissä muuta esimerkiksi materiaaliominaisuustietoa. Rakennusvaiheen mittauksissa hyödynnetään tyypillisesti piste-, käyrä- ja pintamalleja mutta myös tilavuusmallien käyttö on mahdollista.

3D-mallinnuksessa luodaan CAD-ohjelmaa käyttäen kappaleen geometriaa kuvaava malli. Piste kolmiulotteisen sijainnin määrittävillä x -, y - ja z -koordinaateillaan on yksinkertainen aito 3D-malli. Yleisesti käytettävissä olevat vaihtoehtoiset mallintamistavat ovat pistemalli (point model), viivamalli (wireframe model), pintamalli (surface model) ja tilavuusmalli (solid model).

Kun pintamalli sävytetään, siitä voidaan helposti ja havainnollisesti tulkita kappaleen geometriaa. Helppous mallin luomisessa ja muuntelussa on tärkeää. Kehittyneimmässä CAD-ohjelmassa käyttöliittymän ominaisuudet ovat kehittyneet jatkuvasti yhä helppokäyttöisemmiksi, havainnollisemmiksi ja tehokkaimmiksi. Kehityksen myötä kolmiulotteinen mallinnus on parhaillaan myös rakennusalalla syrjäyttämässä kaksiulotteisia suunnittelu- ja työskentelymenetelmiä. Suunnittelutehokkuuden ja suunnitelmien laadun parantumisen lisäksi kolmiulotteista mallinnusta kannattaa käyttää erityisesti silloin, kun lujuuslaskentaan käytetään elementtimenetelmiä, valmistuksessa käytetään NC-työstökoneita, valmistetaan prototyyppejä stereolitografisin menetelmin tai halutaan tehdä esimerkiksi törmäystarkasteluja eri osien välillä. (MicroStation 3D-kurssimoniste, Terrasolid Oy).



Kuva 2. Esimerkki 3D-mallintamisesta (Joutsentien alikäytävä, Oulu): Tekla Structures-ohjelmalla mallinnettu silta. 3D-mallinnuksessa rakennusrunko mallinnetaan aluksi rakennesoitain. Malli täydennetään ja osat liitetään toisiinsa parametrisilla työkaluilla. Mallinnetusta rakenteesta tuotetaan tarvittavat piirustukset.

Kolmiulotteisen CAD-työskentelyn mahdollistaa erilaisten näkymäikkunoiden hyväksikäyttö. MicroStation-ohjelmassa voidaan samanaikaisesti käyttää kahdeksaa näkymää. Tekla Oyj:n Structures-mallinnusohjelmassa voi olla aktiivisena kerrallaan yhdeksän näkymää. Kuhunkin näkymäikkunaan voidaan valita näkymä työstettävään malliin halutusta suunnasta (esimerkiksi ylä, ala, etu, taka, vasen, oikea, isometrinen). Lisäksi voidaan määrittellä näkymän syvyyttä, näkymän aktiivisuutta sekä mallin esitystapaa (rautalanka, verkko, piiloviiva, täytetty piiloviiva, vakiovarjostus, tasoitettu varjostus, phong-varjostus, säteenheittovarjostus).

Mielivaltaisen kappaleen kolmiulotteinen mallinnus voidaan MicroStation-ohjelmassa suorittaa erilaisia 3D-peruskappaleita (kuutio, pallo, sylinteri, kartio, torus, kiila) luomalla tai parametrisia tilavuusmalleja pursottamalla. Näitä

monimutkaisempaa geometriaa voidaan luoda useita peruskappaleita tai parametrisia malleja yhdistämällä sekä edelleen muokkaamalla. Tilavuusmalleja voidaan muokata esimerkiksi pyöristämällä, viistämällä sekä leikkaamalla valitulla profiililla. Vielä pidemmälle kehittyneessä ns. parametrisessa mallintamisessa malleja voidaan muokata parametriarvoja muuttamalla.

Visualisoinnissa 3D-mallista luodaan 2D-kuva aivan kuin valokuvauksessa. Kuva riippuu valaistuksesta ja perpektiivistä. Visualisoinnilla saadaan kappaleesta eri tasoisia sävytettyjä kuvia, joiden avulla 3D-mallia voidaan tarkastella lähes luonnollisen näköisenä. Perspektiivisiä kuvantoja käyttäen kuva saadaan vielä enemmän luonnonmukaiseksi. Pintojen luonnonmukaisuutta voidaan lisätä materiaalmäärittäyksillä. 2D-kuvan taustalle voi myös liittää esimerkiksi rakennuspaikalta otetun digitaalisen valokuvan. MicroStation-ohjelmassa on monipuolisia erilaisia visualisointiominaisuuksia: valonlähteet (rajaton määrä erilaisia valonlähteitä), varjot (valonlähteet luovat varjoja), etäisyysvarjostus (näkyminen määritellään etäisyydestä riippuva häivytyksen tai sumu), kamera (kuvaan saadaan perspektiivi ja katselukulma), tekstuuri (pintaan voidaan kiinnittää skannattu rasterikuva esimerkiksi tiiliseinän kuva), kokokuviointi (pintaan voidaan kiinnittää rasterikuva, joka määrittää pinnalle tietyn kohokuviointin esimerkiksi tiiliseinän saumaurat), läpinäkyvyys (pinnoista näkee läpi), sahareunojen poisto (vähentää kaltevien väripintojen sahalaitaisuutta) ja kamera-ajo (voidaan määrittää kameralle liikerata ja luoda animaatio).

Tietokoneavusteiset suunnittelumenetelmät tulivat sillansuunnitteluun Suomessa 1980-luvun lopussa. Aluksi suunnittelutyö tehtiin ensimmäisillä CAD-ohjelmilla perinteisen käsinpiirtämisen tavoin piirtämistyyppisesti ja kaksiulotteisesti. Vielä nykyisinkin teräsbetonisiltöjen eri osarakenteiden suunnittelu tehdään yleisesti 2D-työmenetelmin etupäässä AutoCAD-ohjelmistolla, jolloin itse suunnittelussa ei luoda kolmiulotteista suunnitelmamallia.

Kolmiulotteinen sillansuunnittelu alkoi käytännössä yleistyä vasta 1990-luvun lopussa, jolloin uudenlaiseen tuotemallinnukseen perustuvat CAD-ohjelmat tulivat markkinoille. Aluksi 3D-CAD-sovelluksia käytettiin etupäässä visualisointiin. 1990-luvun lopussa myös sillan rakennussuunnittelu aloitettiin 3D-sovelluksilla etenkin teräsrakenteissa. Yksi kehittyneimmistä on Tekla Oyj:n kehittämä tietokantapohjainen XSteel-suunnitteluohjelma, joka on täysin kolmiulotteinen mallinnusohjelma. Ohjelman käyttö teräsiltojen suunnittelussa on yleistynyt 2000-luvulla. Mallinnetuista rakenneosista voidaan tuottaa suoraan numeeriset, konepajatyöstössä suoraan hyödynnettävissä olevat, ohjaustiedostot. Teräsiltojen CAD-suunnittelu onkin kehittynyt muiden siltatyyppien suunnittelumenetelmiin nähden oleellisesti pidemmälle. Kolmiulotteinen mallintaminen on teräsiltojen suunnittelussa osoittautunut perinteisiin suunnittelumenetelmiin nähden oleellisesti tehokkaammaksi, tarkemmaksi ja virheettömämmäksi. Erittäin oleellista on myös valmiin lähtötiedon tuottaminen automaattisesti ohjattaviin työstökoneisiin. Tämä tehostaa ja vähentää virheitä edelleen konepajatuotannossa.



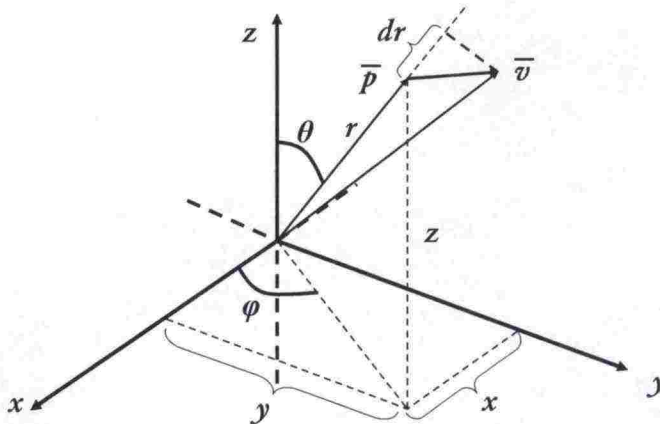
Kuva 3. Terässillan 3D-suunnitelmamalli sovitettuna siltapaikalta otettuun valokuvaan (Chenab Bridge, Intia, WSP SuunnitteluKORTES Oy).

Kolmiulotteinen mallintaminen on ollut tähän saakka hyvin vähäistä teräsbetonirakenteissa sekä silta- että talorakenteissa. Talorakenteiden suunnittelussa 3D-sovellusten käyttö on nopeasti yleistymässä. Teräsbetonisiltojen suunnittelussa käyttö on vielä toistaiseksi ollut vähäisempää.

1.3 3D-mittausmenetelmät ja -tekniikat

1.3.1 Takymetrit

Takymetri on kahden kiertokulman ja yhden etäisyyden samanaikaiseen mittaukseen perustuva yksittäisen pisteen mittaustekniikka. Etäisyyden mittaus voidaan tehdä prismaan, heijastavaan tähysmerkkiin tai tietyn edellytyksin kohteiden luonnollisiin pintoihin. Robottitakymetreissä on myös prisman tai heijastintarran automaattiset haku- ja tähtäystoiminnot. Takymetrin tyypillinen mittausnopeus on muutamia sekunteja pistettä kohden.



Kuva 4. Takymetrin mittausperiaate. Mittalaitteen origo sijaitsee rungon kahden kiertyvän osan keskipisteessä, jossa on myös etäisyysmittauksen nollapiste. Pisteestä p karteesiset x -, y - ja z -koordinaatit voidaan laskea geometrian perusteella etäisyydestä ja pyörähdyskulmista r , θ and φ . Koneohjaukseen tarkoitetut takymetrit pystyvät myös seuraamaan nopeudella v liikkuvaa prismaa. Eri mittaustilanteissa kulloinkin saavutettavaa mittaustarkkuutta käytetään arvioimaan ns. stokastisilla malleilla. Myös maalaserkeilaimet toimivat periaatteellisesti samalla tavalla.

Karteesisten x -, y - ja z -koordinaattien peruslaskukaavat ovat kuvan geometrian perusteella

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \sin \varphi \\ z = r \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$



Kuvat 5-6. Trimblen robottitakymetri. Näppäimistö voidaan käynnistysrutiinin jälkeen irrottaa mittalaitteesta ja siirtää mittausten ajaksi prismaatankoon. Tietoliikenne toimii radioyhteydellä.

Työmaan mittaukset aloitetaan kiinnittämällä takymetri työmaan koordinaatistoon. Tämä suoritetaan mittaamalla vähintään kaksi pistettä, joilla on tunnetut koordinaatit työmaan koordinaatistossa. Koordinaatistomuunnos tehdään vaihtoehtoisesti tunnetun pisteen tai vapaa kojeasema –menettelyllä. Tunnetun pisteen menetelmässä takymetrin kojeasema perustetaan tarkasti tunnetun pisteen päälle, jolloin pistettä ei tarvitse enää mitata. Vapaan kojeaseman menettelyssä takymetri voidaan sijoittaa mielivaltaisesti kulloinkin parhaaksi katsottuun paikkaan. Tällöin esimerkiksi mahdollisimman hyvien näkymien saanti mittausalueelle paranee. Toisena mittausteknisenä etuna on ns. ylimääritysperiaatteen sisältyminen vapaan kojeaseman menettelyyn. Ylimääritysperiaatetta noudattavassa mittauksessa havaintoja tehdään hie- man enemmän kuin mittaustuloksen saamiseksi olisi välttämättä tarpeen. Tällöin havaintojen ristiriitaisuuksista voidaan johtaa tuloksen tarkkuutta kuvaavia suureita. Ylimääritysperiaatteella mitattaessa voidaan tarkistaa koordinaatistomuunnoksen tarkkuuden riittävyys, joka tunnetun pisteen menettelyllä ei tyypillisesti ole mahdollista.

Rakennustyömaalla takymetrillä päästään periaatteessa millimetriluokan mit- taustarkkuuksiin mittausetäisyyden ollessa tyypillisesti alle 1 km. Runkopis- teissä olevat virheet, ilmastotekijät ja muut tekijät huonontavat mittaustark- kuutta siten, että käytännössä saavutetaan tyypillisesti noin ± 1 cm mittaustarkkuus (satunnainen mittausero). Dynaamisissa mittauksissa mittaustarkkuus riippuu merkittävästi prisman dynamiikasta ja mittausetäisyydestä.



Kuva 7. Leican 1200-sarjan robottitakymetri mittausvalmiina.

Takymetrin yksi tärkeä mittaustehtävä on rakennustyötä varten tarvittavien pisteiden paikalleenmittaus. Tämä voidaan tehdä joko prismaa käyttäen tai vähemmän tarkoissa tehtävissä punaisella laserosoittimella. Mittausten läh- tötiedot voidaan tallentaa etukäteen takymetrin tietokoneelle. Mittaustulokset

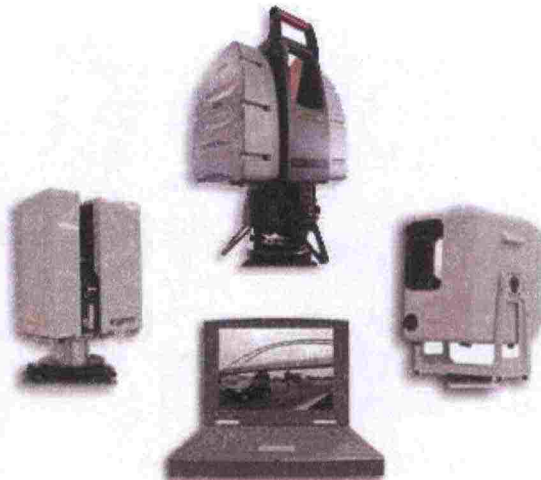
voidaan myös tallentaa ja siirtää tiedonsiirtokaapelilla edelleen muihin tietokoneisiin ja tietojärjestelmiin. Robottitakymetria pystyy itsenäisesti käyttämään yksi mittausteknikko, kun perinteisissä takymetreissä mittausten suorittamiseen tarvittiin aina kaksi henkilöä. Kolme tämän hetken merkittävää takymetrivalmistajaa maailmassa ovat Leica, Topcon ja Trimble.

Tiedonsiirto tietokoneelta takymetriin suoritetaan ASCII-muotoisella laitekohtaisella formaatilla tiedonsiirtokaapelia tai radiomodeemia käyttäen. Tämä voidaan suorittaa joko perinteisesti etukäteen koottuja mittaustiedostoja siirtämällä tai reaaliaikaisesti. Myös langattomat tiedonsiirtotekniikat kuten GPRS-tiedonsiirto ovat tulossa takymetreihin.

1.3.2 Laserkeilaimet

Laserkeilausta voidaan nykyisin tehdä ilmasta ja maasta. Ilmalaserkeilausta käytetään maa- ja tiealueiden pintageometriaa koskevien lähtötietojen hankintaan. Maalaserkeilainten merkittävimpana sovellusalueena ovat tähän saakka olleet laitosmittaukset. Jäljempänä tarkastellaan erilaisia maalaserkeilaimia sekä niiden ominaisuuksia lähinnä siltatyömaiden mittauksia silmäläpitiäen.

Kun takymetri on yhden pisteen mittaustekniikka, laserkeilainta voidaan puolestaan luonnehtia pistepilvien mittaustekniikaksi. Yksittäistä pistettä ei laserkeilaimella pysty tarkasti mittaamaan tai osoittamaan. Sen sijaan laserkeilain soveltuu erinomaisesti erilaisten pintojen mittauksiin, joissa mittauspisteiden määrä nousee suureksi jopa useisiin miljooniin pisteisiin mittauskohdetta kohden. Markkinoilla olevien laserkeilainten mittaustaajuus vaihtelee laitekohtaisesti 1-500 kHz. Siten esimerkiksi yhteensä 1000 000 pisteen varsinainen laserkeilaus kestää Leican yleisesti käytössä olevalla HDS-2500-laserkeilaimella (aikaisemmin Cyrax) 1000 s eli noin 16 minuuttia. Käytännön mittaustoiminnassa erilaiset valmistelutyöt pienentävät mittaustehokkuutta.



Kuva 8. Leican maalaserkeilainten HDS-tuoteperhe: vasemmalla HDS-4500, keskellä yllä HDS-3000 ja oikealla HDS-2500. Mittaustuloksia analysoidaan ja mallinnetaan Cyclone™-ohjelmistolla. Leica Cyclone™ CloudWorx –

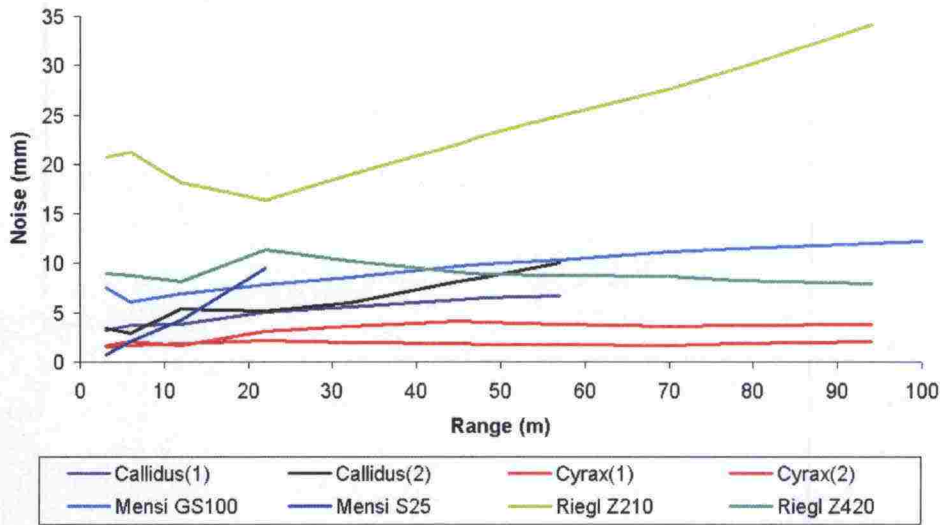
moduulilla suunnitelmamalliin vertailua voidaan tehdä myös AutoCAD- ja Microstation- ohjelmissa.

Taulukko 1. Laserkeilainten joidenkin mittausominaisuuksien vertailua tuotemerkeittäin (GIM 2004). Taulukko on sisällöltään epätäydellinen.

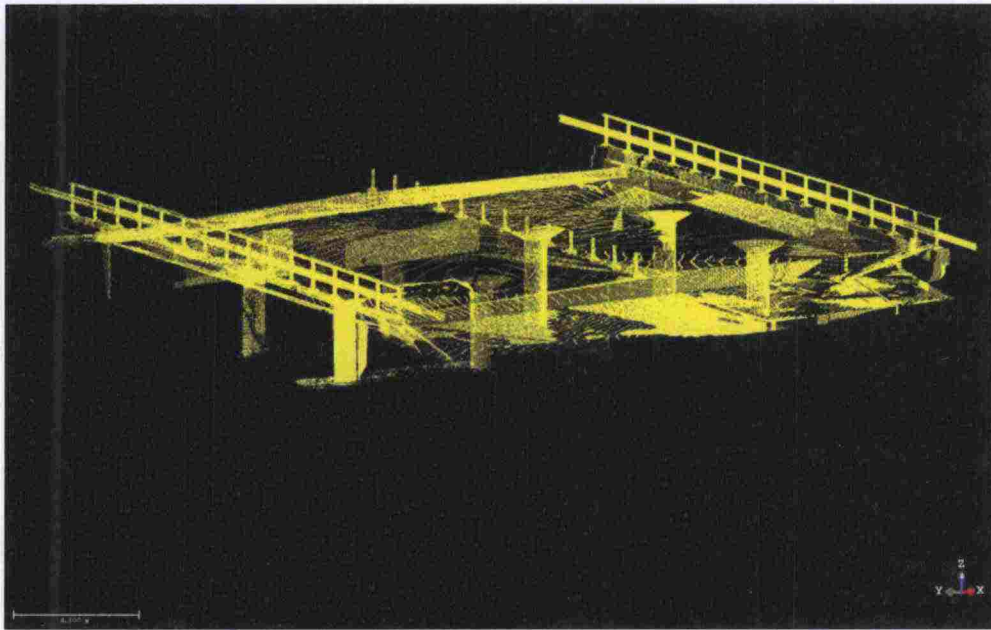
	Callidus	Leica	Leica	RIEGL
<i>ominaisuus</i>	CP 3200	HDS-3000	HDS-4500	LMS-Z210i
min./max. Range [m]	1/80	1/100	0.38/25.2	4/400
range accuracy at 50 m [1sigma]	5 (1 to 30 m)	4	5.5 at 25 m	25
scan angle accuracy (1 sigma) H/V	0.005°	0.0034°	0.02°/0.02°	0.0025°
beam divergence/spot ΔE at 50 m	4.4 mrad/232 mm	6 mm	8.5 mm at 25 m	3 mrad/150 mm
measurement rate [kHz]	28	1.8	500	up to 12
temperature range [°C]	-10...40	0-40	0-40	-10...50
scan time per battery [hrs]	5	6	6	12
import formats	SAT	PTS, ASCII X	PTS, ASCII X	ASCII, PL, PLY
export formats of processed data	DXF, SAT	DXF, ASCII XYZ	DXF, ASCII XYZ	ASCII, DXF
	RIEGL	Trimble	Zoller&Fröhlich	Zoller&Fröhlich
<i>ominaisuus</i>	LMS-Z420i	GS200	Imager 5003	Profiler 6000
min./max. Range [m]	2/800	1/350	1/53.5	1/53.5
range accuracy at 50 m [1sigma]	10	3 (99 %, 4 shoots)	≤ 6.5 at 25 m	≤ 8.0 at 13 m
scan angle accuracy (1 sigma) H/V	0.0025°	0.0028°/0.008°	0.02°/0.02°	0.02°/-
beam divergence/spot ΔE at 50 m	0.25 mrad/16 mm	depends on focus	0.22 mrad/14	
measurement rate [kHz]	up to 12	up to 5	500	500
temperature range [°C]	0...40	0...40	0...40	0...40
scan time per battery [hrs]	9	3	2.5...6	2.5...6
import formats	ASCII, PL, PLY	DXF, DGW, DGN	DXF, DGW, DGN	DXF, DGW, DGN
export formats of processed data	ASCII, DXF	DXF, DGW, DGN, TIFF, EXCEL	ASCII, Terrasolid	ASCII, Terrasolid

Laserkeilan halkaisija 50 m mittausetäisyydellä on tyypillisesti noin 6-16 mm laitemerkistä riippuen. Suurin mahdollinen mittausetäisyys vaihtelee samoin tyypillisesti muutamasta kymmenestä metrillä sataan metriin. Yksittäisen laserpisteen mittaustarkkuus vaihtelee $\pm 4... \pm 7$ mm välillä. Käytännön mitauksissa kulloinkin saavutettavaan tarkkuuteen vaikuttavat säätökijöiden lisäksi merkittävästi myös mm. kohdemateriaalin väri ja pinnan laatu sekä lasersäteen osumiskulma pinnan normaaliin nähden. Laserkeilainten tarkkuuden hallitsemiseksi tarvitaan vielä lisätutkimuksia. GIM International -lehti on joulukuun 2004 numerossaan (s. 44-47) julkaissut kattavan koostuksen eri laitemerkkien ominaisuuksista.

Laserkeilauksessa tarvitaan tyypillisesti useita keilauksia ja kojeasemia, jotta kohteen pinnat saadaan mitattua joka puolelta. Jokainen keilaus tuottaa oman pistepilvensä. Erilliset pistepilvet voidaan yhdistää toisiinsa keilausjärjestelmään kuuluvalla ohjelmistolla. Yhdistämiseen (ns. rekisteröinti) voidaan käyttää pisteitä tai pintoja. Pisteitä käytettäessä kohteen ympärille sijoitetaan tyypillisesti erilaisia tähysmerkkejä, jotka näkyvät mahdollisimman moneen kojeasemaan. Tähysmerkkien sijainnit voidaan mitata halutussa koordinaatistojärjestelmässä esimerkiksi takymetrillä. Välttämättä näin ei kuitenkaan tarvitse menetellä.



Kuva 9. Maalaserkeilainten mittaustarkkuuden vertailututkimus – satunnainen mittausvirhe mittaussäteen suunnassa, mittauskohdeena harmaa pinta (Bohler, W., University of Applied Sciences, Germany, 2003).

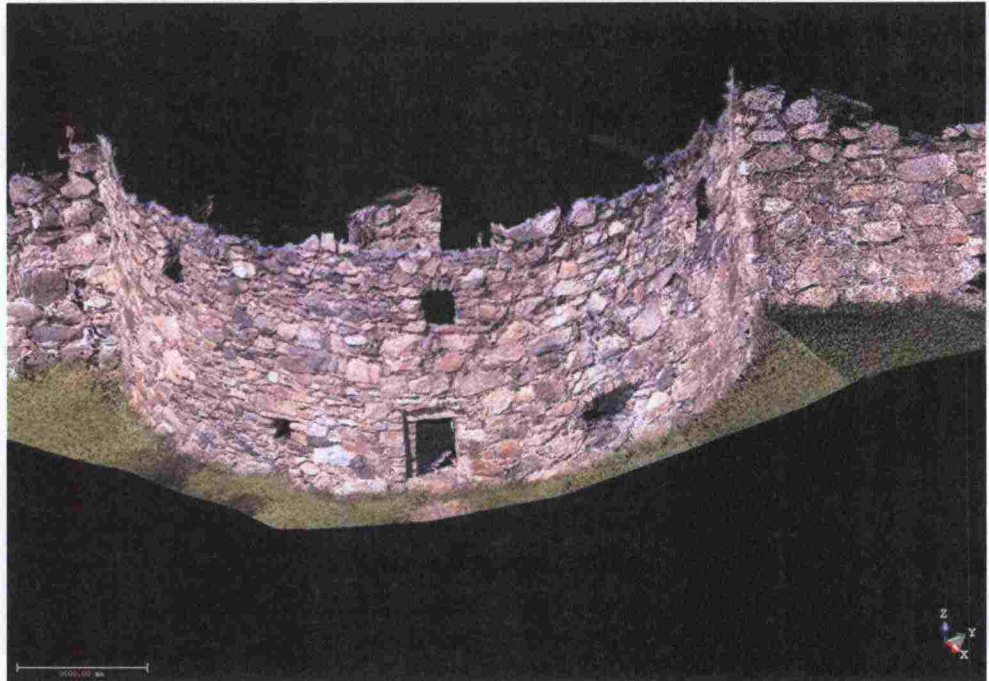


Kuva 10. Teräsbetonisillasta (S44, Oulu) Cyrax-laserkeilaimella (HDS-2500) mitattu laserpistepilvi.

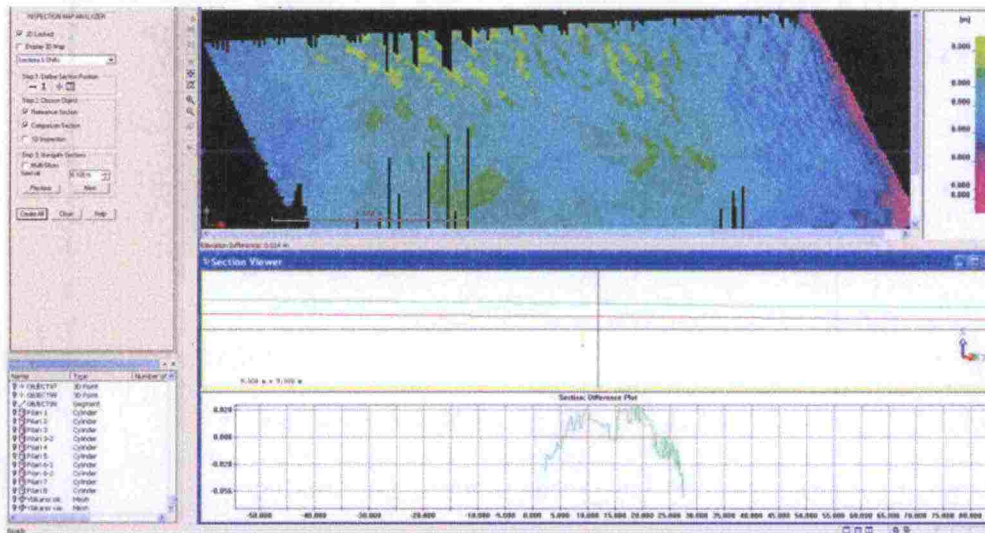
Laserkeilainten ominaisuudet ovat viime vuosina kehittyneet jatkuvasti ja nopeasti. Uusimpien laserkeilainten (esim. HDS-2500, JDS-3000, GS200) ominaisuuksiin kuuluvat mm. RGB-värin mittaus ja tallentuminen jokaiseen laserpisteeseen. Keilaimen sisäänrakennetulla kameralla otettu digitaalikuva voidaan yhdistää affiinisella muunnoksella pistepilveen ja malliin. Keilain voidaan liittää myös suoraan tietoverkkoon kaapelilla tai WLANilla. Myös mitauspistepilven käsittely- ja mallinnusominaisuudet ovat kehittyneet. Ohjelmistot kykenevät poimimaan automaattisesti pistepilvestä erilaisia geometrisia pintoja ja tekemään niistä pintamallit. Pistepilveä voidaan myös verrata

kohteen suunnitelmamalliin ja tuottaa siitä erilaisia havainnollisia poikkeamatulosteita.

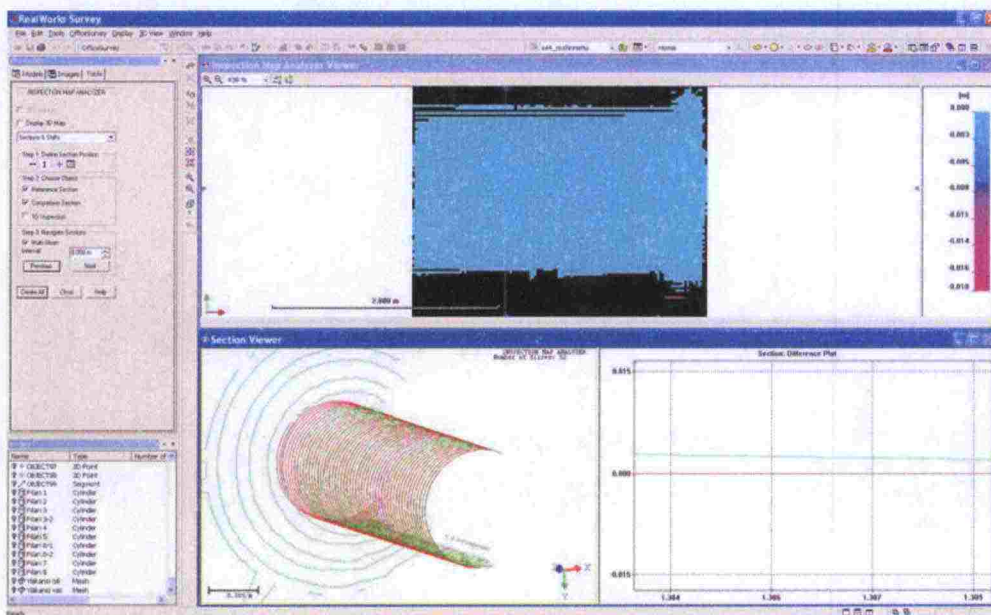
Oleellista mittauspistepilven käsittelyssä on, millaista informaatiota analyysissä kulloinkin halutaan tuottaa. Esimerkiksi teollisuusrakennuksissa tehtävissä keilauksissa on usein tavoitteena olemassaolevien rakenteiden geometrisen mallintaminen piirustusten tuottamiseksi tai uudelleen suunnittelun lähtötiedoksi. Sillan muotin tai valmiin sillan tarkastusmittauksessa tavoitteena on toteutuneen valmistustarkkuuden ja mahdollisten toleranssien ylitysten toteaminen. Mittauspistepilveä ei tällöin välttämättä mallinneta, vaan sitä verrataan suoraan suunnitelmamalliin. Sovelluksilla tulisi tällöin pystyä laskemaan ja määrittämään sillan eri osien geometrisia sijainti-, mitta- ja muoto- poikkeamia eri suunnissa. Poikkeamien laskenta- ja tarkastelutapa samoin kuin kolmiulotteiseen mittaamiseen paremmin soveltuvien toleranssien määrittäminen sekä niihin vertailun suorittamistavan määrittely on tärkeä lähtökohta laserkeilainten laajamittaiselle soveltamiselle silta-alalla.



Kuva 11. GS200-laserkeilaimella mitattu Kajaanin linnan muuri. Laserkeilauksipisteessä näkyy mittauksen yhteydessä tallennettu RGB-väri.



Kuva 12. Sillan (S44, Oulu) kannen yläpinnasta mitatun mittauspistepilven graafista analysointia GS200-laserkeilausjärjestelmän ohjelmistolla. Jokaisen mitatun pisteen poikkeamaa suunnitelmamallista havainnollistetaan värillä. Väriskaala on käyttäjän aseteltavissa.



Kuva 13. Yksityiskohta S44-sillan yhden pilarin mittaustulosten analysoinnista GS200-laserkeilausjärjestelmän ohjelmistolla.

1.4 Projektille asetetut tavoitteet

Projektin tärkeimpänä tavoitteena oli kehittää koko sillanrakennusprosessin läpi toimiva digitaalinen, reaaliaikainen ja graafinen 3D-toimintajärjestelmä. Tavoitteena oli myös kehittää sillanrakentamisprosessia uusia suunnittelu- ja mittausteknologioita hyödyntäen. Käytännön tavoitteina oli tutkia ja määritellä siltojen geometriatietojen kulkua tie- ja geosuunnittelijoiden lähtötiedoista sillansuunnittelun kautta työmaalle. Tavoitteena oli kuvata avoin 3D-geometriamalli sillasta ympäristöineen, jota jatkossa kukin osapuoli pystyisi

omilla ohjelmistoillaan käsittelemään ja hyödyntämään. Ohjelmistokehityksen tavoitteena oli kehittää uusia 3D-CAD-ohjelmiston työkaluja sillansuunnitteluun, mittausuunnitteluun sekä siirtää käyttöön suoraan suunnitelmätietoa hyödyntäviä mittausmenetelmiä siltatyömaan rakennustyötä ohjaavissa ja laatua tarkastavissa mittauksissa.

Tavoitteena oli, että uuden järjestelmän tiedonsiirron rajapinnat olisivat avoimia ja tulokset saataisiin koko alan käyttöön. Tavoitteena oli myös kehittää ja julkistaa koko alan hyödynnettäväksi sillan suunnittelu-, mittaus- ja laadunvalvontaprosessin 3D-toimintamalli. Lisäksi tavoitteena oli tuottaa uutta tietoa siltatyömaan automaattisten koneohjausmenetelmien kehittämis- ja hyödyntämismahdollisuuksista.

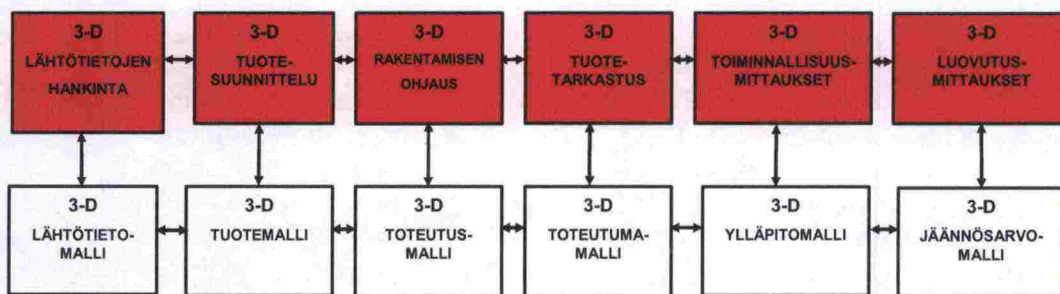
Yritysten tuotekehitys- ja liiketoimintatavoitteina oli projektissa kehittää, parantaa ja lisätä siltojen suunnittelun ja rakentamisen tehokkuutta, laatua, kilpailukykyä ja vientiä seuraavasti:

- *tehokkuutta* kehittämällä ja luomalla kaikkien toimijoiden yhteistyönä uusi koko jalostusprosessin kattava toimintajärjestelmä, jonka eri sovellusosia kukin toimija tehtävänsä mukaisessa vaiheessa voisi käyttää ja hyödyntää oman työnsä sujuvuuden ja tehokkuuden kasvattamiseksi
- *laatua* kokoamalla, yhdistämällä ja järjestämällä uudelleen nykyisen hajanaisen siltaprosessin osat kokonaisvaltaiseksi "älykkääksi" geometriahallintajärjestelmäksi, automatisoimalla kokonaisprosessin virheettiitä työvaiheita sekä kehittämällä reaaliaikaiseen laadun toteamiseen soveltuvia graafiset CAD/CAM/CAC-työkaluja (Computer Aided Design, Computer Aided Manufacturing, Computer Aided Control)
- *kilpailukykyä* kehittämällä silta-alan yritysten ja muiden toimijoiden työssään tarvitsemia kehittyneempiä työkaluja (tuotteita) 3D-geometriatietojen hallintaan pienentäen siten työkustannuksia ja nostamalla työn tuottavuutta sekä
- *vientiä* avaamalla kokonaan uusien tuotteiden ja palveluiden vientimahdollisuuksia joko erillisinä tuotesovelluksina ja/tai yhteistyötyyppisesti osana laajempaa palvelutuotetta vientisiltaurakoissa (suunnittelu-toimistot, mittausyritykset ja urakoitsijat).

2 SILTOJEN 3D-TOIMINTAPROSESSIN KEHITTÄMINEN

2.1 Tienrakentamisen informaatio- ja automaatiotekniikkaa hyödyntävä kokonaistoimintaprosessi

Siltoihin kytkeytyvät toiminnot sisältyvät yhtenä tärkeänä osana tieväylien rakentamiseen, ylläpitoon ja korjaamiseen liittyvää kokonaistoimintaprosessia. Tieväylän rakentamisprosessi alkaa rakennuspaikalta tehtävillä lähtötietomittauksilla. Maa- ja talonrakentamisessa oleellisia lähtötietoja ovat maanpinnan muoto- ja korkeusvaihtelut sekä maaperäominaisuudet. Maanpinnan muodon mittaamisessa laserkeilaus lentokoneesta, helikopterista tai maanpinnalta on tienrakentamisessa syrjäyttämässä perinteisen fotogrammetrisen maastomallinnuksen. Laserkeilattu 3D-pistepilvi voidaan lukea karttakoordinaatistojärjestelmään sidottuna sisään analysointiohjelmaan, jonka avulla kyetään jo puoliautomaattisesti mallintamaan maanpinnan muotojen lisäksi esimerkiksi puustoa, tielinjoja ja rakennuksia. Maaperäominaisuuksien 3D-mallintaminen digitaalisesti käsiteltävään muotoon ei vielä ole kehittynyt pintamallinnuksen tasolle.



Kuva 14. Yksinkertaistetut keskeiset tietovirrat tienrakentamisen tulevaisuuden kokonaistoimintaprosessissa.

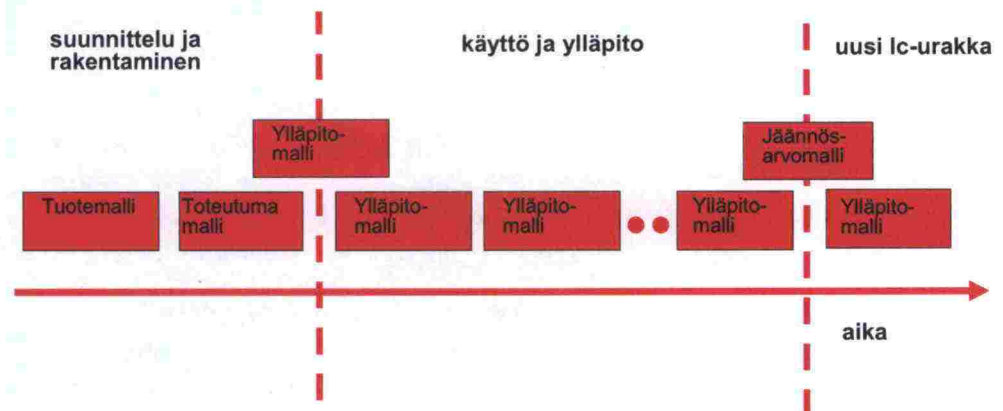
Tuotesuunnittelu luo saaduista lähtötiedoista ja tavoitteista mallin ja ohjeen tuotteiden toteutukselle. Tuotteet ovat kolmiulotteisia, tyypillisesti suuria, kappaleita. Kun lähtötiedot saadaan kolmiulotteisina, voidaan myös suunnittelu tehdä nykyaikaisilla CAD-työkaluilla kolmiulotteisesti. Kolmiulotteisesta geometrisesta mallista voidaan tuottaa edelleen tarvittavat kuvannot tasopiirustuksia varten. Suunnittelun tehostumisen myötä oleellista on myös mahdollisuus hyödyntää suunnitelmamallia rakentamistyössä. Jos geometrinen malli on tarkka ja valmiiksi työmaan toimintakoordinaatistossa, voidaan sitä suoraan käyttää mittauksen ja työkaluohjauksen ohjaukseen. Tämä asettaa uusia vaatimuksia suunnittelun laadulle ja huolellisuudelle.

Työmaanojaustehtävät jakaantuvat työntekijöiden, työkaluohjauksen, materiaalien, aikataulun, kustannusten, aliorakointijoiden ja laadunvarmistuksen osatehtäviin. Informaatio- ja automaatiotekniikan avulla kaikkien osatehtävien hallintaa voidaan parantaa. Työntekijöiden ohjauksessa on oleellista, että kaikki työntekijät tietävät joka hetki mitä pitää tehdä. Lähes jokaiseen maarakentamisen työkaluohjaukseen ja työmenetelmään on markkinoilla saatavissa automatisoituja ohjauksjärjestelmiä. Kehittyneimmissä järjestelmissä työstöterän ohjaus toimii automaattisesti 3D-paikannuksen ja 3D-mallien avulla. Järjestelmien toiminnalliset ominaisuudet vaihtelevat. Oleellista on, että auto-

maattisilla ohjausjärjestelmillä on saavutettavissa merkittäviä laadullisia ja taloudellisia hyötyjä. Materiaalisiirroissa on tunnettava materiaaliavarastot, siirtotarpeet ja hetkelliset materiaalien siirtomäärät. Aikatauluhallintaan kiteytyvät työn toteutuksen useimmat kriittiset tekijät. Kustannusten reaaliaikainen hallinta ja optimointi mahdollistaa taloudellisten tavoitteiden saavuttamisen ja ylipäättään hankkeen toteutuksen. Suurten hankkeiden läpivienti edellyttää kokonaisvaltaista työn kaikkien työmaalla tehtävien töiden, mukaan lukien aliurakoitsijoiden tekemän työn, koordinointia. Työaikainen laadun seuranta ja varmistaminen luo perustan työn valmistumiselle ja mahdollistaa työn luovutuksen tilaajalle.

Laadun tarkastuksessa uutta tehokkuutta ja laatua tuottavaa teknologiaa edustavat erityisesti maanpinnalla toimivat 3D-laserkeilaimet. Nämä ovat mahdollistaneet rakennustöiden laadun tarkastamisen uudella tasolla. Laserkeilaus tuottaa tuloksenaan 3D-pistepilven, jota voidaan verrata 3D-suunnitelmamalliin ja laskea mitta-, muoto- ja sijaintipoikkeamat sekä edelleen verrata poikkeamia asetettuihin toleranssivaatimuksiin. Toleranssiylitykset voidaan havainnollistaa väreillä.

Valmistuneen tieväylän käytön, ylläpidon ja hoidon aikainen seuranta varmistaa liikennevirtojen turvallisen sujuvuuden ja tehokkuuden. Kerätty mittaus-tieto palvelee myös hoito- ja kunnossapitotöitä sekä edelleen on tallennettavissa tietorekistereihin tulevissa rakennusprojekteissa tarvittavaksi lähtötiedoiksi. Hoidon ja ylläpidon sisältävissä väylärakentamishankinnoissa lopputilanne voidaan mitata ja tallentaa jäännösarvomalliksi.



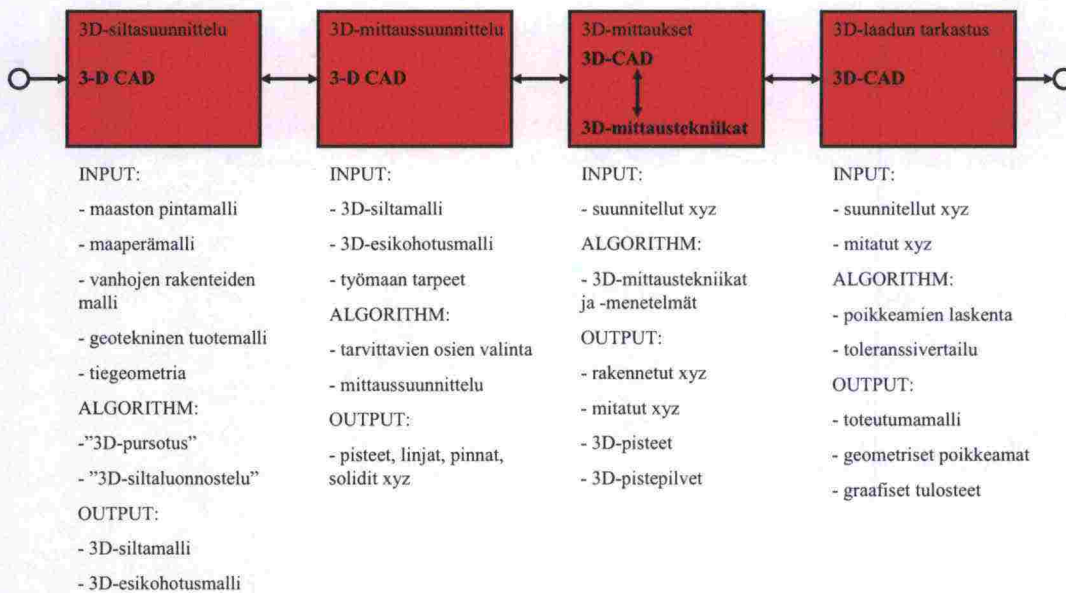
Kuva 15. Periaatteellinen kuva mallien hyödyntämisestä tuoteosan elinkaaren (lc=life cycle) aikana.

Lähtitulevaisuuden tavoitteena tulisi koko silta-alalla olla tilaajien ja muiden toimijoiden järjestelmien kehittäminen ja strukturointi edellä kuvattuihin malleihin yhteensopiviksi ja niitä hyödyntäviksi.

2.2 Malli siltojen tulevaisuuden 3D-toimintaprosessista

Projektissa kehitettiin malli siltojen tulevaisuuden 3D-toimintaprosessista. Siltojen 3D-toimintaprosessi alkaa lähtötietojen sisäänluvulla, joissa oleellisimpina lähtötietoina (lähtötietomallina) ovat siltapaikan maastomalli, geotekninen tuoteosamalli sekä tiegeometria. Maastomalli käsittää maaston pin-

tamallin sekä maaperämallin, joka kuvaa maakerroksia sekä niiden rakennusteknisiä ominaisuuksia. Jos maaperässä on vanhoja rakenteita (putket, kaapelit,...), siltasuunnittelu saa myös niistä tarvittavat tiedot (ns. vanhojen rakenteiden malli). Geotekninen suunnittelu tuottaa siltasuunnittelijan tarvitseman geoteknisen tuotemallin, jossa oleellisia tietoja ovat kairaustulokset, kallionpinta, maakerrokset sekä paalujen tunkeutumistasot. Tiensuunnittelu tuottaa myös siltapaikan kohdalle tiegeometrian, jonka mukaan silta on suunniteltava. Siltasuunnitteluun tarvittavia tiegeometriatietoja ovat mm. mitalinja, taitelinjat, luiskat, hyödyllisen leveyden reunalinjat sekä tierakenteiden alapinta.



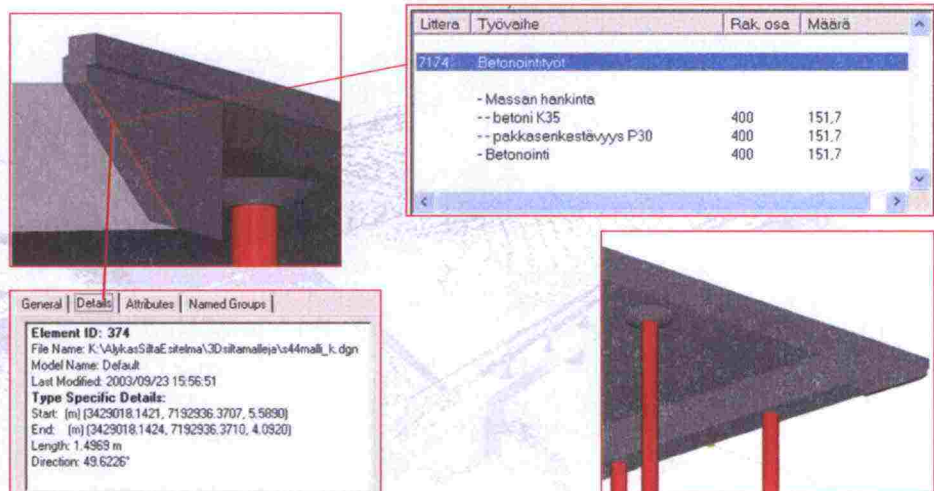
Kuva 16. Malli siltojen tulevaisuuden 3D-suunnittelu- ja -mittausprosessista.

Kuvatussa mallissa siltasuunnittelu tehdään saatuja sähköisiä 3D-lähtötietomalleja käsitellen ja jalostaen kolmiulotteisesti mallintamalla. Tie- ja maastogeometriaa hyödynnetään suunnittelussa mahdollisimman paljon. Sillan pituus määräytyy merkittävimmiltä osin tiegeometrian, sillan alle tarvittavaa aukkoa koskevien tarpeiden sekä maaston pintamuodon mukaan. Siten sekä tiegeometriamallia että maaston mitattua 3D-pintamallia hyödynnetään mallintamistyöskentelyssä hyvin aktiivisesti. Silta ulotetaan niin pitkälle aukon molemmiin puolin, että tarvittavat maaluisikat yhdistettynä siipi- ja tukimuureihin saadaan hyvin rakennettua. Mallintamalla myös tarvittavat maarakennustyöt (esimerkiksi kaivannot ja täytöt) voidaan näitä tietoja hyödyntää esimerkiksi sillan päämittojen tarkastelussa, määrälaskennassa sekä työkoneiden ohjauksessa. Kaivantojen mallinnus muodostaa myös oman sovellusalueensa.

Sillan alusrakenteiden suunnittelussa hyödynnetään lisäksi kolmiulotteista maaperämallia. Esimerkiksi sillan eri kohtiin suunnitellut tukipaalut ulotetaan kallioon tai arvioituun paalujen tunkeutumistasoon saakka. Geometriatiedon lisäksi tuotemalliin sisältyy myös tarvittavia materiaali- ja rakennetietoja. Sillan mallinnuksessa käytetään soveltuvia, joustavia ja helppokäyttöisiä työkaluja. Tällaisia ovat esimerkiksi parametriset tyyppikappaleet (poikkileikkauksen muodot, päätypalkit, siipimuurit ja reunapalkit), tyyppielementit (pinta-vesiputket, tippuputket, siirtymälaata ja kaiteet) sekä erityyppiset liitostekni-

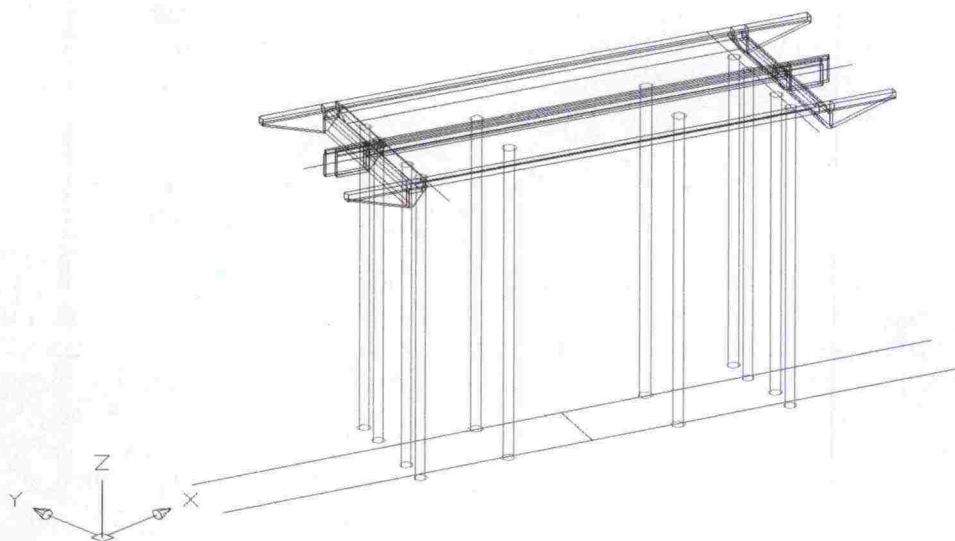
kat. Mallinnus tuottaa tarkan sillan geometrian 3D-mallin. Tyypillistä silta-geometriaan liittyvää mallintamista, kuten esimerkiksi aukko vaatimukset, luiskakaltevuudet, jännemitat ja siipimuurien pituudet, on myös mahdollista automatisoida.

Mallinnusohjelmassa suunnittelu etenee aktiivisesti sisäänluettuja lähtötietomalleja hyväksikäyttäen. Sillan päämitat määräytyvät erityisesti siltapaikan geometrian perusteella. Suunnittelijan valitsemaa siltaprofilia voidaan mallin mukaisissa sovelluksissa pursottaa valittuja tiegeometrian ohjauskäyriä pitkin. Sillan yleissuunnitteluvaiheessa voidaan luoda ja tarkastella helposti eri tyyppisiä siltavaihtoehtoja. Valituista katsontasuunnista voidaan tuottaa visualisoituja, parhaimmillaan lähes valokuvatasoisia, havainnekuvia. Rakennustyömaalle tuotetaan tarvittavat tasopiirustukset. Teräsosien numeerisia työstökoneita tai työmaan automatisoituja työkoneita varten voidaan tuottaa tarvittavat koneohjausmallit. Tuotemalli voidaan siirtää edelleen lähtötiedoksi muihin suunnittelussa käytettyihin järjestelmiin kuten esimerkiksi rakenne-laskentaan.



Kuva 17. Visio teräsbetonisillan tuotemallista. Malli sisältää geometriatietojen lisäksi mm. suunnitellut materiaaliominaisuudet.

Tuotemallista erotettu geometriamalli korvaa erikseen tehtävän mittaus-suunnitelman. Geometriamalli voidaan siirtää suoraan yleisimpiin työmaalla käytettäviin mittalaitteisiin näiden tuntemalla formaatilla. Suunnittelija voi luoda geometriamallista muotin rakentamiseen tarvittavan esikohotusmallin, johon on otettu huomioon rakenne-esikohotukset, teline-esikohotukset sekä optiset kohotukset. Myös urakoitsijan mittausteknikko voi täydentää geometriamallia työnaikaisilla tiedoilla. Näitä voivat olla esimerkiksi teline-esikohotus tai työvaiheiden mukaiset muut kuin välittömästi siltamallista poimittavat geometriat. Nämä voivat olla esimerkiksi erilaisiin muotin rakentamisvaiheisiin tarvittavia mittapisteitä tai -linjoja. Mittausteknikko pystyy omalla mittaus-suunnitteluovelluksellaan poimimaan geometriamalleista kulloinkin tarvittavia pisteitä sekä siirtämään ne mittalaitteille lähtötiedoksi.



Kuva 18. Mittaussuunnittelun lähtökohta - tarkka sillan 3D-geometriamalli.

Siltöjen mittauksiin liittyvät työvaiheet voidaan karkeasti jakaa suunnittelijalta saadun aineiston läpikäyntiin, paikalleenmittauksiin, toteutumamittauksiin sekä analyysiin ja raportointiin.

Suunnittelijalta saadun aineiston läpikäyntiin sisältyy käytännössä lähtöpisteiden lisäys suunnitelmaan, aineiston läpikäynti ja "tutustuminen" siltaan, siltakohtainen mittaussuunnitelma maastossa tapahtuvaa mittausta varten, käytettävät mittalaitteet ja tietöjen vieni eri mittausjärjestelmiin. Mittaus maastossa alkaa orientoitumisella ja orientoititietöjen tallennuksella. Mittausta varten suunnittelijan tekemää aineistoa käytetään joko kokonaisuutena tai siitä on erikseen poimittu yksittäisiä pisteitä, linjoja tai pintoja kuten pilareiden keskipisteet, reunapalkin ulkoreuna yläpinnasta tai kannen yläpinta. Mittaajan on pystyttävä maastossa muokkaamaan aineistoa esimerkiksi tarvittavien telinekohotusten huomioon ottamiseksi. Käytettävän mittalaitteen on oltava ergonomialtaan maastomittauksiin soveltuva. Mittausohjelman oltava selkeä.

Toteutumamittaus- ja raportointityövaiheeseen sisältyy mitattavien kohteiden listaus, selkeät raportit kuten esimerkiksi havainnekuvat, mittauksen tulokset, mittauksien sisältämien virheiden arviointi, mitattujen kohteiden välitön poikkeamavertailu, mahdollisuus suorittaa maastossa erilaisia laskentoja kuten kahden suoran leikkaus tai ympyrän keskipiste sekä jälkilaskenta mitatuista kohteista.

Muotin ja valmiin sillan geometrian tarkastuksessa käytetään kehittyneitä 3D-mittaustekniikoita kuten takymetrit ja laserkeilaimet. Mittaustuloksina saadut pisteet voidaan siirtää analysointiohjelmaan, jolla voidaan mallintaa pistepilviä erilaisiksi geometriapinnoiksi tai laskea poikkeamia pisteiden ja suunnitelmamallien välillä. Myös visuaalinen tarkastelu suunnitelmamalliin verraten on mahdollista. Mittaustuloksista muodostetaan myös sillan geometrinen toteutumamalli, joka on edelleen siirrettävissä sillan ylläpito- ja hoitovaiheisiin lähtötiedoksi. Määräajoin tehtäviä sillan geometrisia tarkastusmittauksia voidaan verrata sillan valmistumisen yhteydessä mitattuun toteu-

tumamalliin. Kaikki mallit tallennetaan sillan omaan strukturoituun tietokantaan.

2.3 Mallia testaava 3D-suunnittelu- ja -mittausjärjestelmä

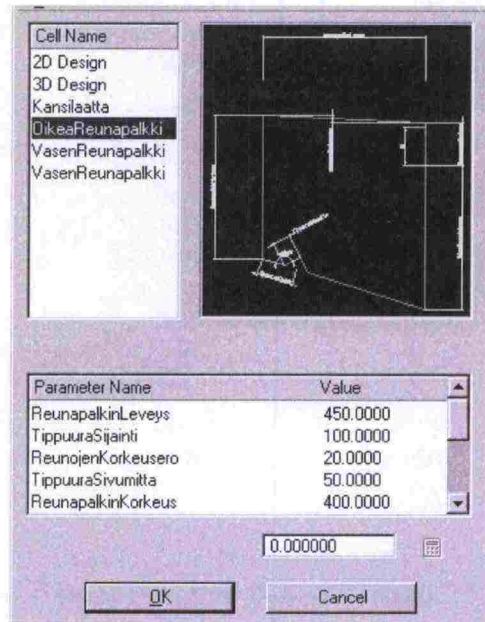
Projektissa visioitua toimintamallia testattiin kehittämällä teräsbetonisiltöjen suunnittelujärjestelmää MicroStation-CAD-ohjelmaan ja pilotoimalla 3D-suunnittelu- ja mittausmenetelmää useiden todellisten siltasuunnittelutoimemksiäntöjen yhteydessä.

Teräsbetonisiltöjen 3D-suunnittelu voidaan tehdä hyödyntäen MicroStationin yleisiä ominaisuuksia sekä projektissa kehitettyjä uusia sovellustyökaluja. Kehitetyillä mallinnustyökaluilla mallinnus aloitetaan sovittamalla ohjauskäyrä tielinjan geometriaan. Ensin mallinnetaan kansilaatta. Reunapalkki mallinnetaan omana rakenneosanaan. Sillan päät leikataan mallinnuksen lopuksi ylipursotetusta sillasta.

Sillan mallintamisessa tärkein geometrinen lähtötieto on tien keskilinjan ohjauskäyrä. Sillan kansi pursotetaan ohjauskäyrää myöten kehitetyillä mallinnustyökalulla valitsemalla aluksi kansilaatan poikkileikkauksen mukainen parametrinen profiili. Profiilivalikoimaa voidaan vapaasti täydentää suunnittelutarpeiden mukaisesti. Profiilin valinnan jälkeen osoitetaan haluttua tielinjaa, jota pitkin pursotus suoritetaan. Mallinnuksen lähtökohtana on, että johtokäyrät saadaan lähtötietoina tiesuunnitelmasta. Mallinnustyökalu liittää automaattisesti profiiliin parametrit vastaaviin suunnitteluparametreihin. Pursotus toimii koko johtokäyrän matkalle, joten johtokäyrä tulee olla katkaistu halutusta kannen lähtöpisteestä ja loppupisteestä. Vaihtoehtoisesti esimerkiksi vinot kannen päät voidaan leikata pursotuksen jälkeen suunnittelijan osoittamista kohdista, jolloin kannesta saadaan halutun pituinen.

Reunapalkit voidaan mallintaa käyttämällä kansilaatan reunakäyriä ohjauskäyrinä. Päätypalkit mallinnetaan lineaarisella pursotuksella ja tarvittaessa sovitetaan oikean mittaisiksi. Siipimuri pursotetaan vastaavalla tavalla. Pilarit voidaan tehdä joko MicroStationin standardityökaluilla tai pursottamalla sopivaa profiilia. Mallinnuksen jälkeen parametrien avulla luotua sillan kansirakennetta voidaan muokata parametreja muuttamalla.

Muottipinnan tekoon ja esikohotuksen toteutukseen MicroStationissa on valmiita työkaluja. Kannen muotin tekoon on yhdistettävä rakennustyössä tarvittava esikohotus. Toteutukseen tutkittiin kahta erilaista vaihtoehtoa: 1) esikohotus voidaan yhdistää suoraan tilavuuskappaleeseen (tai sen offset-pintaan) tai 2) apugeometrina tilavuusmalliin (solid), jolloin esikohotuksen voisi kytkeä päälle/pois. Esikohotustyökaluja voidaan tarvittaessa käyttää myös tien tasausviivasta poikkeavaan ns. optisen esikohotuksen mallintamiseen.

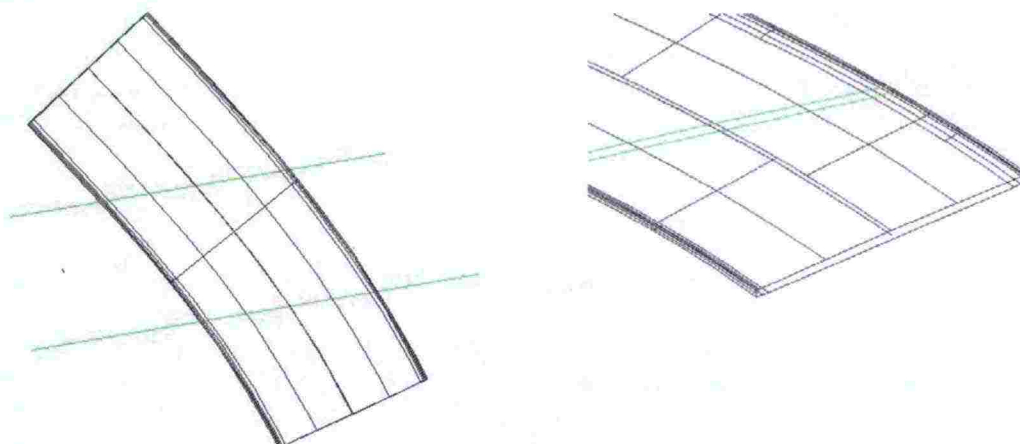


Kuva 19. BRIDGE DECK –mallinnustyökalulla avautuva profiilien valintaikkuna.

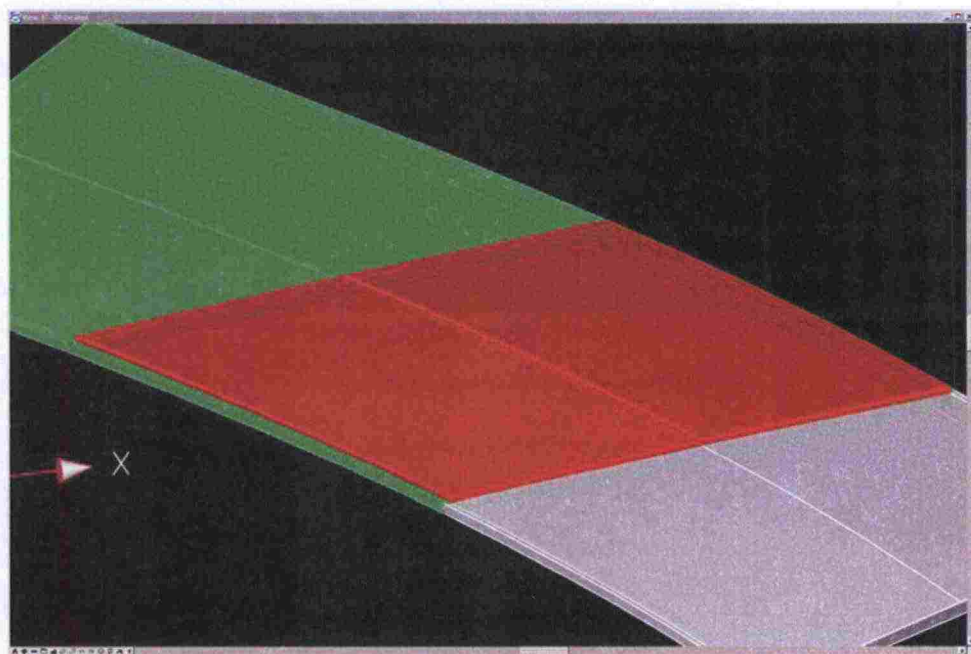


Kuva 20. Johtokäyrää pitkin pursotettu kansilaatta.

Esikohotusten mallintaminen ratkaistiin piloteissa siten, että siltamalliin lisättiin työkalu joka tuottaa apulinjojen leikkaukset sekä esikohotuspinnan. Apulinjaominaisuus tuottaa annetun viivageometrian ja siltamallin leikkausgeometrian, kun viiva projisoidaan kuva-avaruuden z-suunnan mukaisesti. Ominaisuus muodostaa siltageometriaan apugeometrian kuvan mukaisesti. Apugeometriaa voidaan käyttää apuna sekä pilarien asemoimisessa että esikohotusten mallintamisessa. Esikohotusgeometrian luomiseksi ohjelmiin lisättiin työkalu, jolla valitusta pinnasta tuotetaan annetuilla parametreillä muutettu pinta. Esikohotuksen parametreilla voidaan ohjata joko yleisenä kaikkialle lisättävää kohotusta (telinpainuma) tai antamalla siirtymiä kahden apulinjan (tai päätyjen) välillä.



Kuva 21. Siltamalli ja apulinjojen paikan määräytyminen.



Kuva 22. Esikohotuksen havainnollistaminen kuvaruudulla.

Laserkeilausvaiheessa siltaan ei tulisi vielä olla asennettu pintarakenteita. Kun pintarakenteet asennetaan, siltaan aiheutuu jo taipumia. Oleellista on siten missä tilanteessa kulloinkin mitataan ja mitkä ovat tällöin taipumat. Kuormat aiheuttavat myös telinepainumia. Sillan lopulliset laatudokumentit luovutetaan tilaajalle kun työ valmis. Laatumittaus tulisi siis periaatteessa olla lopputilanteen mukainen. Malliin voitaisiin periaatteessa myös kytkeä aina eri tilanteen mukainen esikohotus: ruksilla päälle haluttu malli. Mittaus-tuloksia tulisi verrata aina teoreettisesti oikeaan malliin. Sillan poikkisuunnassa esikohotus pidetään nykyisin yleensä samana. Vinoissa silloissa esikohotuksen määrittely on epäselvempää. Viisteellisten palkkien korkeus muuttuu pituussuunnassa. Tällöin poikkileikkauksia voidaan antaa n kpl, jolloin mallinnus voidaan tehdä poikkileikkausvälein esimerkiksi kahden profiilin sovellusta käyttämällä.

2.4 Kokeiden suoritus

Kehitettyä suunnittelu- ja mittausjärjestelmää kokeiltiin viiden paikallavaletun teräsbetonisillan sekä yhden elementtirakenteisen terässillan rakentamisen yhteydessä.

2.4.1 Lähtötietojen sisäänluku

Lähtötietojen sisäänlukua kokeiltiin maaston digitaalisen pintamallin ja tiesuunnitelmasta poimitun tiegeometrian osalta. Maastomalli luettiin MicroStationiin kolmioverkkopintoina DXF- tai DGW-tiedoistoina. Tiesuunnitelmasta numeerinen tiegeometria luettiin sisään ns. Tekla-formaatissa sisältäen maastotiedot ja tiegeometrian. Yhden pilottisillan osalta lähtötiedoksi saatiin vain kaksiulotteiset suunnitelmapiirustukset.

2.4.2 Sillan yleissuunnittelu

Sillan yleissuunnittelun tehtävänä ja tavoitteena on löytää annettujen ja saatujen lähtötietojen perusteella tapauskohtaisesti soveltuvin siltaratkaisu. Useimmiten yleissuunnittelussa luodaan muutama vaihtoehto, joita vertaillaan teknistaloudellisesti parhaimman vaihtoehdon löytämiseksi. Perinteisesti yleissuunnittelu on tehty piirtämällä kaksiulotteisena sillan alustava yleispiirustus, jossa on sivukuva ja vähintään yksi poikkileikkaus sillasta. Valitusta ratkaisusta on tapauskohtaisesti voitu laatia visualisointia varten 3D-malli, joka on myös sijoitettu maastomalliin. Visualisointimalli ei tyypillisesti ole ollut tarkka malli, jota olisi voinut hyödyntää rakennussuunnittelussa ja rakennusmittauksissa.



Kuva 23. Sillan yleissuunnitelmavaiheen visualisointia (Länsisatamankadun silta, Helsinki).

Uutta 3D-yleissuunnittelumenetelmää kokeiltiin Oulun kaupungin pilottikohteessa Joutsentien alikäytävässä. Yleissuunnitteluvaiheessa tehtiin siltapaikalle kolme eri vaihtoehtoa 3D-tekniikalla. Siltatyypinvaihtoehtoina olivat teräsbetoninen ulokelaattasilta kahdella eri jännemitalla, laattakehäsilta ja teräksinen holvisilta. Lähtötiedoiksi saatiin 3D-maastomalli ja -tiesuunnitelma. 3D-yleissuunnittelu tehtiin näihin sähköisiin tietoihin perustuen MicroStationilla. Lisäksi joitakin kuvantoja piirrettiin suunnittelussa AutoCADilla.

Suunnittelutoimeksiantoon sisältyi myös katusuunnitelman laatiminen. Aineisto luettiin Microstation-ohjelmaan sähköisessä muodossa siltasuunnittelun pohjaksi. Maastotietoa hyödyntäen mallinnettiin siltavaihtoehdot ulkonäkö- ja kustannustarkastelun pohjaksi. Yhteistyössä tilaajan kanssa valittiin rakennussuunnitteluun holvisilta toteutettavana ratkaisuna. Sillan tyyppi on teräksinen holvisilta. Sillan perustukset suunniteltiin teräsbetonielementteinä Tekla Structures -ohjelmalla.

2.4.3 Sillan rakennesuunnittelu

Rakennesuunnittelu uudella 3D-menetelmällä tehtiin useaan kohteeseen. Rakennesuunnittelua suoritettiin sekä perinteisellä 2D-menetelmällä että 3D-mallinnuksella.

Oulun pilottisillan (Joutsentien alikäytävä) alustavaa rakennesuunnittelua tehtiin aluksi MicroStation- ja AutoCAD-ohjelmilla mm. elementtijaon selvittämiseksi. Silta oli tyypiltään teräksinen holvisilta. Jännemitta oli 8,0 m ja pituus 37,6 m. Hyödyllinen leveys oli 28,25 m. Suunnittelussa geometriatieto siirrettiin lähtötiedoiksi rakennesuunnitteluun. Rakennesuunnittelu tehtiin Tekla Structures -ohjelmalla. Mallinnusta varten ohjelmassa luotiin aluksi ns. supercor-profiili, joka oli teräksen valmistajan mittojen mukainen teräsprofiili. Seuraavaksi mallinnettiin teräskarielementit teräsprofiilia käyttäen sekä tämän jälkeen teräsbetonielementit.

Joroinen-Varkaus -tielinjan Kuvansintien risteyssilta -pilotissa tehtiin rakennussuunnitteluvaiheessa sillan päällysrakenteen mallinnus Microstation-ohjelmalla käyttäen kehitettyjä mallinnustyökaluja. Lähtötietona siirrettiin tiesuunnittelijalta saatu tien mittalinja siltasuunnittelijan järjestelmään. Mittalinjaa ohjausgeometria ja kehitettyä parametrissa siltakannen poikkileikkausta apuna käyttäen mallinnettiin kansilaatta ja reunapalkit. Siipimuurit ja päätypalkit luotiin Microstation-ohjelman omilla perusmallinnustyökaluilla.

Sillan muottirakenteen esikohotusmuodon mallintamiseksi kehitettiin luvussa kaksi kuvattuja menetelmiä ja työkaluja Microstation-ohjelmaan.

Kuukson ratasilta -pilotoinnin kohteena oli ratasilta tyypiltään teräsbetoninen laattasilta. Jännemitat olivat 6,5+11,0+6,5 m. Sillassa oli teräsputkipaalupeurutukset. Kansirakenne oli teräsbetoninen laatta. Sillan kansi rakennettiin siirtomenetelmällä kahdessa vaiheessa. Mallinnus tehtiin laadittuun rakennussuunnitelmaan perustuen. Mallinnus sisälsi betonirakenteen ja paalut. Sillan tilavuusmalli tehtiin MicroStation-ohjelmistolla.

Suonenjoen Kaplaan-ratasillan 3D-mallin suunnitteli Insinööri-toimisto Rantakokko & Co Oy. Suunnittelutyökaluna oli AutoCAD2004-ohjelmaan sisältyvä

tilavuusmallinnusmenetelmä. Valmis malli siirrettiin MicroStationiin DGN-tiedostomuutona. Tehtyjen tarkistusten mukaan tilavuusmallit olivat oikein ja oikeassa paikassa. Mallin rakenne oli käytetystä eri CAD-ohjelmasta johdettua erilainen kuin MicroStationilla tuotetun parasolidisen mallin rakenne.

2.4.4 Paikalleenmittaukset

Paikalleenmittauskokeiluita suoritettiin Oulun moottoritien laajennushankkeessa S44-siltatyömaalla, Joroinen-Varkaus –tielinjalla Kuvansintien siltatyömaalla sekä Oulun Joutsentien alikäytäväsilta-työmaalla.

S44-pilottisillalla kokeiltiin lyöntipaalujen paikalleenmittausta reaaliaikaista CAD/CAM-yhteyttä käyttäen. CAD-ohjelmistona oli MicroStation ja siihen Terrasolid Oy:n kehittämät mittausapuohjelmat. Mittalaitteena oli Trimblen robottitakymetri. Mittaustulosten tarkkuus tarkistettiin Leican robottitakymetrillä.

Joroinen-Varkaus –tietyömaalla suoritettiin paikalleenmittauksia kaikissa muotin rakentamisvaiheissa. Mittausteknikkoina olivat Skanska Tekra Oy:n omat henkilöt. Paikalleenmittauksiin tarvittavat piste- ja koordinaattitiedot poimittiin MicroStation-ohjelmalla siltasuunnittelijan tekemästä mallista. Koordinaatit tarkistettiin siltapiirustuksiin vertaamalla. Reunapalkkien paikalleenmittauksia varten luotiin mittapisteitä kahden metrin tasavälein molemmista reunapalkista. Myös esikohotukset olivat paikalleenmittauksissa mukana.

Oulun pilottisillan paikalleenmittaukset suoritti oululainen mittauskonsultti Mitta Oy. Tavoitteena oli poimia paikalleenmittausten lähtötiedot siltasuunnittelijan 3D-mallista MicroStation-ohjelmalla.

2.4.5 Muotin tarkastusmittaukset

Muotin tarkastusmittauksia laserkeilaimella kokeiltiin Joroinen-Varkaus –tietyömaalla S17-sillalla. Mittalaitteena oli Leica Nilomark Oy:n Cyrax-laserkeilain (HDS-3000). Takymetrinä käytettiin Leica 1200 –sarjan robottitakymetri. Mittauskohteena oli sillan puuvalmis muotti. Pinta oli puhdas ja kuiva. Sää oli puolipilvinen, kuiva ja tuulinen.

Muotista tehtiin kaikkiaan 8 keilausta noin neljän tunnin aikana. Muotin tarkastusmittauksen vertailumallina oli esikohotusmalli. Käytetty rakenne-esikohotus oli 5 mm aukkojen keskellä sekä toisessa sillan päädyssä 11 mm. Teline-esikohotus oli 15-17 mm. Paikalleenmittauskokeissa oli aiemmin havaittu reunapalkissa 11 mm (oikea) ja 4 mm (vasen) suuruisia poikkeamia piirustusten mittoihin nähden. Siipimuurien muottien mittauksessa vaikeimaksi osoittautui riittävien näkömien saanti.



Kuva 24. S17-muotin laserkeilaus muotin päältä.



Kuva 25. Reunapalkkien muottien taiteviivojen keilaus.



Kuva 26. Siipimuurin muotin keilaus.



Kuva 27. Sillan eteläisen muottipäädyn keilaus.



Kuva 28. Muotin tukirakenteita ei pystynyt keilaamaan.

2.4.6 Valmiin sillan tarkastusmittaukset

Betonisillan tarkastusmittauksia laserkeilaimella kokeiltiin Joroinen-Varkaus-tietyömaalla S17-sillalla. Mittalaitteena oli Leica Nilomark Oy:n Cyrax-laserkeilain (HDS-3000). Takymetrinä käytettiin Leica 1200 –sarjan robottitakymetria. Mittauskohteena oli betoni. Pinnat olivat puhtaita ja kuivia. Sää oli vaihteleva. Välillä paistoi aurinko, välillä satoi vettä. Lämpötila oli noin +20°C.

Mittaukset suoritettiin noin kuuden tunnin aikana yhtäjaksoisesti. Keilausasemia oli kaikkiaan kahdeksan, joista kaksi kannen päällä, kaksi alla, kaksi päädyistä sekä kahdelta mitattiin reunapalkkien ulkopintoja. Tähyispisteitä asennettiin keilausten edetessä tarpeen mukaan. Takymetri orientoitiin työmaakoordinaatistoon mittaamalla kaksi sillan kannen päälle tarkemitattua apupistettä (pulttia), joiden koordinaatit oli aiemmin tarkemitattu.

Kannen yläpinnan mittaus ilman ajoneuvonosturin apua olisi ollut vaikeaa. Vaihteleva sää vaikutti keilausten suoritukseen. Vesisadekuuron aikana onnistuttiin mittaamaan sillan alapuolella sateensuojassa alapintaa. Viimeisen keilauksen aikana (toisen reunapalkin ulkopinta) sade alkoi jälleen.



Kuvat 29-30. Käytännön mittausgeometriaa kesällä 2004 S17-työmaalla. Laserkeilauslaitteisto jouduttiin nostamaan ajoneuvonosturilla sillan kannelle ja sieltä takaisin maanpinnalle.



Kuva 31. Takymetrille valittu kojeasema. Sijoittelulla saatiin aikaan näkymät sekä sillan kannen päälle että alle asetettuihin tähyspisteisiin.



Kuvat 32-33. Silan kannen yläpinnan keilaukset.



Kuvat 34-35. Silan päällysrakenteiden alapintojen keilausasemat.



Kuvat 36-37. Sillan päätyjen keilaukset.



Kuva 38-39. Reunapalkkien ulkopintojen keilaukset.

Toisena betonisillan tarkastusmittauskohteena oli keväällä 2004 Suomenjoel- la sijaitseva Kaplaan-ratasilta. Mittalaitteina oli Leica Nilomark Oy:n Cyrax- laserkeilain (HDS-3000) sekä Etelä-Suomen Mittauspalvelut Oy:n Leica TCRM 1105-takymetri. Mittauskohteena oli betoni. Betonivalu oli silmämää- räisen tarkastelun perusteella hyvin onnistunut. Pinnat olivat puhtaita ja kui-

via. Sää oli pilvinen ja kuiva. Tuuli yltyi mittauksen loppuvaiheessa navakaksi. Lämpötila oli noin +14°C.

Mittausalueelle asetettiin aluksi seitsemän tähyistä. Kaikki tähykset mitattiin takymetrillä. Keilauspistetiheytenä käytettiin 400x1000 pistettä. Reunapalkkien sisä- ja ulkoreunoista mitattiin takymetrillä kaikkiaan 72 pistettä. Lisäksi takymetrillä mitattiin kannen pintaa harvalla pistetiheydellä. Käytettävissä oli kaksi kiintopistettä takymetrin orientointiin sillan lounais- ja luoteispuolella. Kolmas työmaan kiintopiste oli jo aiemmin todettu epäluotettavaksi.

Mittauskonsultin arvion mukaan siltojen tarkastusmittaus onnistuisi hyvin laserkeilaimella. Siltojen tarkastusmittauskäytännöt ovat työmailla vaihtelevia ja etenkin graafisten tulosteiden teko on työlästä. Mittauksissa ja tulosten analysoinnissa tarvittaisiin enemmän yhdenmukaisuutta.

Mittauskohteena ollut siirrettävä silta sijaitsi kaivannossa, joka aiheutti laserkeilaukseen katveja. Sillan alle ei pystytty keilaamaan. Siirtotyön tekevän urakoitsijan laitteissa ei saatujen tietojen mukaan ollut siirron peräytymämahdollisuutta. Erityisesti silloin siirtosuunta ja siirron seuranta ovat erittäin oleellisia. Sillan toteutumamittausten analysointia vaikeutti myös se, että tarkastusmittausvaiheessa silta sijaitsi suunnitelmamalliin nähden eri paikassa ja asennossa. Suunnitelmamalli tulisi siirtää affiinisella 6-parametrisella koordinaattimuunnoksella sillan valunaikaiseen paikkaan ja asentoon. Muunnokseen tarvittavat vastinkoordinaatit saadaan esimerkiksi tukipaalujen yläpintojen keskipisteistä muotti- ja siltapaikoilta.



Kuva 40. Kaplaan sillan laserkeilaus käynnissä.



Kuva 41. Silta siirretään myöhemmin olemassaolevan ratalinjan alle.



Kuva 42. Keilaus käynnissä – katveet estivät sillan alapintojen mittaukset.



Kuva 43. Reunapalkkien keilaus.

3 TULOKSET

3.1 Lähtötietöjen sisäänluku

Teknisesti lähtötietöjen sisäänluku useista eri tiesuunnittelijan järjestelmistä osoittautui mahdolliseksi ja toimivaksi käyttäen mm. DXF- ja DGW-formaatteja. Tiesuunnitelmatietöjen sähköinen tiedonsiirto 3D-muodossa sillansuunnitteluun ei kuitenkaan vielä ole vakiintunut käytäntö. Geometriankäsittelyyn ja tiedonsiirtoon tarvitaan lisää ohjeistusta. Sillansuunnittelun alkuvaiheessa sähköisesti saatu 3D-maastotieto ja tiesuunnitelmatieto auttavat varmistamaan lähtötietöjen oikeellisuuden.



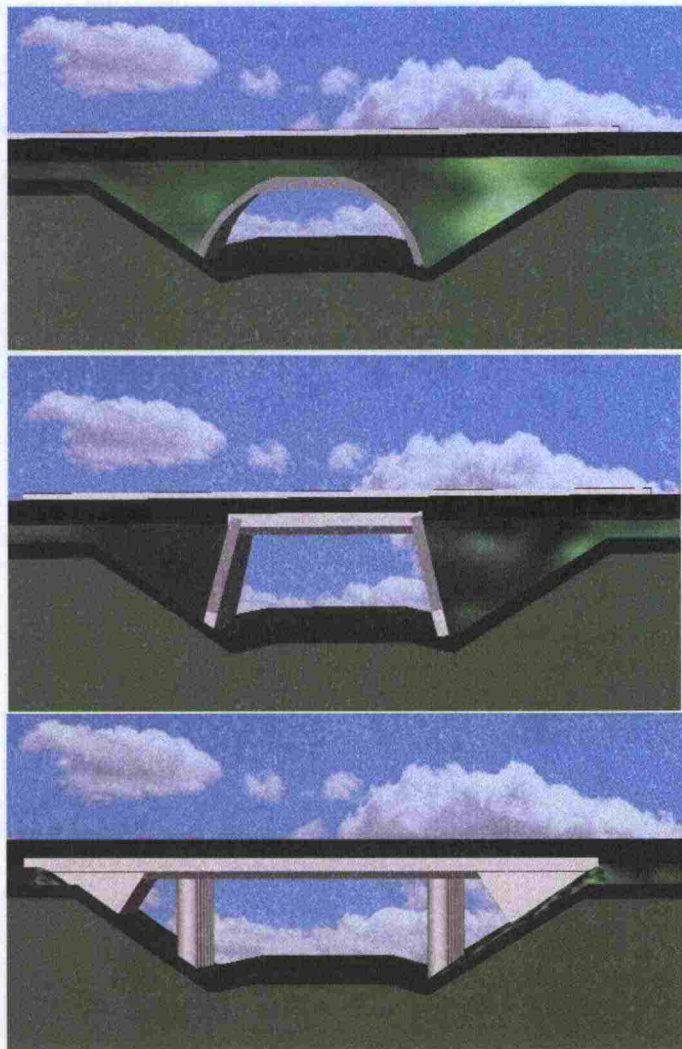
Kuva 44. Sillansuunnittelun lähtötiedoksi saatu digitaalinen maastomalli (Oulun pilottisilta).

Oulun pilottisillan suunnittelun lähtötiedoksi saatiin kolmiulotteisena lähes kaikki tielinjat, luiskat sekä maastomalli. Koordinaattimittaukset oli suoritettu takymetreilla oikein. Lähtötietöjen siirto tiesuunnittelusta siltasuunnittelijalle onnistui ASCII-pistetiedostona hyvin (ns. Tekla-formaatti pistetietöjen älykääseen siirtoon). Tunnettua pistesiirtoformaattia käyttäen geometrian lisäksi voidaan siirtää myös muuta pisteisiin liittyvää tunnist- ja attribuuttitietoa. Tiesuunnittelijan lähtötiedoista tuottama geometriatieto esimerkiksi pintamallina ei yhtä hyvin palvele siltasuunnittelun tarpeita, koska geometrian tarkkuus heikkenee ja samalla geometriaan sisältyvä älykkyys katoaa. Jatkossa on tärkeää selvittää ja tarkentaa lähtöarvojen saanti sekä muodostaa toimiva käytäntö lähtöarvojen siirtämiseksi. Silta-alan tulisi siirtyä tarkasti määriteltyyn tapaan.

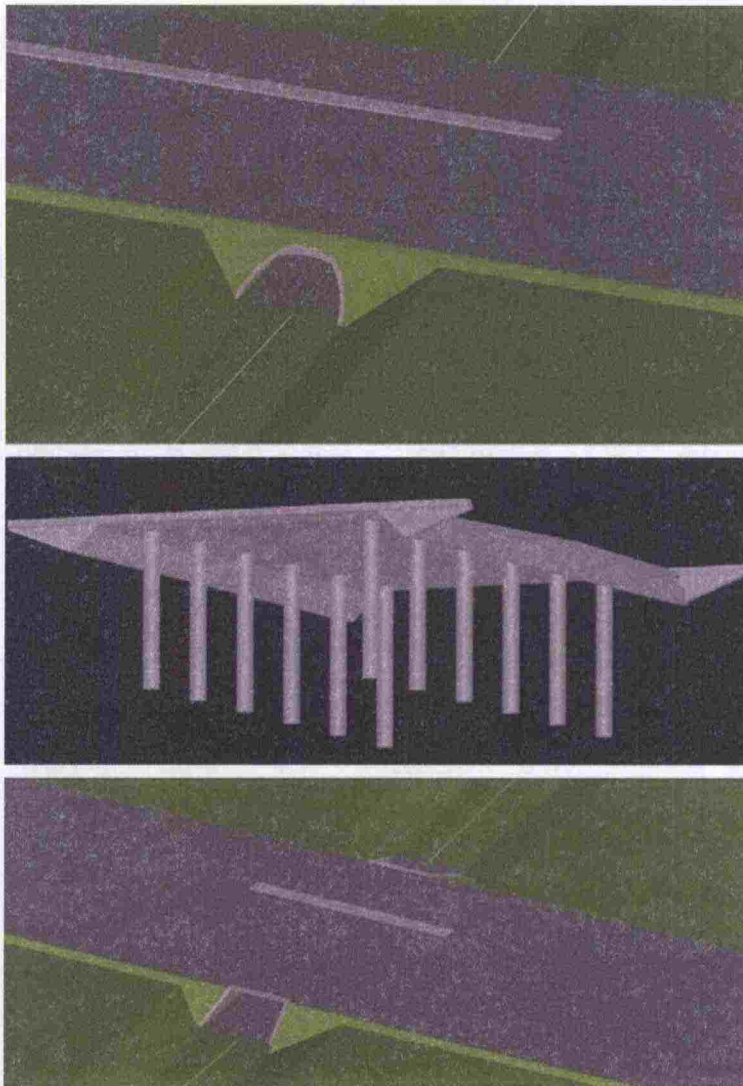
3.2 Sillan yleissuunnittelu

Yleissuunnitteluvaiheessa karkeakin 3D-mallinnus antaa piirustusta selvemmän käsityksen eri siltatyypin soveltuvuudesta silta-paikalle. Sillan jännemittojen ja siltapituuden sopivuus voidaan osoittaa havainnollisesti mallintamalla. Yleissuunnitteluvaiheessa ideoitin uusia työkaluja sillan geometrian problematiikan hallintaan. Eri CAD-ohjelmien perustyökaluilla monimutkaisinkin geometrian mallinnus onnistuu, mutta vaatii luonnollisesti enemmän työtä. Erityisesti sillan suunnitteluun kehitetyillä työkaluilla voitaisiin nopeuttaa mallinnusta, jolloin eri vaihtoehtojen tarkastelu olisi helpompaa.

Tyypillisen sillan kaltainen monimuotoinen geometria vaatii ohjelmiston geometriahallinnalta paljon. Tiedonsiirron virheettömyyden kannalta olisi tärkeää, että ohjelmat käsittelevät geometriaa oikein. Esimerkiksi tässä tapauksessa ohjelmasta tuotu ympyrägeometria muutetaan murtoviivaksi, jolloin geometriaan tulee pientä virhettä. Tiedonkäsittely saattaa myös hidastua sen vuoksi, koska pinta muodostuu siirron jälkeen lukemattomista murtoviivapinnoista.



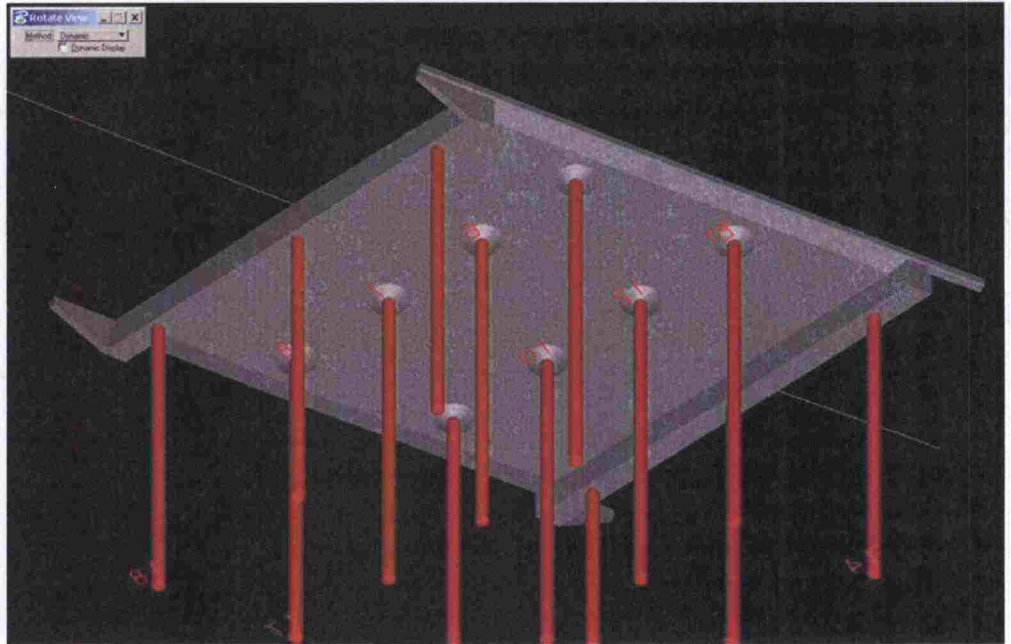
Kuva 45. Oulun pilottisillan yleissuunnitteluvaiheessa tuotetut kolme tyyppi- vaihtoehtoa vapaan silta-aukon vertaamiseksi (maastomallista vain osa tarkastelussa mukana).



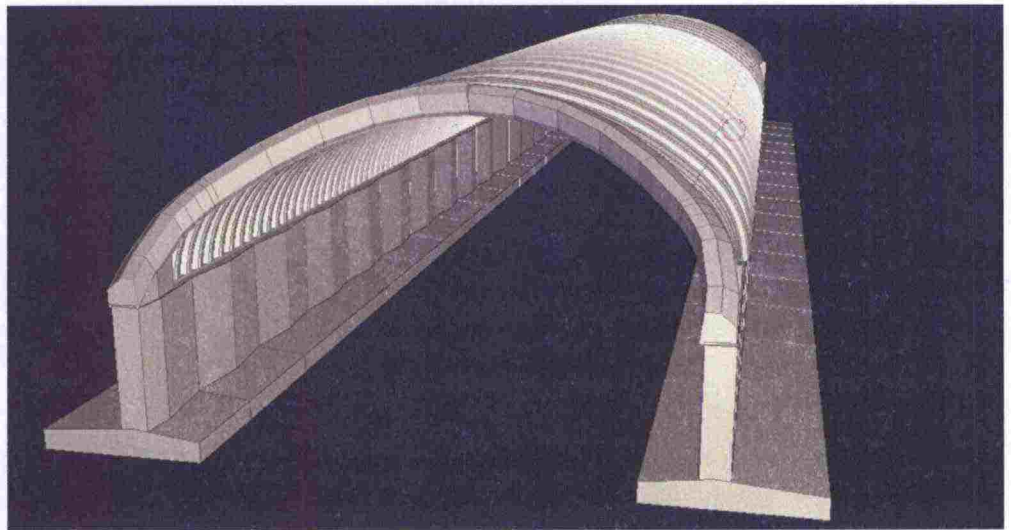
*Kuva 46. Oulun pilottisillan yleissuunnitteluvaiheessa tuotetut kolme tyyppi-
vaihtoehtoa eri perspektiivistä tarkasteltuna (esitystapana CAD-ohjelman
Phong-varjostus).*

3.3 Sillan rakennesuunnittelu

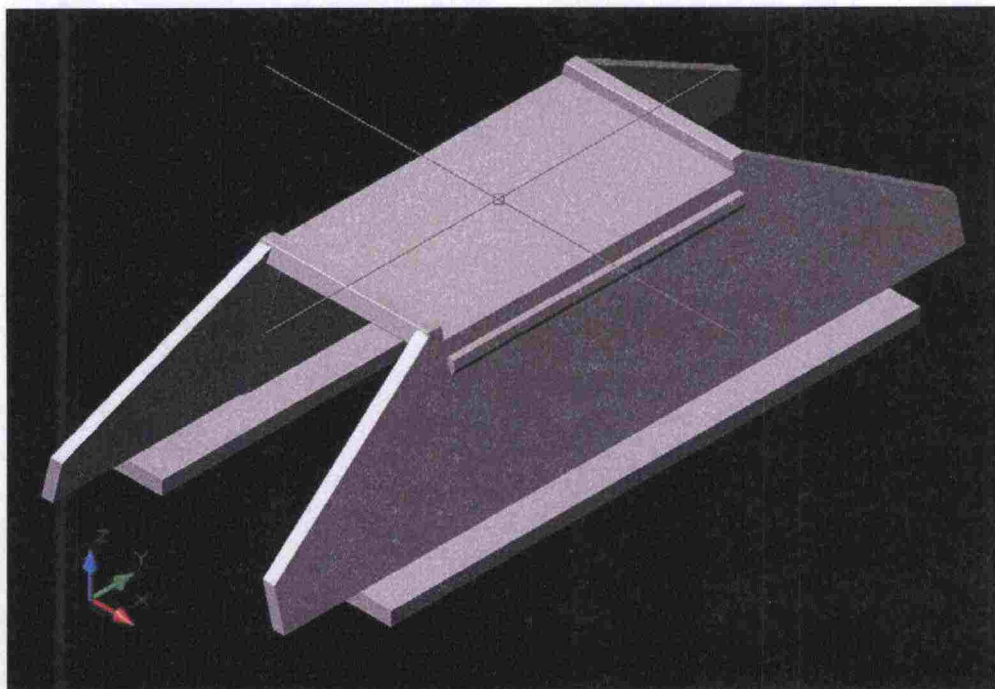
Rakennesuunnitteluvaiheessa mallinnettiin tiegeometriaan perustuen useita pilottisilloja hyödyntäen MicroStation-ohjelman perustoimintojen lisäksi projektissa kehitettyjä uusia mallinnustyökaluja. Pääsääntöisesti mallinnuksesta saatiin hyviä kokemuksia. Tiedonsiirto muiden CAD-ohjelmien välillä (lähinnä AutoCAD ja Tekla Structures) toimi myös ilman mainittavia ongelmia.



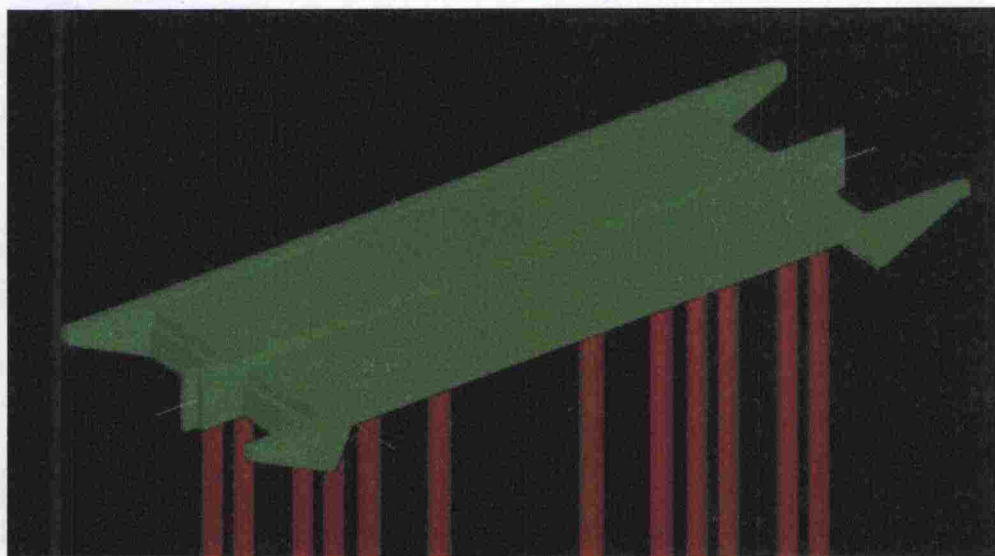
Kuva 47. S44-sillan 3D-geometriamalli (Oulu).



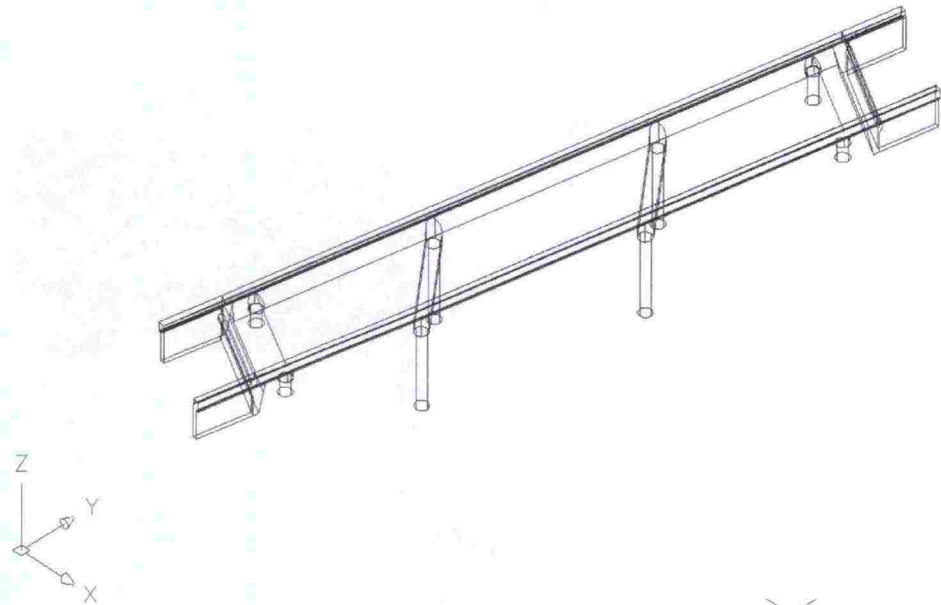
Kuva 48. Joutsentien sillan internet-selaimella katseltavissa oleva geometriamalli. Mallista voidaan Structures-ohjelmalla tuottaa erillinen ns. katselumalli, jota voidaan pyöritellä ja tarkastella esimerkiksi internetin kautta.



Kuva 49. Tyyppikehäsillasta esimerkinomaisesti tehty tilavuusmalli.



Kuva 50. Kuukson ratasillan 3D-geometriamalli. Silta koostui kahdesta rautatien molemmilla valmistetusta ja sieltä lopulliselle paikalleen siirrettävästä osasta.

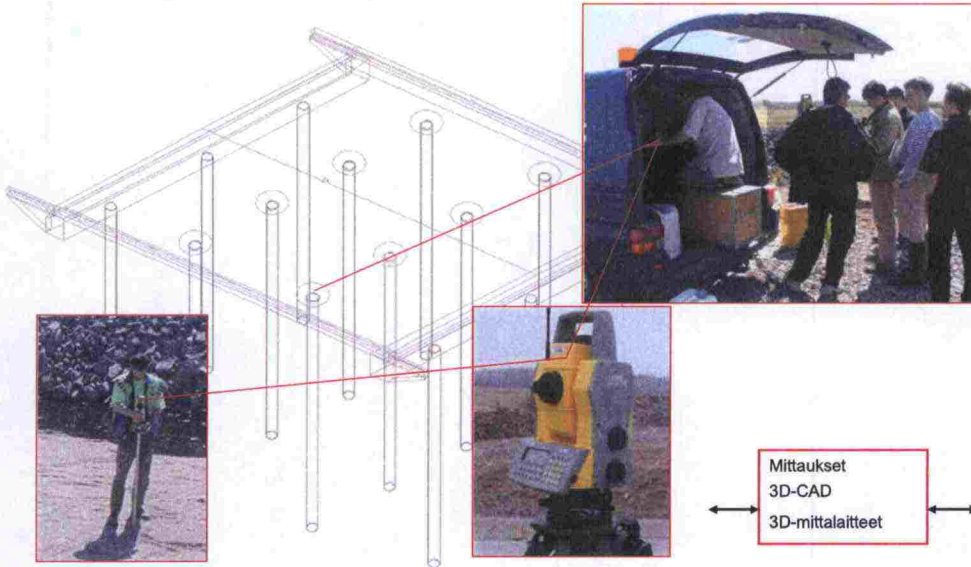


Kuva 51. Kaplaan sillan 3D-geometriamalli (Suonenjoki).

3.4 Paikalleenmittaukset

Paikalleenmittausvaiheessa valmis siltasuunnittelusta saatu geometriamalli korvaa aiemmin erikseen tehdyn mittaus suunnitelman. Tiedonsiirto suoraan takymetriin toimii jo nykyisin valmiilla laitekohtaisilla formaateilla ongelmitta. Käytännössä mittauksiin tehdään yleensä oma mittausmalli saadun geometriamallin avulla. Urakoitsija voi myös täydentää geometriamallia työnaikaisilla tiedoilla (esimerkiksi telinekohotus, työvaiheiden mukaiset geometriat). Paikalleenmittauksiin tarvittavien esikohotuksiin kehitettiin projektissa perustyökaluja. Tarvittavat korjaukset voidaan luonnollisesti syöttää mittapisteiden z-koordinaatteihin myös manuaalisesti.

Paikalleenmittauskokeilu Oulun S44-pilottisillalla onnistui suunnitellulla tavalla hyvin. Sää oli kokeen aikana hyvin kesäinen. Kirkas auringonpaiste vaikeutti tietokoneen näytön katselua. Paikalleenmittaus aloitettiin takymetrin orientoimisella työmaan koordinaatiston vapaan kojeaseman menettelyllä. Takymetri ja tietokone liitettiin kaapeleilla toisiinsa. Tietokoneella käynnistettiin MicroStation-ohjelma, jolla avattiin siltasuunnittelijan tekemä sillan tilavuusmalli. Lisäksi käynnistettiin Terrasolid Oy:n mittausten suorittamiseen kehittämät aputyökalut TerraSurvey ja Terralink. Reaaliaikayhteyden avauduttua tilavuusmallista valittiin hiirtä ja hiiren näppäimiä käyttäen vuorollaan eri paalujen sijainnin määrittävät pisteet. Koordinaattitiedot siirtyivät suoraan takymetrille, jonka paikalleenmittaustoiminnolla kyettiin erotietoja hyväksikäyttäen hakemaan merkkipaalujen paikat tarkasti. Tarkistusmittauksissa toisella riippumattomalla takymetrillä todettiin jokaisen paalun merkintätarkkuuden olevan yhden senttimetrin luokkaa.



Kuva 52. Paikalleenmittausten suorittaminen Oulun S44-pilottisillalla.

Joroinen-Varkaus –tielinjan kaksiosaisen S17-pilottisillan mallinnus on tehty toisen puolen sillalle. Suunnittelussa on samalla testattu Terrasolid Oy:n kehittämiä uusia työkaluja. Siltamallin tarkkuus todettiin riittäväksi tarkoituksiaan varten. Käytännössä teoreettista tarkkuutta huonontaa jo tiesuunnittelijoiden yleinen tapa pyöristää tielinjan mittalukemia lähimpään sentin mittoihin. Pilotin paalut lyötiin 3D-mallin mukaan klikkaamalla CAD-mallista mittapisteet ja siirtämällä ne edelleen takymetrille. Skanskan omat mittamiehet käyttävät tällä työmaalla vanhempaa NIKON-manuaalitakymetriä. Tiedon siirto takymetrille onnistui ns. Geodimeter-formaatilla. Mittauspisteiden poimintaan voi Terrasolid Oy tehdä jatkossa omia aputyökaluja, joilla vältetään tässä vaiheessa mahdollisilta inhimillisiltä virheiltä.

Oulun Joutsentien pilottisillan rakennustyössä paikalleenmittaukseen käytettiin Leica 1200-sarjan robottitakymetriä. Sillan suunnitelmamalli oli tehty Tekla Structures –ohjelmalla ja siirretty edelleen mittaussuunnittelua varten MicroStation-ohjelmaan. Silta rakennettiin kahdessa vaiheessa.

Mittaukset aloitettiin kaupungin tunnetuilta runkopisteiltä. Vaakasuuntaisessa orientoinnissa käytettiin kahta pisteitä ja korko otettiin kaupungin yhdeltä kiintopisteeltä. Orientointi kaikilta kolmelta pisteeltä ei ollut mahdollista ilmenneen liian suuren orientointivirheen vuoksi. Päivittäiset orientointitarkkuudet tallennettiin mahdollista myöhempää analysointia varten. Ensimmäisellä kerralla mitattiin neljä apupisteitä, joita käytettiin koko alikulkutunnelin mittausten ajan. Päivittäisissä orientoinneissa otettiin havainnot vähintään kolmelta pisteeltä.

Anturaelementtien paikalleenmittausten suorittamiseen todettiin soveltuvan parhaiten mittaus anturoiden kiinnityspulttien perusteella. 1. vaiheessa anturakoordinaattien avulla laskettiin anturoiden pulteille mittauksissa käytettävät

xyz-koordinaatit, koska mittaukseen siirretyssä Microstation mallissa ei ollut kiinnityspultteja.

Kaikki mittaukset tehtiin Leica 1200 -takymetrillä robottitoimintoa käyttäen. Alikulktunnelin ykkösvaiheen aikana kone oli mahdollista pitää samalla paikalla (vastakkaisella puolella nosturia) eri mittauspäivinä, jolloin välttyttiin koneen tärinältä.

Myös toisen rakennusvaiheen aikana sama tilanne onnistui, koska kaikki liikenne tapahtui kaivannon toisella puolella. Mittaukset sujuivat hyvin suhteellisen kireästä aikataulusta huolimatta.

Anturoiden paikalleenasennusta vaikeutti anturaelementtien epäkeskeinen paino nostopisteinä käytettyihin kiinnityspultteihin nähden. Nostoelimessä ja –menetelmässä epäkeskeisyyttä ei oltu otettu huomioon.

Anturoiden paikalleenasennusvaiheessa mitattiin anturoiden välistä jänne-mittaa sekä etenemää. Paikalleenmittausten perusteella anturoiden pulteista tehtiin poikkeamavertailu. Vertailu osoittaa pulttien xy-suuntaisen poikkeamat ja pulttien korkeusasemat. Toteutumamalli tehtiin myös hiekan pinnasta, anturoiden yläreunan korkeusasemasta sekä anturoiden jännevälin vertailusta.



Kuva 53. Oulun Joutsentien pilottisillan pohjoinen osa. Kuvassa näkyvät teräsbetoniset perustuselementit sekä niihin tukeutuva teräksisistä kaarielementeistä koostuva päällysrakenne.

Kaarielementtien asennus kesti kaiken kaikkiaan arvioitua huomattavasti kauemmin johtuen teräksisten kaarielementtien epätarkkuuksista. Rakennustyöt eivät ehtineet valmistua Älykäs silta –projektin päättyessä. Sillan valmistuttua päätettiin vielä suorittaa toteutuman laserkeilaus.

Parhailtaan tehdään kehitystyötä takymetrin kytkemiseksi solidimallin kanssa kehittyneempään yhteistoimintaan. Mittauksen jälkeen poikkeaman näkyisi heti takymetrin näytöllä. Koko suunnitelmamallia ei aina välttämättä tarvitse siirtää takymetrille. Tietoliikenteen voi toteuttaa sitenkin, että tietokone lähettää takymetrille mitatun pisteen perusteella kulloinkin tarvittavan osan mallista. Uusille ominaisuuksille olisi arvioiden mukaan paljonkin hyötykäyttöä rakennustyön eri vaiheissa. Mittamiehen työtä helpottaisi, jos ei joka mittauksen jälkeen tarvitse heti lähteä työmaakoppiin tuloksia ja poikkeamia laskemaan. Telineillä liikkuen mittamies ei pysty kuljettamaan mukanaan työturvallisuussyistä kuin periaatteessa ainoastaan prismaa. Jos telinesuunnitelma olisi tehty 3D-malliksi, myös sitä voitaisiin suoraan hyödyntää mittauksiin.

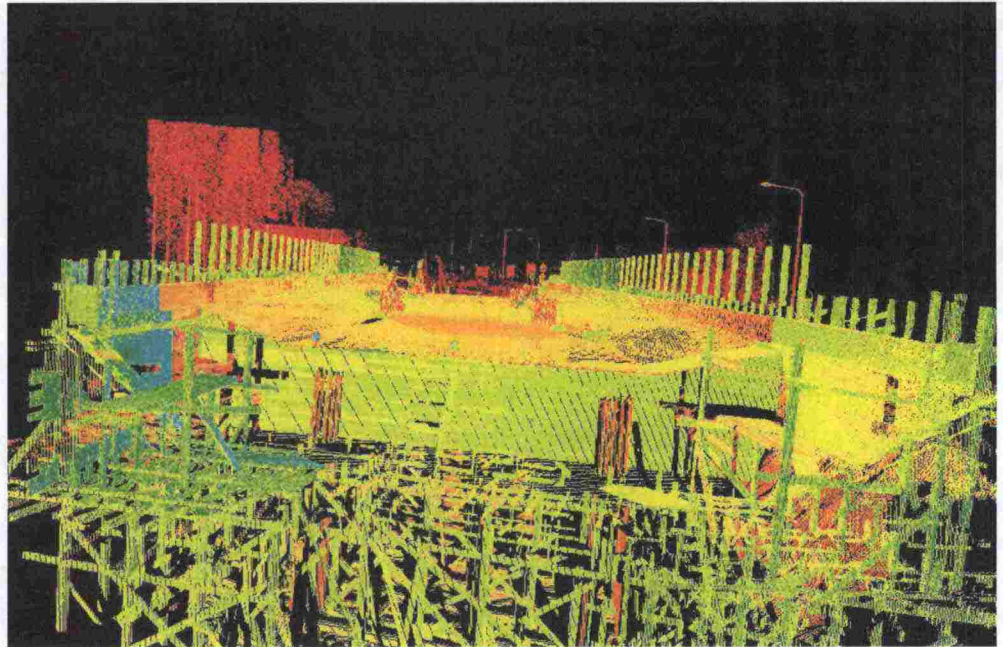
3.5 Muotin tarkastusmittaukset

Kaplaan-sillan muotti mitattiin kokeiluluonteisesti takymetrillä mahdollisimman tiheällä pisteruudukolla. Kokeessa laserkeilainta ei ollut käytettävissä. Mittaajana oli Etelä-Suomen Mittauspalvelut Oy. Takymetrimittausten perusteella ei kuitenkaan liian vähäisen pistemäärän vuoksi saatu aikaan kunnollista 3D-mallia. Onnistuneen mittauksen suorittamiseksi olisi tarvittu pistemittaustekniikan sijasta pistepilvien mittaustekniikka eli esimerkiksi laserkeilain.

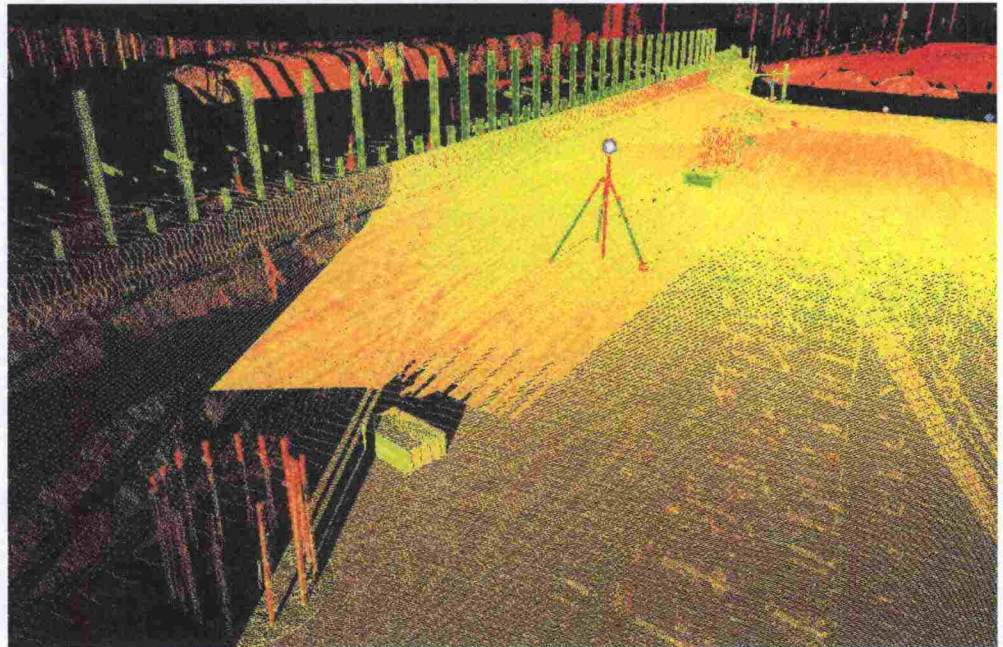


Kuva 54. Sillan muotin tarkastusmittaus takymetrillä käynnissä (Kaplaan silta, Suonenjoki). Talviolosuhteet olisivat haitanneet ja mahdollisesti jopa estäneet muotin laserkeilauksen.

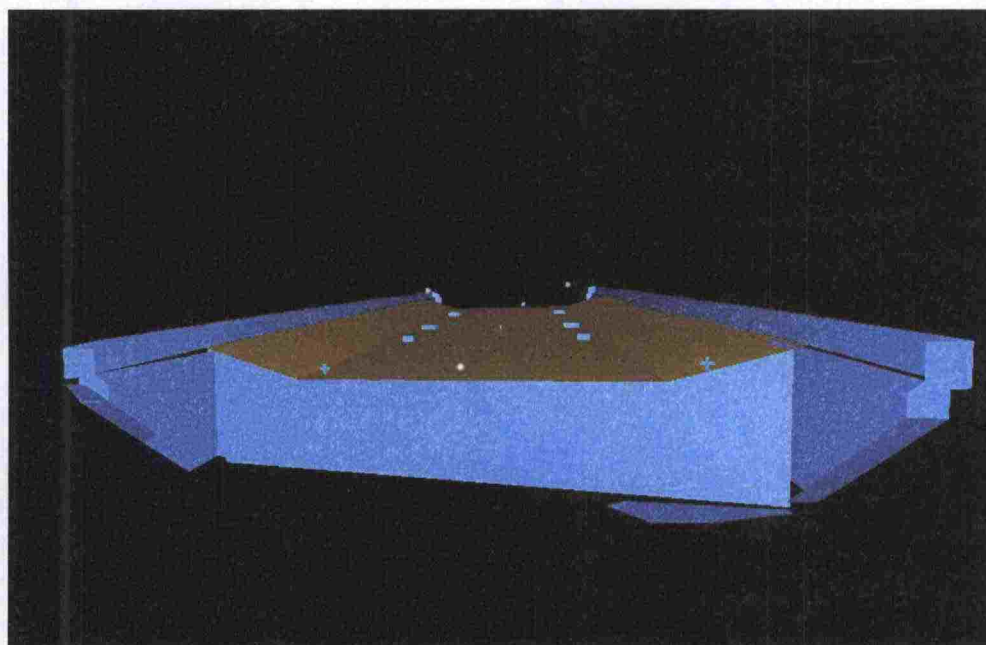
Laserkeilausta muotin tarkastamiseen kokeiltiin Joroinen-Varkaus –tielinjan S17-pilottisillalla. Laserkeilaus onnistui hyvin. Muotin yläpuolinen pinta saatiin mitattua kattavasti ja eri pistepilvet yhdistettyä toisiinsa.



Kuva 55. Käsittelemätön pistepilvi (raakahavainnot) muotista tehdystä laserkeilauksesta.



Kuva 56. Muotin laserkeilaustulos – reunapalkin taitekohta.

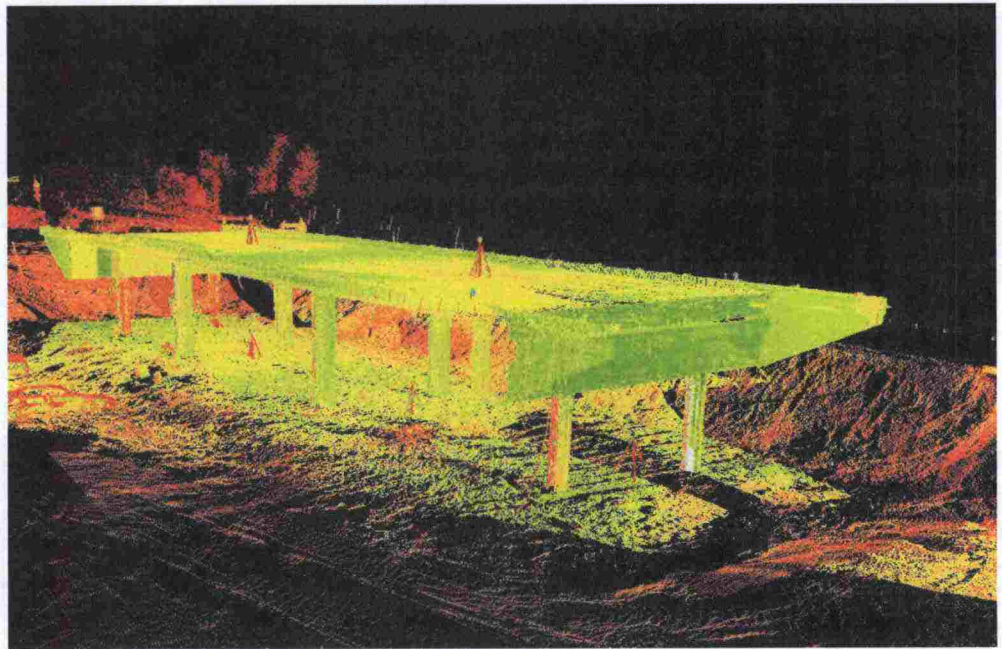


Kuva 57. Pistepilvi on mallinnettu Cyclone-ohjelmistolla geometrisiksi pinnoiksi (muotin toteutumamalli).

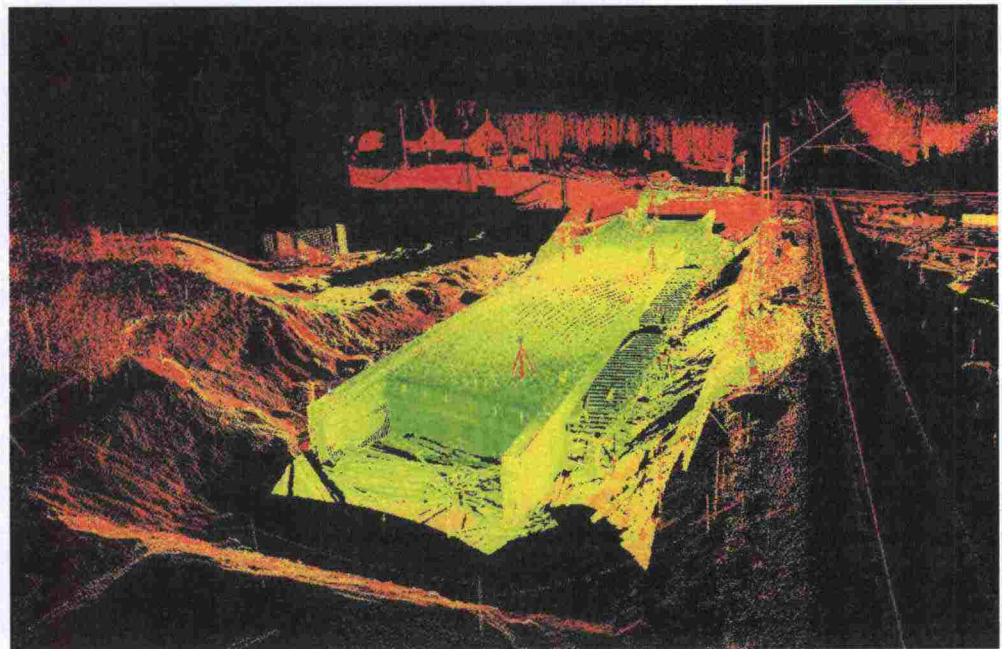
3.6 Sillan tarkastusmittaukset

Sillan tarkastusmittauksia suoritettiin useissa pilottisilloissa sekä takymetriä että laserkeilaimia käyttäen. Sillan kokonaisvaltaisen muodon mittaamiseen tarvittava työmenekki oli laserkeilainta käytettäessä keskimäärin 4-6 h. Analysointi vei aikaa noin 2 h. Kokonaiskustannus on tällä hetkellä noin 1500 EUR/työvuoro. Pääsääntöisesti keilaukset onnistuivat hyvin. Osassa hankkeista sillan ja maaston geometria vaikeutti riittävien näkymien saamista (esimerkiksi virtaava joki, sillan rakentaminen kaivantoon, kannen korkeus maanpinnalta,...). Käytetyt menettelyt dokumentoitiin mahdollisimman tarkasti ja havainnollisesti raportointia ja mahdollista laajempaa hyödyntämistä varten.

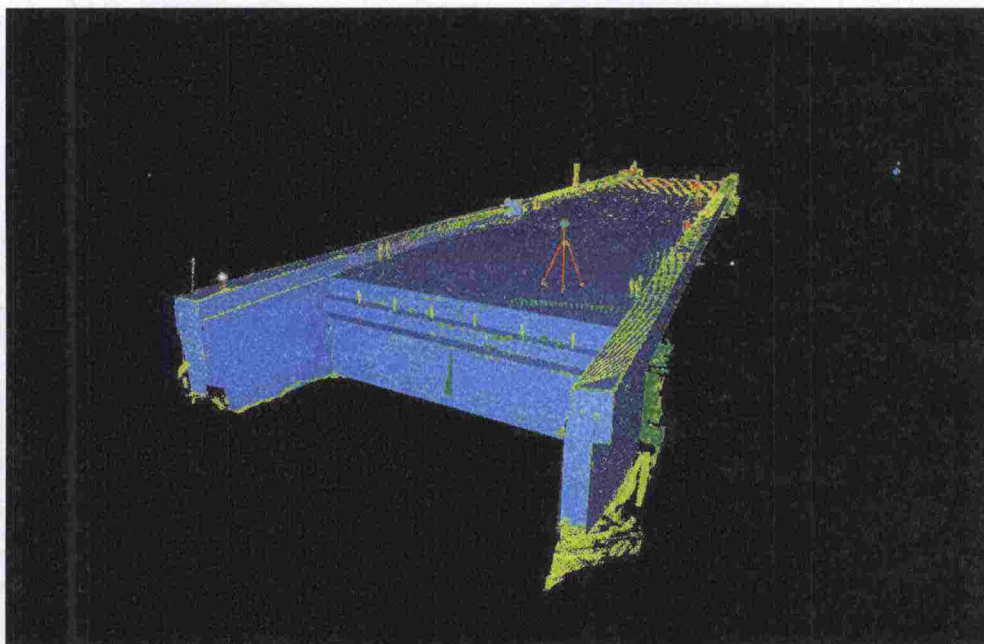
S44-pilottisillassa takymetrillä mitatut poikkeamat sekä laserkeilatusta pistepilvestä Cyclone-ohjelmalla yksittäin (Virtual Surveyor) poimittujen pisteiden poikkeamat olivat hyvin samaansuuruisia. Cyclone-ohjelmistoon ei vielä ole kehitetty kokonaisvaltaisempaa poikkeamien laskentaa ja havainnollistamista. Projektin loppuvaiheessa päästiin yhden sillan osalta kokeilemaan Trimble GS200-laserkeilaimen analysointiohjelmistoa, jolla tuntui onnistuvan myös pistepilven ja suunnitelmamallien välinen vertailua, poikkeamien laskenta ja graafinen havainnollistaminen. Analyysityökalut sijoittuvatkin jatkossa jo laserkeilainten sovellusohjelmiin tai kulloinkin käytettävään CAD-ohjelmaan. Projektin aikana Terrasolid teki onnistuneen kokeilun S44-sillasta mitatun pistepilven vertaamiseksi MicroStationissa suunnitelmamalliin. Mallien vertailu ja poikkeamien laskenta samoin kuin niiden havainnollistaminen muokattavissa olevaa väriskaalaa käyttäen osoittautui mahdolliseksi.



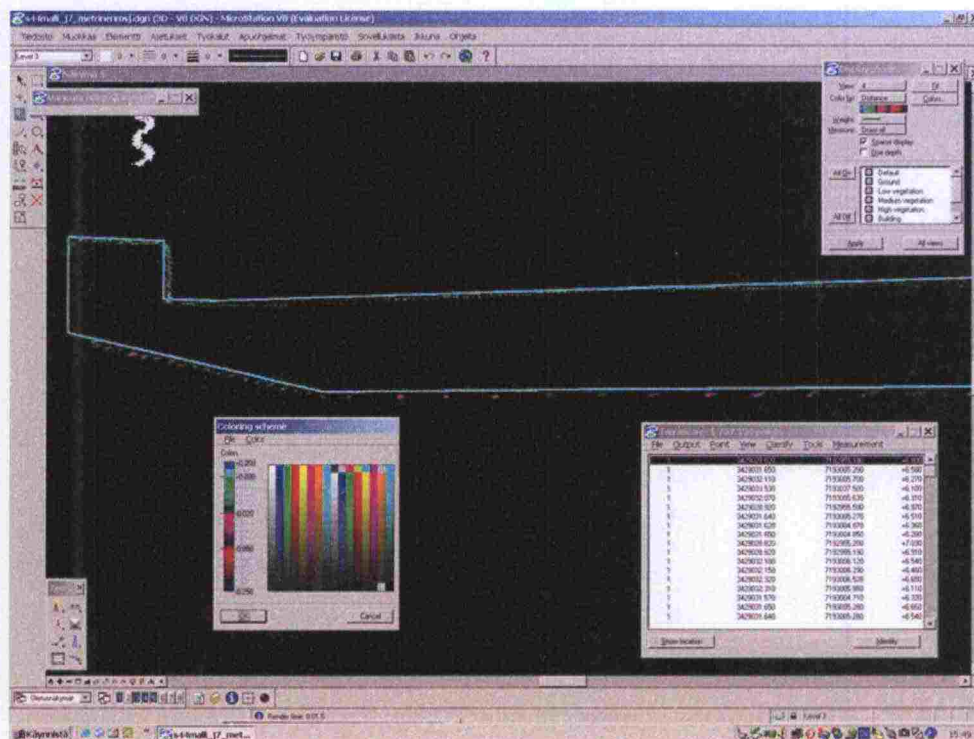
Kuva 58. Käsittelemätön pistepilvi välittömästi muottien purkamisen jälkeen tehdystä laserkeilauksesta (Joroinen-Varkaus).



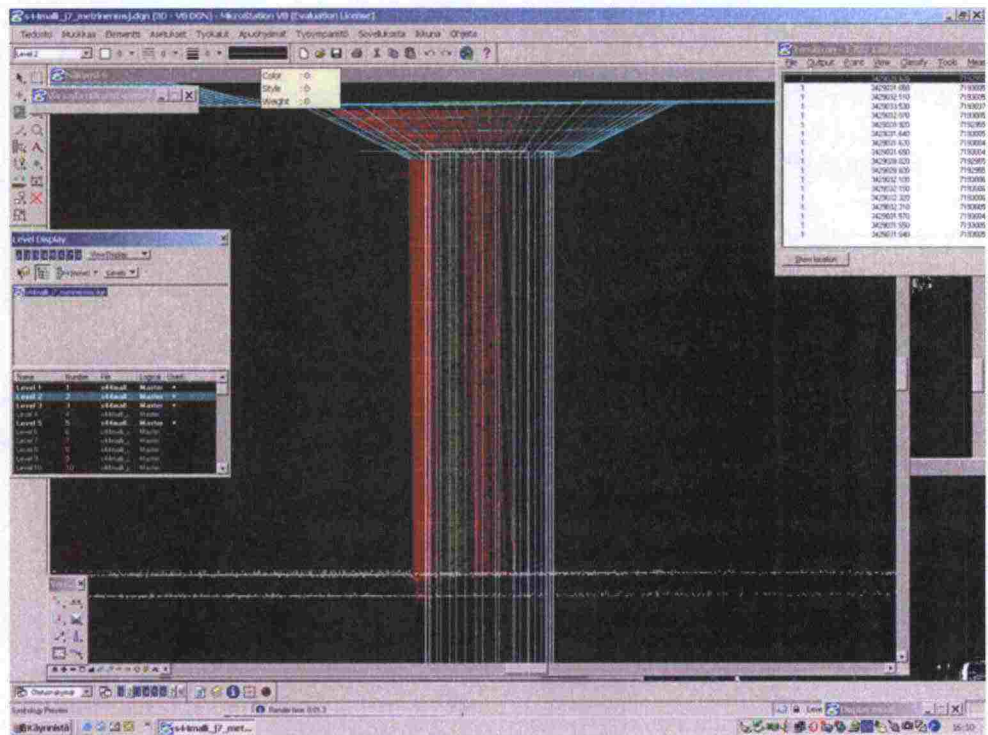
Kuva 59. Käsittelemätön pistepilvi välittömästi muottien purkamisen jälkeen tehdystä laserkeilauksesta (Suonenjoki).



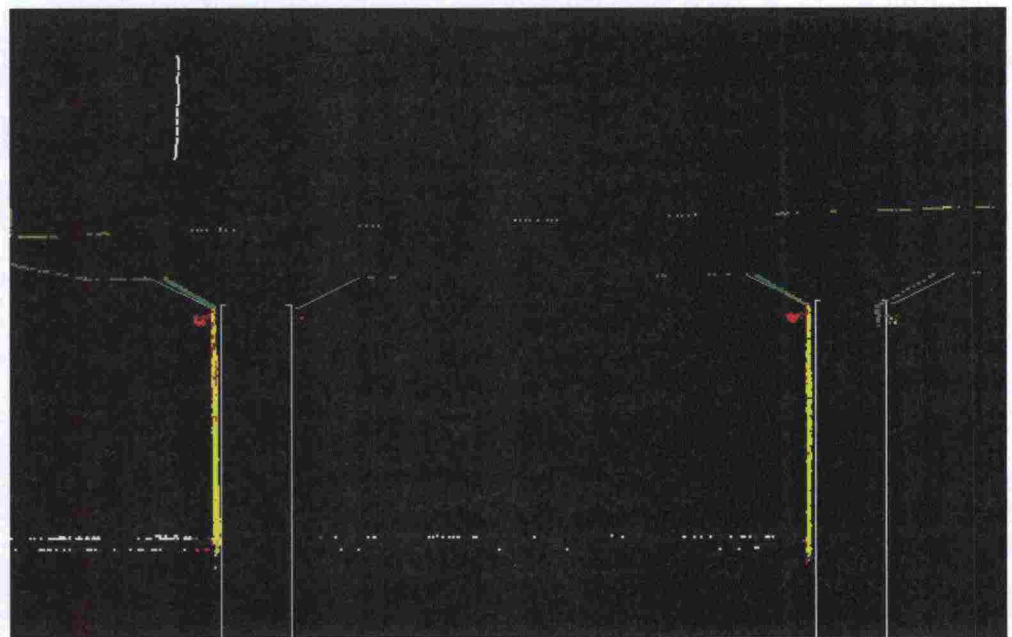
Kuva 60. Pistepilvi on mallinnettu geometrisiksi pinnoiksi (valetun betonin toteutumamalli).



Kuva 61. S44-mittausaineiston vertaaminen suoraan suunniteltuun geometriamalliin: vihreä väri pisteessä tarkoittaa että sen etäisyys on alle 2 cm, violetin värisen mittauspisteen etäisyys on puolestaan alle 3 cm (Terrasolid Oy).



Kuva 62. S44-sillan yhden pilarin mittausaineiston vertaaminen suunnitelmamallista muodostettuun kolmioverkkoon (Terrasolid Oy).



Kuva 63. S44-sillan graafista mittapointeiden analysointia (Terrasolid Oy).

4 PÄÄTELMÄ

4.1 Kehitetyn suunnittelu- ja mittausjärjestelmän arviointi

Teräsbetonisiltöjen geometria on siltasuunnittelijalle tyypillisesti hyvin haastava. Ohjelmistokehityksessä otettiin hyvä askel suuntaan, jossa toteutetaan siltasuunnittelijan tarvitsemia työkaluja. Oleellisimpia ovat sillan geometrian muodostamista automatisoivat työkalut. Suuntana on, että teräsbetonisiltöjenkin suunnittelussa siirrytään yhä enemmän ja yhä nopeammin kolmiulotteiseen mallintamiseen. Hyvin oleellista oli, että tiegeometria voitiin suoraan lukea sisään ja tehokkaasti hyödyntää sillansuunnittelussa. Oleellista tässä tiedonsiirtovaiheessa on geometrian tarkkuuden säilyttäminen sekä geometriaan liittyvien tunnistetietojen säilyttäminen.

Mittaustiedon siirto suunnittelujärjestelmästä mittauksiin osoittautui käytännössä toimivaksi. Yhtenä perustavoitteena oli korvata 3D-mallinnuksella aiemmin erikseen luotu mittaussuunnitelma. Tehtyjen kokeiden perusteella suunnittelijan luoma sillan tarkka 3D-geometriamalli toimii erittäin hyvin työmaan mittauksen lähtötietona. Tällöin suunnittelijan on mahdollisuuksien mukaan jo etukäteen tiedostettava mittauksen asettamat tarpeet mallin sisällölle ja tarkkuudelle. Projektissa suoritettiin runsaasti erilaisia mittauskokeita robottikymetriä ja laserkeilainta käyttäen. Tuloksen dokumentoivat havainnollisesti siltatyömaille soveltuvia mittausmenettelyitä. Laserkeilaus vaikuttaa tekniikkana soveltuvan erinomaisesti siltatyömaan tuotantoa ohjaaviin ja tarkastaviin mittauksiin. Laserkeilausta kokeiltiin myös lähtötietojen mittauksiin eräässä sillan korjaushankkeessa. Ensimmäiset kokemukset olivat erinomaisen lupaavia. Lopullisia tuloksia raportoidaan myöhemmin erikseen.

MicroStationiin kehitettyä "TerraBridge"-sovelluksen kaikkia tarpeellisiksi määriteltyjä toimintoja ei saatu projektissa vielä toteutettua. Erityisesti esikohotustoimintojen määrittely ja toteutus jäivät projektissa vielä keskeneräiseksi. Myös siltasuunnittelijan käyttöliittymä jäi viimeistelemättä. Työmaan käyttöön MicroStation-CAD-ohjelmisto vaikutti ehkä liian laajalta. Lukuisten eri mittaussovellusten käyttö osoittautui myös ainakin nopealla projektiaikataululla vaikeaksi omaksua ja hallita työmaaolosuhteissa. Esiintyneet ja havaitut ongelmat ovat kuitenkin varmuudella ratkaistavissa koulutuksella ja käyttöliittymiä hieman kehittämällä.

Teräsbetonisiltöjen suunnittelun osalta oleellisia jatkokehitystarpeita ovat esimerkiksi poikkileikkauksen ja reunapalkin muodon määrittäminen, kansirakenteen mallintaminen tiegeometrian avulla (pursotus), tukilinjojen määrittäminen, luiskien mallinnus, päätyjen ja siipimuurien sovittaminen luiskiin, aukko vaatimusten tarkastelu, mallien muokkaamisen helpottaminen, perustusten määrittäminen perustustason mukaan, paalujen mallinnus määritettyyn tasoon (arvioitu tunkeutumissyvyys, kalliopinta) sekä kaivantöiden mallintaminen. Myös kytkentää sillan yleisiin laatuvaatimuksiin ja niihin kehitettyihin tietöjärjestelmäsovelluksiin (SYL, SILAVA) tulisi jatkossa kehittää tarkoituksenmukaiseksi katsotulla tavalla.

Geometriamallia tulisi jatkossa täydentää myös materiaali- ja rakennetiedoilla. Tarvittavia ja hyödyllisiä liitettäviä tietoja ovat esimerkiksi sillan laadunvalvontaa koskevien ohjeiden ja attribuuttien liittäminen geometriamalliin.

Oleellisia materiaali- ja rakennetietoja ovat mm. betonin lujuus ja pak-
kaskenkestävyys, teräsosien laatu ja pintakäsittely, muotittavien pintojen
määrittelyt, vesieristettävien pintojen ja vesieristysrakenteiden määrittelyt,
pintarakenteiden ja päällysteiden (asfatti, betonikiveys) määrittelyt, laatu-
vaatimukset mittauksia varten. Rakennustöitä varten tarvitaan lisäksi raken-
teen muodonmuutoksista johtuvan esikohotusmuodon kytkeminen malliin.
Yksinkertaistettuna tämä voidaan tehdä mallintamalla arvioidut poikkeamat
esimerkiksi aukon keskellä, aukon neljännesspisteissä sekä tukilinjoilla ja sil-
lan päissä.

4.2 3D-toimintaprosessin käyttökelpoisuus silta-alalla

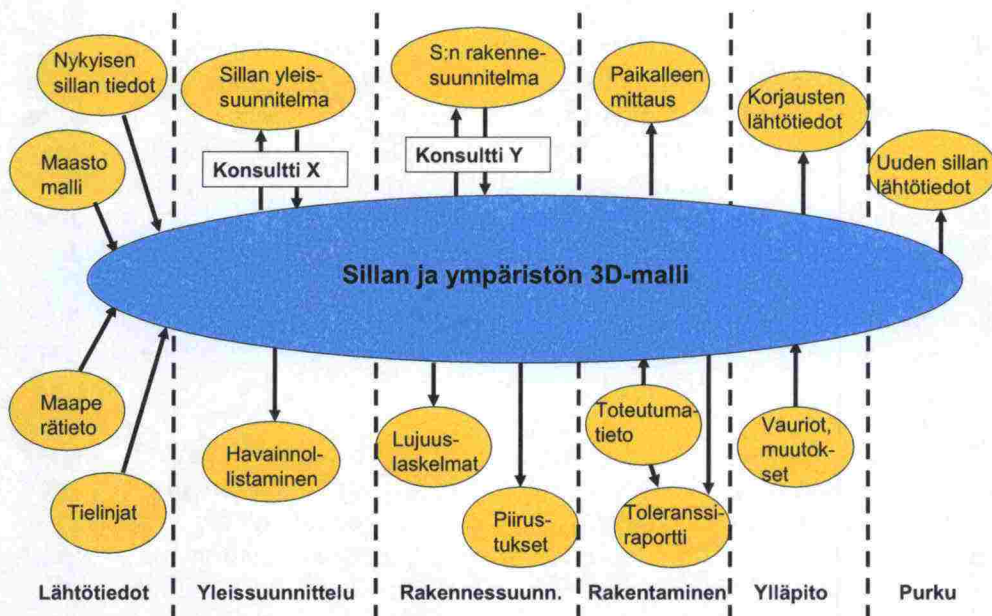
Silta-alalla geometriatiedon hallinta luo perustan ja rungon siltojen suunnitte-
lun ja rakentamisen onnistumiselle. Sillan kansi- ja päällysrakenteet on
suunniteltava tarkasti tiegeometrian mukaisesti ja siihen liittyväksi yhdeksi
osaksi. Siltaan tarvittavat alusrakenteet riippuvat oleellisesti siltapaikan
maastogeometriasta sekä maaperän ominaisuuksista. Dimensioiltaan silta
on yleensä niin suuri, että rakennustyöt on välttämättä tehtävä pidemmällä
aikavälillä vaiheittain jaksoteltuna. Tällöin yhden yhtenäisen ja tarkan toimin-
takoordinaatiston perustaminen, ylläpito ja siinä työskentely on ainoa mah-
dollisuus rakennustöiden läpivientiin. Geometriatiedon tarkka hallitseminen
läpi kokonaistoimintaprosessin on sillan suunnittelun ja rakentamisen kes-
keisimpiä ellei kaikkein keskeisin avaintehtävä. Tiedonkulku tulee hallita var-
haisista lähtötietojen mittauksista suunnitteluun, jossa lähtötiedoista jaloste-
taan mahdollisimman tarkasti optimaalinen tuotegeometria. Edelleen suun-
nittelun tuottamasta tiedosta poimitaan tai jalostetaan työmaan eri mittauk-
siin tarvittavat ohjaustiedot joihin verrataan mitattuja toteutumattomia tietoja. Täten
siltojen geometrianhallinnan tehostamisen ja parantamisen kehittämis-
panokset kohdentuvat toimintaprosessin kehittämisen kaikkein merkittävimpään
ja tärkeimpään ytimeen.

Sillat kytkeytyvät laajemmin tarkasteltuna yhdeksi osaksi tieväylien suunnit-
telua ja rakentamista. Tässä kokonaisuudessa tietojen siirtämisessä ja jalos-
tamisesta osavaiheesta toiseen vaikuttaa edelleen esiintyvän ongelmia, tie-
tokatkoksia ja osaamattomuutta. Tarvittavia tiegeometriatietoja ei vielä ylei-
sesti osata siirtää toimintaprosessin osavaiheesta toiseen. Siirtyminen uu-
teen 3D-toimintamalliin vaikuttaa ensimmäisten kokemusten perusteella ole-
van hyvin perusteltavissa. Hyötyjä todettiin saavutettavan jo pelkästään sil-
lansuunnittelussa. Sillansuunnitteluun projektissa kehitettiin uusia pursotus-
tyyppisiä mallinnustyökaluja teräsbetonisiltojen tyypillisten eri rakenneosien
mallintamiseen. 3D-geometriamallin täydentynee tulevaisuudessa yhä
enemmän tuotemallityyppiseksi geometriatiedon lisäksi myös muuta tietoa
sisältäväksi malliksi.

Oleellista on myös suora tiedonsiirtoyhteys työmaan mittaussuunnitteluun ja
mittauksiin. Sillan 3D-mallista voidaan poimia paikalleenmittauksiin ja laa-
duntarkastusmittauksiin kulloinkin tarvittavaa geometriatietoa ilman erillistä
koordinaattien laskentaa. Myös reaaliaikainen CAD/CAM-tyyppinen työsken-
tely on mahdollista. Tällöin takymetrillä mitatut koordinaatit näkyvät CAD-
mallissa välittömästi mittauksen jälkeen. CAD-mallista voidaan myös ohjata
takymetrin mittaustoimintoja esimerkiksi pisteen paikalleenmittauksessa.
Geometriseen malliin voidaan liittää tunnistetietoa myös mittausten suoritus-

ta varten. Graafinen CAD-käyttöliittymä vaikuttaa myös hyvin soveltuvan mit-
tausteknikkojen mitaussuunnittelutyökaluksi. Koulutusta hallittuun käyttöön-
ottoon ja virheettömmään käyttämiseen kuitenkin varmasti tarvitaan. Sähköistä
tiedonsiirtoa eri osapuolten kesken tulisi jatkossa kehittää. Oleellisinta tie-
donsiirrossa on tietosisältö (tarkka 3D-malli) sekä tunnettu laajasti käyttökel-
poinen formaatti (avoimuusperiaate). Tulevaisuuden mahdollisuuden on esi-
merkiksi XML-pohjainen formaattirakenne.

Geometrialtaan vaativien kappaleiden suunnittelussa 3D-mallintaminen on
osoittautunut perinteisiä 2D-suunnittelumenetelmiä tehokkaammaksi ja tar-
kemmaksi. Suunnittelutoimistojen kokemuksen mukaan mittavirheiden mää-
rä 3D-suunnittelussa vähenee oleellisesti. 3D-suunnitteluun siirtymisen kyn-
nystä voidaan vähentää koulutuksella. Mitä kehittyneemmillä työkaluilla 3D-
suunnittelua tehdään, sitä kustannustehokkaampaa se on 2D-piirtämiseen
perustuvaan suunnitteluun verrattuna. 3D-suunnitteluaineiston käyttäminen
rakenneanalyysien (lujuuslaskelmien) lähtötietoina tuo merkittäviä hyötyjä.
Kokonaisprosessin kannalta mitaussuunnittelun työmäärän oleellinen vähe-
neminen tuo merkittäviä etuja. Geometriamallin hyödyntäminen rakenteiden
valmistuksessa tuo tarkkuutta ja vähentää työvirheitä.



Kuva 60. 3D-mallin hyödyntämismahdollisuuksia sillan elinkaaren aikana (Matti Piispanen).

Työmaalla nykyaikaisilla 3D-mittaustekniikoilla eli lähinnä robottitakymetrilla ja laserkeilaimella pystytään suoraan hyödyntämään suunnittelijan tekemään sillan 3D-geometriamallia. Tyypillisesti paikalleenmittaukset suoritetaan takymetrilla. Pistepilviä mittaavat laserkeilaimet vaikuttavat kokeiden perusteella soveltuvan muottien ja siltöjen tarkastusmittauksiin erinomaisesti. Kehitetyillä uusilla työkaluilla voidaan suoraan ja havainnollisesti tarkastella muoteissa ja valmiissa silloissa olevia sijainti-, mitta- ja muoto-poikkeamia kolmiulotteisesti. Poikkeamia voidaan havainnollistaa poikkeamien suuruuden mukaan värjäämällä. Jatkotutkimuksen ja -kehityksen tehtäväksi jää kolmiulotteiseen toimintamalliin paremmin sopivan toleranssijärjestelmän uudistaminen.

Laserkeilaimet pystyvät pistepilvimittausperiaatteen ansiosta sellaisiin tarkastaviin mittauksiin, joita ei ole voitu tehdä takymetrillä. Esimerkiksi muotin tarkastusvaiheessa mitatut ja havaitut poikkeamat voidaan korjata jo ennen valuvaihetta. Mittaustarpeita esiintyy myös vanhojen siltojen sektorilla runsaasti. Tarkat tiedot mittapoikkeamista ja esimerkiksi painumista helpottaisivat jatkosuunnittelua. Mittaustuloksista voidaan tuottaa myös toteutumapiirustuksia. Yleensä laserkeilaimien omista käyttö- ja analysointiohjelmistoissa on perustyökaluja pistepilven geometriseen mallinnukseen. Teollisuusmittauksissa mallinnus on vakioprofiilien kautta helpompaa kuin tuotemuodoillaan vapaammassa betoniteollisuudessa.

Mittaustulokset antanevat runsaasti kaikenlaista uutta tietoa rakentamisesta kuten esimerkiksi esikohotusten oikeellisuudesta ja sekä eri työvaiheissa saavutettavasta tarkkuudesta. Siltojen toleransseja yhdessä toiminnallisuusvaatimusten ja mittausmenetelmien kanssa tulisi samoin tarkastella ja uudistaa uuden tekniikan ja kertyvän mittaustiedon mukaan. Toleransseja tulisi priorisoida tärkeisiin ja vähemmän tärkeisiin. Tarpeettomat toleranssimäärittelyt voisi poistaa. Uusia mittaustekniikoita voidaan hyödyntää myös vanhojen siltojen korjaamisessa ja ylläpidossa. 2D-suunnitelmat eivät useinkaan vastaa tarkoin olemassaolevaa siltarakennetta.

4.3 Jatkotoimenpide-ehdotukset

Älykäs silta –projekti ehdottaa silta-alan 3D-kehitystyötä jatkettavan. Hyödyt sähköiseen 3D-kokonaistoimintaprosessiin siirtymisestä ovat ilmeiset. Tässä projektissa keskityttiin siltojen suunnittelu- ja mittausmenetelmien kehittämiseen, jossa kehitystyötä on nähtävissä edelleen mm. laatuvaatimusten ja toleranssien kytkemiseksi saumattomaksi osaksi hallittuja mittauksia. Laajemmin tarkasteltuna prosessiin kytkeytyvät myös maaston pintamallin, maaperämallin sekä vanhojen rakenteiden mallien hyödyntäminen suoraan sillan 3D-suunnittelussa. Luotua geometriamallia voidaan edelleen hyödyntää rakennelaskennassa, piirustustuotannossa ja tulevaisuudessa myös työmaan rakennuskoneiden numeerisessa ohjauksessa. Sillan kolmiulotteinen geometrinen mallintaminen on myös merkittävä askel kohti tuotemallipohjaista suunnittelua, jossa geometriaan liitetään yhä enemmän erilaista ominaisuustietoa. Perinteistä investointinäkökulmaa laajentavat siltojen käytön ja ylläpidon prosessin kytkeminen osaksi nykyprosessia sekä laajimmin sillan elinkaaren aikainen hallintaprosessi.

Projekti ehdottaa silta-alan eri organisaatioille mm. seuraavia konkreettisia jatkotoimenpiteitä:

- Oulun yliopisto ja muut tutkimus- ja koulutuslaitokset: alan tieteellisen tutkimuksen jatkaminen sekä koulutuksen kehittäminen
- Tiehallinto: siltapaikka-asiakirjaohjeistuksen kehittäminen, sähköiset siltapaikka-asiakirjat, siltojen toleranssiuudistus, siltarekisterin kehittäminen, tuotemallipohjaisen suunnittelun kehittäminen, kehitystyön mahdollistavan jatkuvan pilotoinnin järjestäminen, suurten siltojen 3D-geometrianhallinnan pilotoiminen
- Ratahallintokeskus: jatkuvaa yhteistyötä Tiehallinnon kanssa alan osaamisen eteenpäinviemiseksi, esimerkiksi Oulu-Seinäjoki –rataosuudelle kehittämis- ja pilotointimahdollisuuksien tarjoaminen
- Terrasolid Oy: teräsbetonisiltojen suunnitteluun ja mittauksiin soveltuvien MicroStation-sovellusten viimeistely ja tuotteistaminen, maalaser-

- keilauksen mallinnusohjelmien kehittämisen ilmalaserkeilausten pohjalta
- WSP SuunnitteluKORTES Oy ja muut siltasuunnittelutoimistot: sillan suunnittelun 3D-menetelmien edelleenkehittäminen ja käyttöönottoaminen, hyödyntämisen aloittaminen siltakonsultoinnin vientihankkeissa
 - Tieliikelaitos, Skanska-Tekra Oy ja muut urakoitsijat: siltakokonaistointaprosessin kehittämisen, suunnittele ja toteuta -toimintatavan edelleenkehittäminen, teknologian käytännön hyödyntämisen aloittaminen
 - Oulun kaupunki: alan tutkimuksen ja kehittämisen mahdollistavan jatkuvan pilotoinnin järjestäminen omalta osaltaan, oman tietokantapohjaisen 3D-siltarekisterin kehittämisen, keskitetyn tietovaraston luominen, elinkaari-prosessin kehittämisen
 - Tekla Oy: paikallaanvalettavat teräsbetonirakenteet – uusia työkaluja, maastomallin ja tiegeometrian sisäänluku, maaperämallinnuksen kehittäminen, tiedonsiirron kehittämisen suunnitelmamallista mittauksiin
 - Geotrim Oy, Leica Nilomark Oy ja muut mittaustekniikkayritykset: kehittyvien 3D-mittaustekniikoiden sekä mittaustulosten analysointiohjelmistojen kehittämisen silta-alan tarpeiden mukaisesti, mittaussuunnitelmien kehittämisen, kalibrointimenetelmien kehittämisen.

LÄHDELUETTELO

Boehler, W. & Bordas Vicent, M. & Marbs, A. (2003) Investigating Laser Scanner Accuracy. Mainz, Germany, Institute for Spatial Information and Surveying Technology. Esitelmä CIPA-symposiumilla Turkissa 30.9.-4.10.2003.

[CALLIDUS] Callidus precision systems, brochure, 2002, Callidus Precision Systems GmbH.

[CYRA] CYRA-seminaariaineisto, 2003, Leica Nilomark Oy, Espoo, Seminar Material Folder.

[Foltz] Foltz, L. B., 2000, 3D Laser Scanner Provides Benefits for PennDOT Bridge and Rockface Surveys. Professional Surveyor, May 2000, 4 p.

[Gordon] Gordon, S. & Lichti, D. & Stewart, M., 2001, Application of a High-resolution, Ground-based Laser Scanner for Deformation Measurements. The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 19-22 March 2001, Orange, California, USA, pp. 23-32.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. & Pulkkinen, M. (2003) Connecting 3-D Concrete Bridge Design to 3-D Site Measurements. ISARC'2003, 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-24 September 2003. Eindhoven, the Netherlands, pp. 259-264.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. & Pulkkinen, P. (2004) Modelling Measurements and Measuring Models – Problems and Solutions of 3-D Geometrical Control in Concrete Bridge Engineering. ISARC'2004, 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-25 September 2004. Jeju, Korea, pp. 81-84.

[Johansson] Johansson, M., 200?, Explorations into the Behaviour of three different high-Resolution Ground-based Laser Scanners in the Built Environment, pp. 33-38.

[Koski] Koski, J., 2003, Laserkeilaus – uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen. Maankäyttö 4/2001, s. 24-26.

[Koski] Koski, J., 2002, Laserkeilauksen perusteet ja Cyrax 2500 -laserkeilausjärjestelmä. Espoon-Vantaan teknillinen ammattikorkeakoulu, Maanmittaustekniikan koulutusohjelma, insinöörityö, 116 s.

Leica Keilausuutiset 2/2004 – sillat mittauskohteena. Espoo, Leica Nilomark Oy, 3 s.

Lemmens, M. (2004) 3D Lasermapping. GIM International, December 2004, pp. 44-47.

[McManus] McManus S., 2002, Secrets of the past. Bd&e, First Quarter 2002, www.bridgeweb.com, 2 p.

[Santala & Joala] Santala, J. & Joala, V., 2003, On the Calibration of a Ground-based Laser Scanner. FIG'2003, Paris, April 13-17, 2003, 7 p.

SYL 1, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Yleiset Ohjeet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 22 s.

SYL 2, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Maa- ja pohjarakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 51 s. + liitteet.

SYL 3, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Betonirakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 80 s. + liitteet.

SYL 4, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Teräsrakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 75 s. + liitteet.

SYL 5, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Teräsrakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 13 s.

SYL 6, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Kannen pintarakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 38 s. + liitteet.

SYL 7, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Varusteet ja laitteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 25 s. + liitteet.

[Wistbacka] Wistbacka, J., 2003, Vinoköysisillan ulokeasennusvaiheen analysoinnin erityispiirteet. Rakennustekniikka 5/2003, s. 64- 66.

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-459-1
TIEH 3200924