

Anssi Honkala

Geovahvisteiden toiminta harvennetun syvästabiloinnin varaisessa tiepenkereessä

Tiehallinnon selvityksiä 32/2003



Anssi Honkala

Geovahvisteiden toiminta harvennetun syvästabiloinnin varaisessa tiepenkereessä

Tiehallinnon selvityksiä 32/2003

Kannen kuvat: Anssi Honkala

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-092-8
TIEH 3200820

SSN 1459-1553 (www.tiehallinto.fi)
ISBN 951-803-093-6 (www.tiehallinto.fi)
TIEH 3200820-v (www.tiehallinto.fi)

Multiprint Oy
Vaasa 2003

Julkaisua myy/saatavana:
Tiehallinto, julkaisumyynti
Telefaksi 0204 22 2652
E-mail: julkaisumyynti@tiehallinto.fi
<http://www.tiehallinto.fi/thohje/index.htm>

TIEHALLINTO
Tekniset palvelut
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 150

Asiasanat: syvästabilointi, teräsverkot, geotekstiilit, geovahvisteet
Aiheluokka: 62

TIIVISTELMÄ

Söderkullan koekohteen tarkoituksena oli selvittää voidaanko matalien penkereiden alle tehtävien syvästabilointipilarien etäisyyttä kasvattaa matalilla penkereillä vahvisteiden avulla.

Koerakennealue koostui neljästä alueesta, joissa kahdessa käytettiin vahvisteita ja suurta pilariväliä. Yhdellä alueista käytettiin suurta pilariväliä ilman vahvistetta. Vertailualueena käytettiin aluetta jossa pilarit oli asennettu kolmioverkkoon ilman vahvistetta. Tällä alueella käytettiin muita alueita pienempää pilariväliä.

Kohteessa käytettiin instrumentteina maanpaine-, venymä- ja letkupainumamittareita.

Koekohteen rakentaminen aloitettiin talvella 1998-1999. Tämän jälkeen koekohteen käyttäytymistä on seurattu in-situ-mittauksin vuoden 2002 keuhään asti. Lisäksi vuoden 2002 keuhällä suoritettiin koekuormitus lastatulla kuorma-autolla. Koekuormituksella pyrittiin selvittämään rakenteiden käyttäytymistä staattisessa kuormitustilanteessa pengerkuormaa suuremmilla kuormilla.

Alueen käyttäytymistä mallinnettiin sekä FE-menetelmillä (Abaqus ja Plaxis) sekä British Standardin ja Bauchtechin mukaisesti.

Abaquksella voidaan mallintaa kohteita, joissa konsolidaatio ei vaikuta. Abaquksella päästiin suuruusluokaltaan samoihin tuloksiin vahvisteellisilla alueilla kuin maastomittauksilla havaittiin. Perinteisimmillä menetelmillä mitoitettaessa suurin ero syntyi vahvisteiden käyttäytymisessä. Elementtimenetelmät antoivat keskenään samansuuruisia arvoja. Saadut venymät olivat suuruusluokaltaan paljon pienempiä kuin mitoituksilla saadut.

Seurantamittaukset osoittivat selvästi, että käytetäessä vahvistetta pilarien päällä, kuormitukset siirtyvät enemmän pilareille verrattuna siihen, että vahvistetta ei ole. Venymät jäivät mitattujen arvojen ja elementtilaskentatulosten perusteella silti hyvin pieniksi. Pilarien maksimijännitykset vahvisteellisilla alueilla vastasivat tilannetta, jossa kaikki kuormitus siirtyy pilareille.

Painumat kaikilla alueilla tapahtuivat noin 4 kk aikana, mutta vahvisteellisilla alueilla painumat olivat vain kolmasosa vahvisteettomien alueiden painumista.

Varsinkin alueen III käyttäytymisestä voidaan nähdä, että kuormien keskittymien pilareille on edelleen käynnissä vaikka rakentamisesta on aikaa jo 3 vuotta.

Kohteen tulosten analysointi vaatisi vielä tulosten perusteellisempaa käsittelyä. Laskentatulosten mukaan pilarien reuna-alueen ja keskustan välillä on kaksinkertainen jännitysero. Mikäli jännitysjakautuma vastaa todellista, maanpaineantureiden sijainnilla on suuri vaikutus niiden tulosten tulkittavuuteen.

Keywords: deep mixing, reinforcement, geotextiles, geogrids

ABSTRACT

This test case it's mend to study how deep stabilisation will behave if the embankment is very low. In other words, is there any benefit if using reinforcements together with columns

The test area is divided to four different areas, which contain varied structures. The diameter of the columns is 700mm and the shear strength of the columns varies from 160–320 kPa. The space between columns varies from 1.5m (triangle net) to 1.6 m (square net). One of the areas is reinforced with geosynthetic and one area is reinforced with steelmesh.

Settlements, earth-pressures, pore-pressures and the strains of the reinforcement was monitored in each area.

The test embankment is built in the beginning of the year 1999 and the measuring is stopped at the middle of year 2002. In the summer of 2002 the structures were also tested with a heavy truck. The loading test was used to study the behaviour of the structures under a static load.

The test structures are designed with classical methods (BSI) and FEM-calculations.

With Abaqus-program it's possible to calculate structures, which contains no consolidation. Calculations, which are made in the reinforced areas, are in the same level with the measured results. Classical calculation methods varied most when calculating reinforcing forces. The results of the dimensioning FEM-calculations were in the same level. Calculated reinforcing forces are much smaller as the measured results.

According to the follow-up measuring it was obvious that the load on the top of the column is much higher when using reinforcements under the embankment. Earth pressures on the top of the column are so high that practically the entire load is transferred to the column. According to the measurements and calculations the strains are still very small.

The settlements after constructions finished during four months in all of areas. The settlements in the reinforced areas were only 30% compared to the non-reinforced areas.

According to the measuring the load is still concentrating to the columns in the area III.

It's obvious that the results of the measuring and calculations must be studied even more. According to the FEM-calculations the pressures in the middle of the column are much higher as in the edge. In this case it's very important to know the exact placement of the earth-pressure sensor.

ESIPUHE

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ollut selvittää geovahvisteiden toimintaa harvennetun syvästabiloinnin varaisessa matalassa tiepenkereessä. Tutkimus on ollut käynnissä vuosina 1998..2002. Tutkimushanke on toteutettu Tiehallinnon toimesta. Tiehallinnon lisäksi hankkeen rahoitukseen ovat osallistuneet Kaitos Oy ja Rautaruukki Oy.

Tässä loppuraportissa on esitetty tärkeimmät seikat koekohteen rakenteiden mitoituksesta, rakentamisesta, laadunvalvonnasta ja koekuormituksesta sekä johtopäätökset. Raportin on tehnyt Anssi Honkala H&P Maanrakennus Oy:sta. Loppuraportin laadinnassa ovat olleet mukana myös professori Jorma Hartikainen Tampereen teknillisestä yliopistosta sekä DI Mikko Smura Tieliikelaitoksesta ja DI Pentti Salo Tiehallinnosta.

Tutkimuksen suorittamisessa ja koekohteen rakentamisessa ovat mukana olleet: DI Pentti Salo ja työpäällikkö Heikki Hietavirta Tiehallinnosta, työpäällikkö Raimo Rautio, työpäällikkö Tapio Heinonen ja DI Mikko Smura Tieliikelaitoksesta, DI Harri Lähteinen Viatek SGT Oy:stä, professori Pauli Vepsäläinen, DI Matti Lojander ja DI Asko Aalto Teknillisestä korkeakoulusta, professori Jorma Hartikainen ja tekniikan lisensiaatti Jukka Rantala Tampereen teknillisestä yliopistosta sekä DI Anton Palolahti ja DI Jouko Lehtonen.

Helsingissä huhtikuussa 2003

Tiehallinto
Tekniset palvelut

SISÄLTÖ

1	KOHTEEN KUVAUS	9
1.1	Tutkimushankkeen historia ja tavoitteet	9
1.2	Kohteen sijainti	9
1.3	Kohteen pohjasuhteet ja kuormitushistoria	9
1.4	Koekohteen rakenteet	11
2	KOERAKENTEEN SUUNNITTELU JA MITOITUS	16
2.1	Suunnitteluperusteet	16
2.2	Mitoituslaskelmat	16
2.2.1	Mitoitusmenetelmät	16
2.2.2	Pilarien tavoitelujuudet	16
2.2.3	Vahvisteverkot	17
2.3	Elementtilaskelmien tulokset	18
2.3.1	Plaxis-elementtilaskelmat	18
2.3.2	ABAQUS-laskelmat	18
2.4	Laskelmien vertailut	18
2.4.1	Jännitysjakautumat	18
2.4.2	Vahvistevaimat	19
2.4.3	Painumatulokset	19
2.5	Instrumentointi	19
3	RAKENTAMINEN	21
3.1	Rakentamisen henkilöstö ja vastualueet	21
3.2	Aikataulu	21
3.3	Työvaiheiden suoritus	21
3.3.1	Valmistelevat työt	21
3.3.2	Pilarointityö	21
3.3.3	Leikkaustyöt	22
3.3.4	Suojakerroksen rakentaminen	22
3.3.5	Vahvisteiden asennus	22
3.3.6	Instrumenttien asennus	23
3.3.7	Päällysrakennekerrosten rakentaminen	24
3.4	Laadunvarmistus	25
3.4.1	Laadunvalvontakairaukset	25
3.4.2	Pilarointityön laadunvarmistus	28
3.4.3	Mitta- ja sijaintipoikkeamat	28
3.4.4	Kantavuusmittaukset	28
3.4.5	Troxler-mittaukset	29
3.4.6	Huokospainemittaukset	29
3.4.7	Vesinäytteet	29
4	SEURANTAMITTAUSTEN TULOKSET	30
4.1	Painumatulokset	30
4.2	Maanpaineanturit	36
4.3	Venymämittaukset	39
5	KOEKUORMITUS	40
5.1	Koekuormituksen suoritus	40
5.2	Tehdyt mittaukset	40
5.3	Kuormitusten suuruudet	42
5.4	Mittaustulokset	42
5.4.1	Maanpainemittaukset	42
5.4.2	Venymämittaukset	46

6	MITTAUSTULOSTEN JA MITOITUSLASKELMIEN VERTAILUT	48
6.1	Painumatulokset	48
6.2	Jännitysjakautumat	48
6.3	Venymämittaukset	53
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	54

1 KOHTEEN KUVAUS

1.1 Tutkimushankkeen historia ja tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on ollut selvittää mahdollisuutta harventaa syvästabiloinnin pilariväliä lujitteiden avulla ja päästä sitä kautta kustannussäästöihin.

Tutkimuksen yhteydessä tehtiin 80 m pitkä koerakenne liikenteelle jäävälle tielle (Pt 11689 Söderkulla-Nikkilä plv 4260-4340). Koerakenteeseen asennettiin maanpaineantureita, venymäliuskoja lujitteisiin, painumaletkuja ja -levyjä. Mittauksia on tehty vuosina 1999, 2000 ja 2001.

Tutkimuksesta on julkaistu aikaisemmin seuraavat suunnitelmat ja raportit:

- Smura, M., Honkala, A. 1998. Koerakennesuunnitelma. Tielaitos, Helsinki.
- Honkala, A. 1999. Koekohteen rakentamisen raportti. Fundus Oy, Helsinki.
- Honkala, A. 1999. Koekohteen mittaustulosten väliraportti. Fundus Oy, Helsinki.
- Honkala, A. 2000. Koekohteen mittaustulosten raportti vuodelta 2000. Fundus Oy, Helsinki.
- Honkala, A. 2002. Koekuormitus 2002. H&P Maanrakennus Oy, Hämeenlinna.
- Asko, A. 1999. Söderkullan koekohteen FEM-laskelmat (Plaxis 7.1). Teknillinen korkeakoulu, Helsinki.
- Rantala, J. 2002. 3D FE- mallinnus. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.
- Rantala, J. 2002. 3D FE- mallinnus, Verkkolujitettujen pengerten liikennekuormalaskelmat. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.
- Honkala, A. 1999. Harvennettu pilarointi lujitteita käyttäen, käsinlaskentamenetelmien kooste. Tielaitos, Helsinki.

Koerakenne tehtiin varsinaisen parantamishankkeen yhteydessä talvella 1998-1999. Tie otettiin liikenteelle keväällä 1999. Tämän jälkeen kohdetta on vuosina 1999-2002 mitattu jatkuvasti alueelle asennetuista in-situ-mittareista. Vuonna 2002 on tehty lisäkuormitus kuormittamalla kohteen rakenteita kuorma-autolla.

Tässä loppuraportissa pyritään esittämään edellä mainituista raporteista tärkeimmät seikat. Niiden

perusteella on pyritty tekemään johtopäätöksiä kohteen käyttäytymisestä.

1.2 Kohteen sijainti

Koerakenneosuus sijaitsee pt11689 Söderkulla-Nikkilä paaluvälille 4260-4380. Koerakenne rakennettiin samanaikaisesti parannettavan tieosuuden 2300-5500 aikana vuonna 1999.



Kuva 1. Koekohteen sijainti

1.3 Kohteen pohjasuhteet ja kuormitus-historia

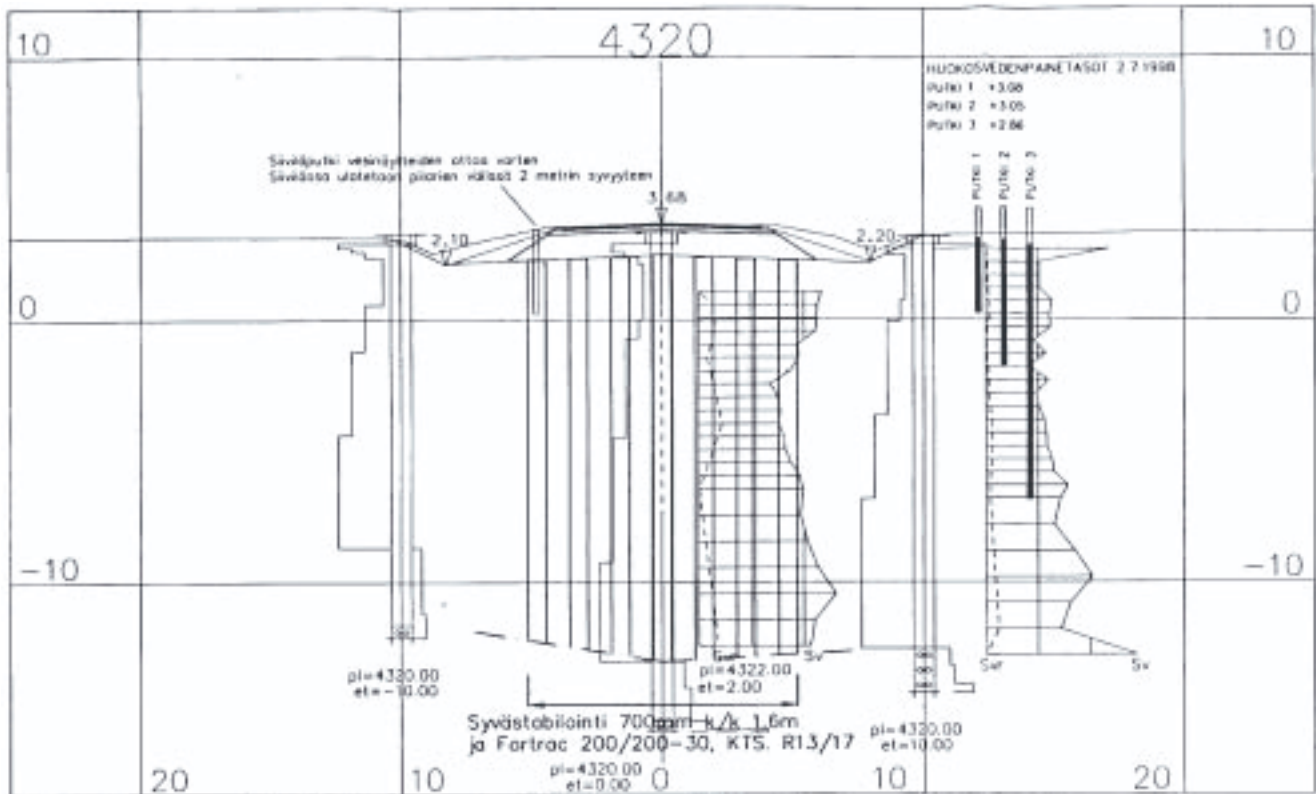
Pohjatutkimusten mukaan koerakenneosuudella on pehmeitä maakerroksia syvimmillään 18 metriä. Maakerrosjako on tien alla pääpiirteissään taulukon 1 mukainen.

Taulukko 1. Koekohteen pohjasuhteet

Syvyys/m	Maalaji	w%	su / kPa	OCR
0-0.5	kuSa	30-60	> 25	YK
0.5-3	silttinen lieju	130-160	10	NK
3-6	silttinen lieju	130-160	10-15	NK
6-10	liSa	80-110	15-20	NK
10-115	laSa	70-90	20-30	NK

Vanha 0.6-0.8 metriä paksu tiepenger on kuormittanut maapohjaa noin 15 vuoden ajan. Kuormitus-aikana tiepenger on painunut 0.3-0.5 metriä. Huokosvedenpainet ovat noin 10 metrin syvyydessä

hieman suurempia kuin ylemmissä kerroksissa (kuva 2). Ilmeisesti tien kuormituksesta johtuva huokosvedenpaine ei ole vielä kokonaan hävinnyt. Ödometrikokeiden perusteella maapohjan konsolidaatiojännitykset ovat vielä noin 5 kPa alle vallitsevien jännitysten.



Kuva 2. Poikkileikkaus paalulta 4320

1.4 Koekohteen rakenteet

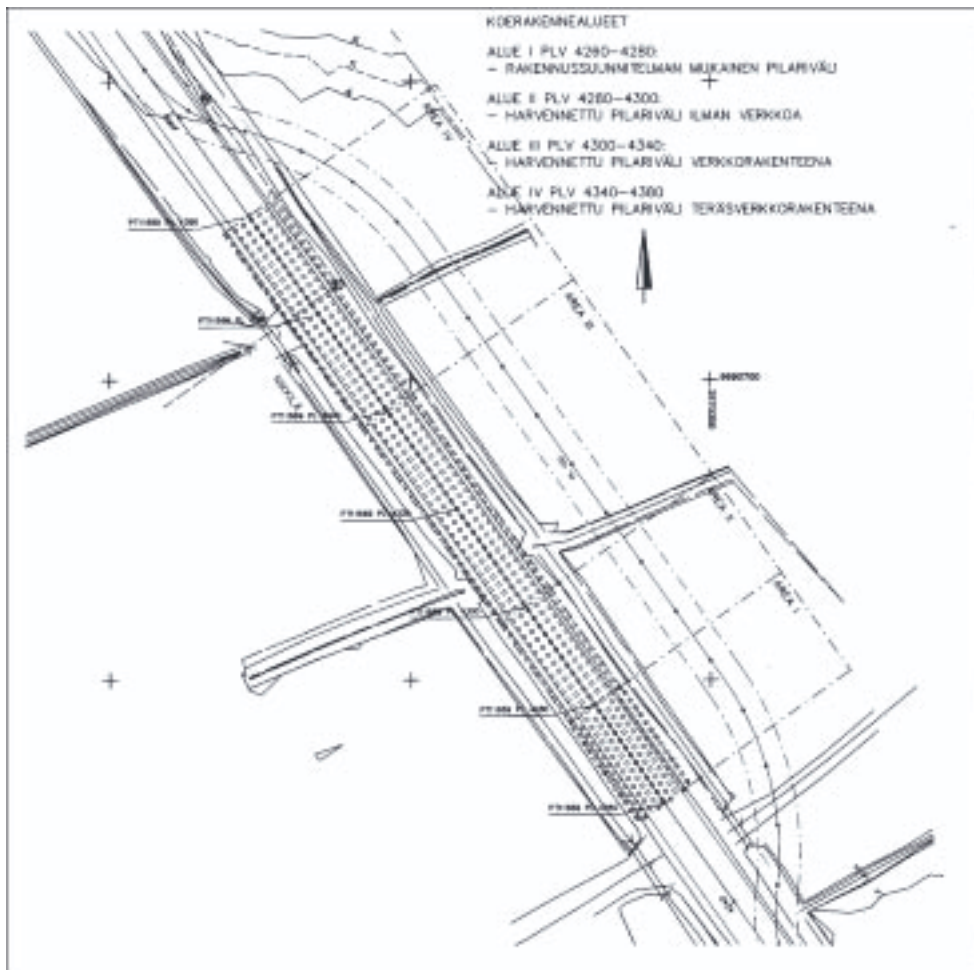
Koerakennealue on jaettu neljään alueeseen (kuva 3). Alueilla on käytetty seuraavia rakenteita:

Alue I: Rakennussuunnitelman mukainen rakenne. Syvästabilointi kolmioverkossa. Pilariväli 1.5 m.

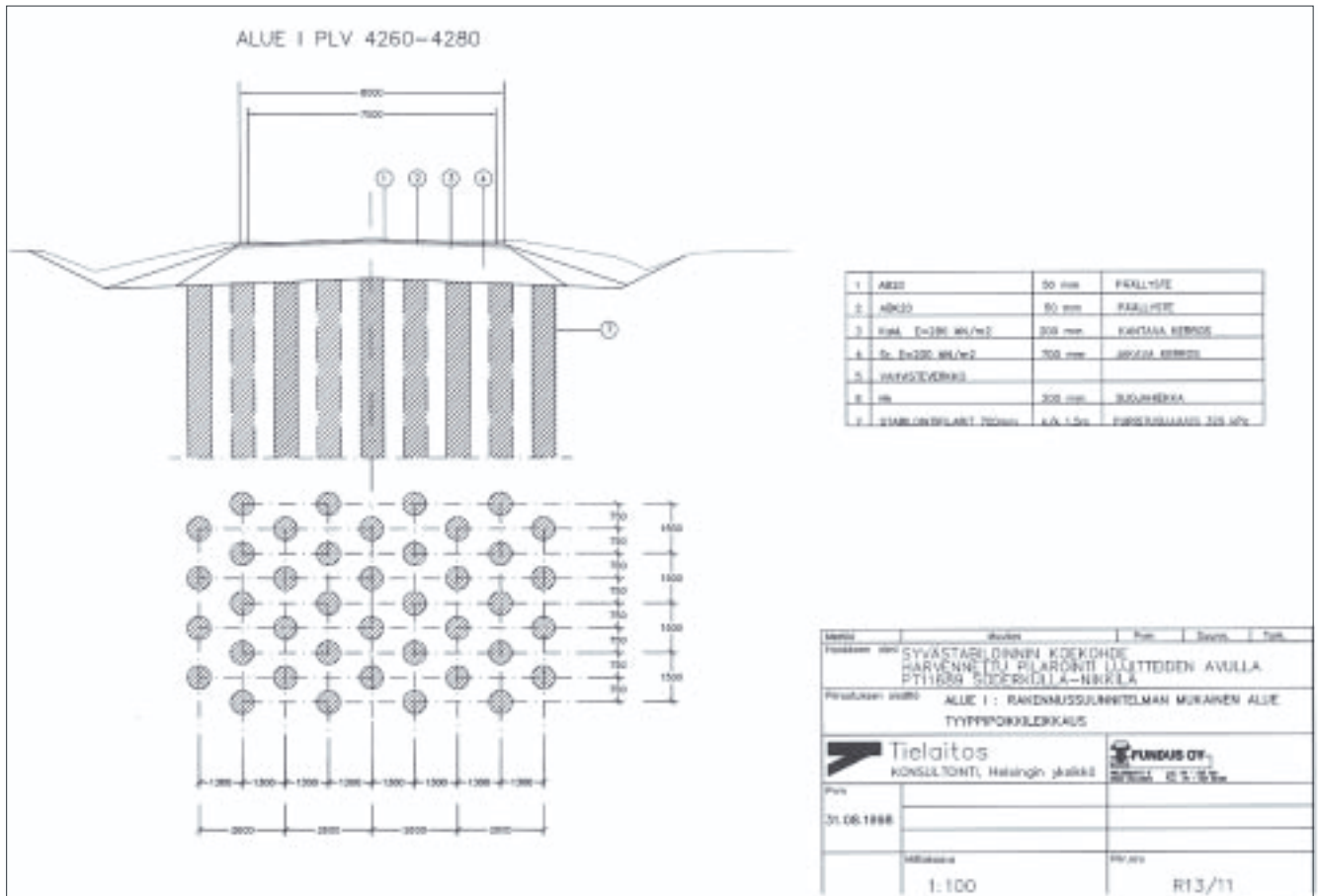
Alue II: Referenssikohde. Syvästabilointi harvennettuna. Pilariväli 1.6m neliöverkkona.

Alue III: Syvästabilointi harvennettuna. Pilariväli 1.6 m neliöverkkona. Vahvisteverkko Fortrac 200/200-30

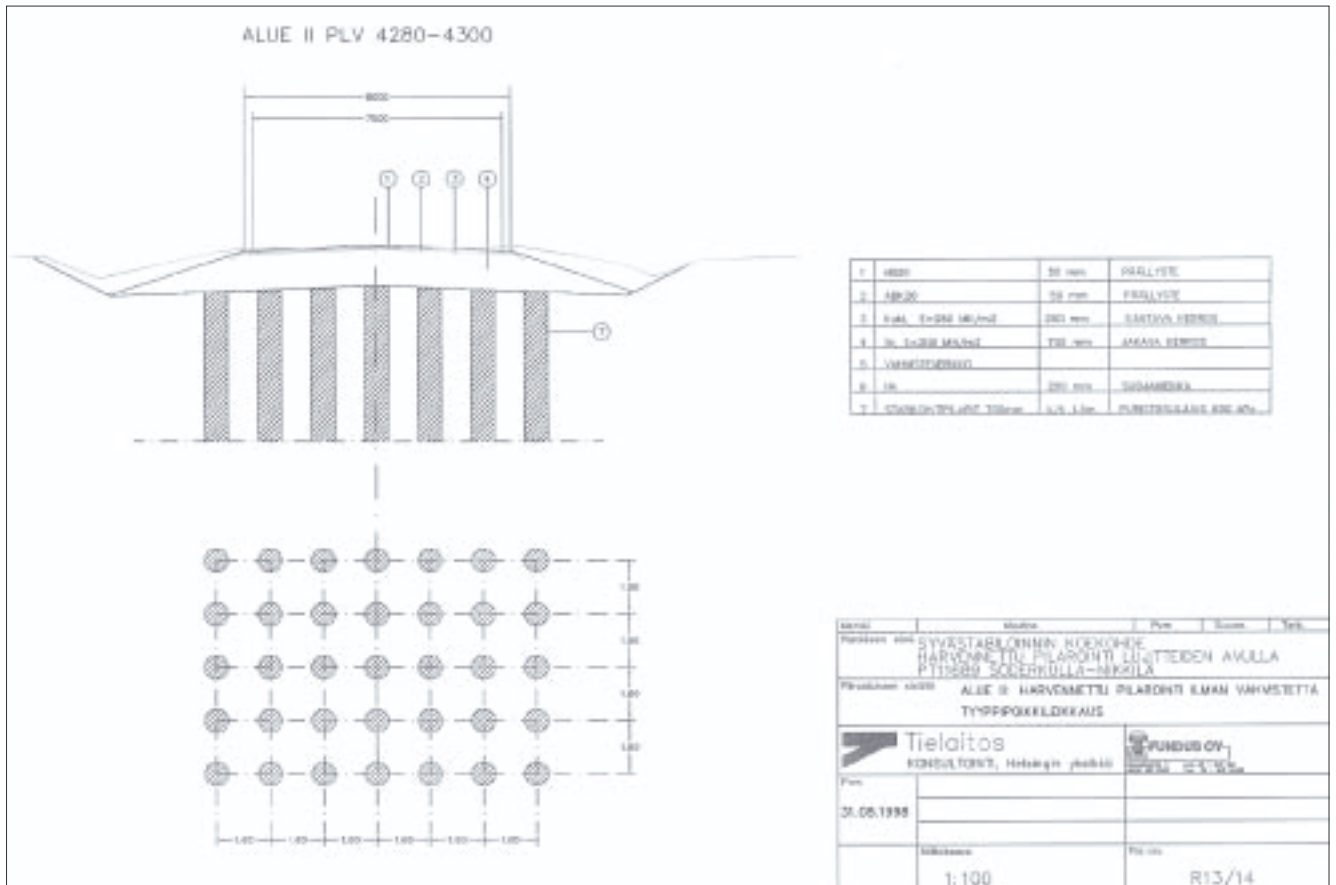
Alue IV: Syvästabilointi harvennettuna. Pilariväli 1.6 m neliöverkkona. Vahvisteverkko teräs B500K 6/6 100-100 kahdessa kerroksessa.



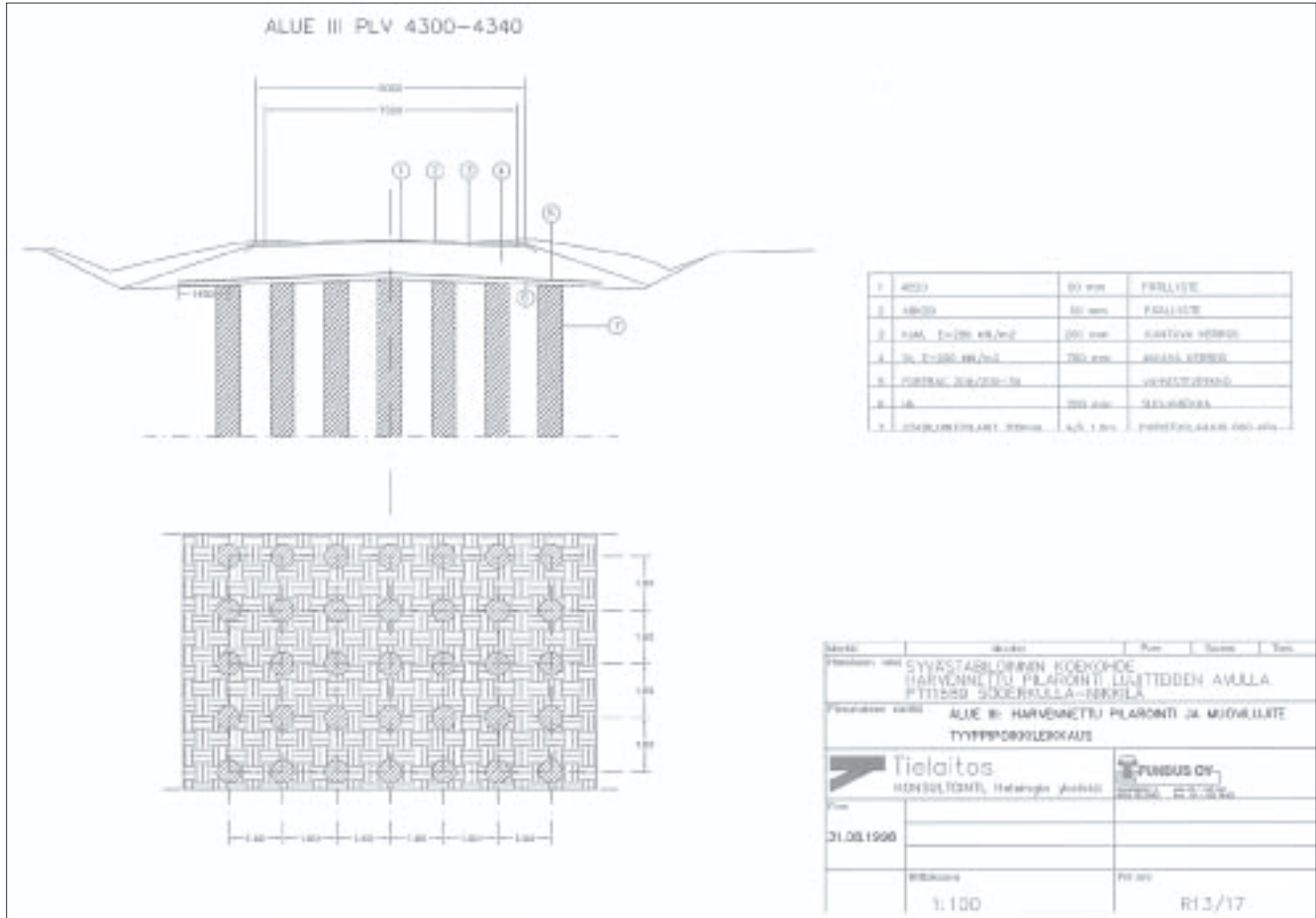
Kuva 3. Koerakennealueet



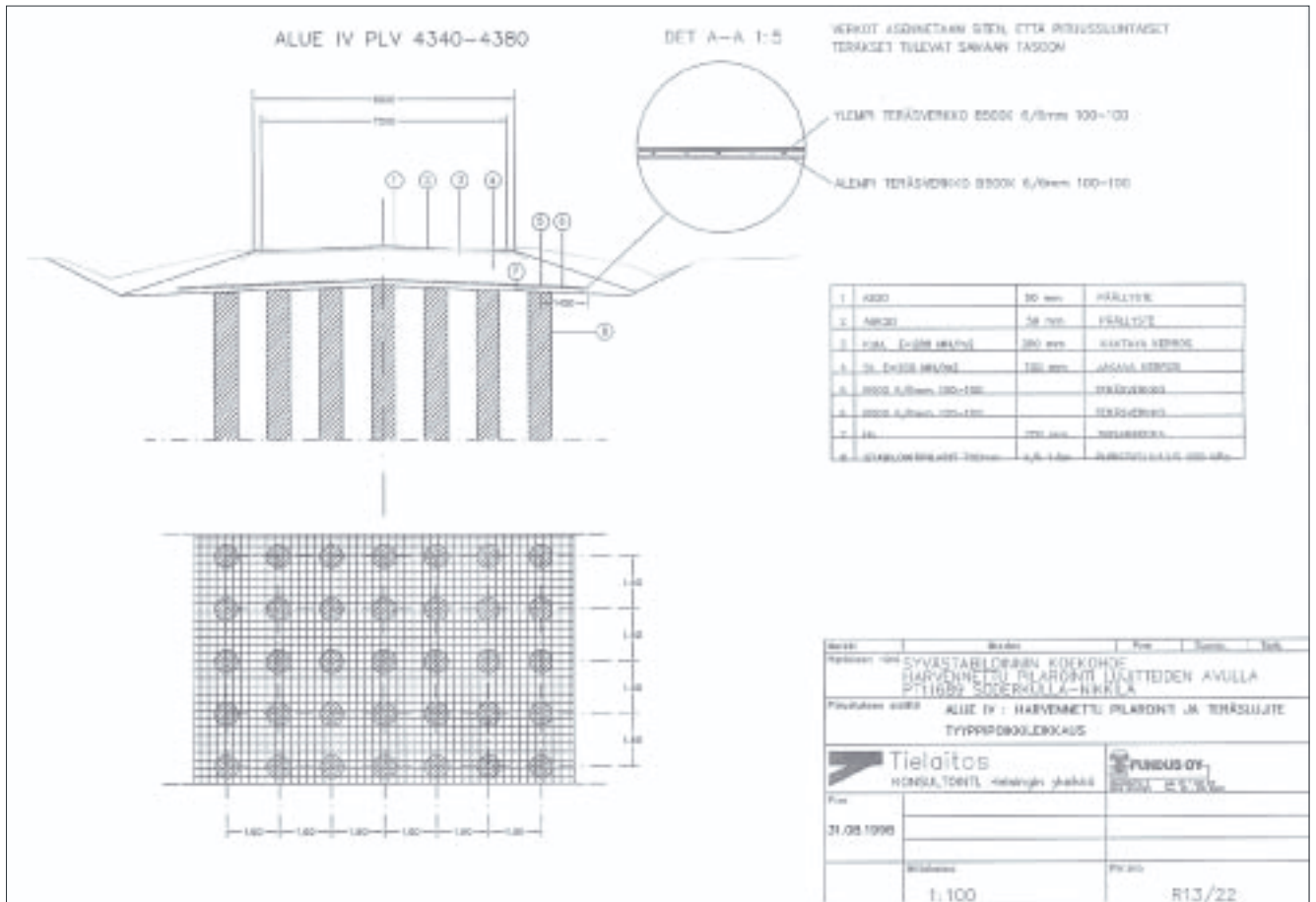
Kuva 4. Alue 1 rakenteet



Kuva 5. Alue II rakenteet



Kuva 6. Alue III rakenteet



Kuva 7. Alue IV rakenteet

2 KOERAKENTEEN SUUNNITTELU JA MITOITUS

2.1 Suunnitteluperusteet

Projektisuunnitelman tavoitteiden mukaisesti koe-kohteella pyrittiin selvittämään mm. seuraavia asioita:

- matalan penkereen holvautumiskäyttäytymisen
- eri vahvistemateriaalien käyttäytyminen pilaroinnin päällä
- painumakäyttäytymisen erot
- mobilisoituvat vahvistevoimat
- käsinlaskentamenetelmien ja kehittyneempien menetelmien (FEM-analyysi) vertailu
- kustannusvertailut vahvisteellisten ja vahvisteettomien pilarointien välillä

Kohteeseen haluttiin yksi ns. riskialue (alue II), jossa varauduttiin jopa korjaustoimenpiteisiin. Alueella käytettiin suurta pilariväliä ilman vahvistetta. Aluetta I käytettiin vertailukohteena. Alueen I pohjanvahvistustyyppi oli sama kuin varsinaisella paikallistien korjaushankkeella.

Suunnittelussa lähdettiin siitä, että kohteet mitoitetaan ensin käsinlaskentamenetelmillä ja varsinaisen seurannan aikana tehdään tarkemmat analyysit FEM-menetelmällä. Tässä kappaleessa esitetään kuitenkin kaikkien laskelmien yhteenvedot. Myöhemmissä kappaleissa laskelmia verrataan mitattuihin arvoihin.

2.2 Mitoituslaskelmat

2.2.1 Mitoitusmenetelmät

Koekohteen suunnitteluvaiheessa koerakenteen mitoituksia tehtiin seuraavilla menetelmillä:

Elementtilaskelmilla:

Plaxis (kokonaispainuma, pilarijännitys, vahvistevoima)
ABAQUS (kokonaispainuma, pilarijännitys, vahvistevoima)

Klassisilla menetelmillä:

pilarijännitys:

British Standard BS 8006:1995
Syvästabiloinnin mitoitusohje TIEL 3200465

vahvistevoima:

British Standard BS 8006:1995
Bautechnik (artikkeli 1998)

Elementtilaskelmista on esitetty erilliset raportit:

- Askola, A. 1999. Söderkullan koe-kohteen FEM-laskelmat (Plaxis 7.1). Teknillinen korkeakoulu, Helsinki.
- Rantala, J. 2002. 3D FE-mallinnus. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.
- Rantala, J. 2002. 3D FE-mallinnus, Verkkolujitettujen pengerten liikennekuormalaskelmat. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.

Käsinlaskentamenetelmistä on tehty erillinen raportti: Honkala, A. 1999. Harvennettu pilarointi lujuitteita käyttäen, käsinlaskentamenetelmien kooste. Tielaitos, Helsinki.

2.2.2 Pilarien tavoitelujuudet

Pilarien tavoitelujuuksien valinta perustui koe-suunnitelmavaiheessa eri mitoitusmenetelmien antamista pilarijännityksistä huolimatta "varmaan" menetelmään. Kaiken kuorman oletettiin menevän pilareille. Kokonaiskuormana käytettiin pengerkuorman lisäksi 20 kPa liikennekuormaa. Tällä tavoin saatiin vaadittavaksi pilarin puristuslujuudeksi 600 kPa. Varmuuskertoimena käytettiin arvoa kaksi. British Standardin mukaisesti mitoitettaessa pilarin puristuslujuudeksi saatiin 146 kPa. Pilarien tavoitelujuudeksi olisi täten riittänyt varmuuskertoimella kaksi 290 kPa.

Alueella I käytetty varsinaisen korjaushankkeen pilariväli perustui mitoitukseen puolilujina pilareina (Syvästabiloinnin mitoitusohje TIEL 3200465). Kuormituksena ei huomioitu liikennekuormaa. Lisäkuormituksena huomioitiin 1m pohjavedenpaineen alentuminen. Laskennan tulos on esitetty kuvassa 8.

2.2.3 Vahvisteverkot

Vahvisteverkkoja mitoitettiin kohdassa 4.2.1 esitetyillä menetelmillä. Seuraavassa on esitetty eri laskentamenetelmien antamia vahvistevaimia:

Alue III: Muovinen vahvisteverkko:

- 1) BSI: 71.1 kN/m
- 2) Bautechnik: 50.7 kN/m

Vahvisteverkoksi on valittu BSI:n mukaisella vahvistevaimolla Fortrac 200/200-30.

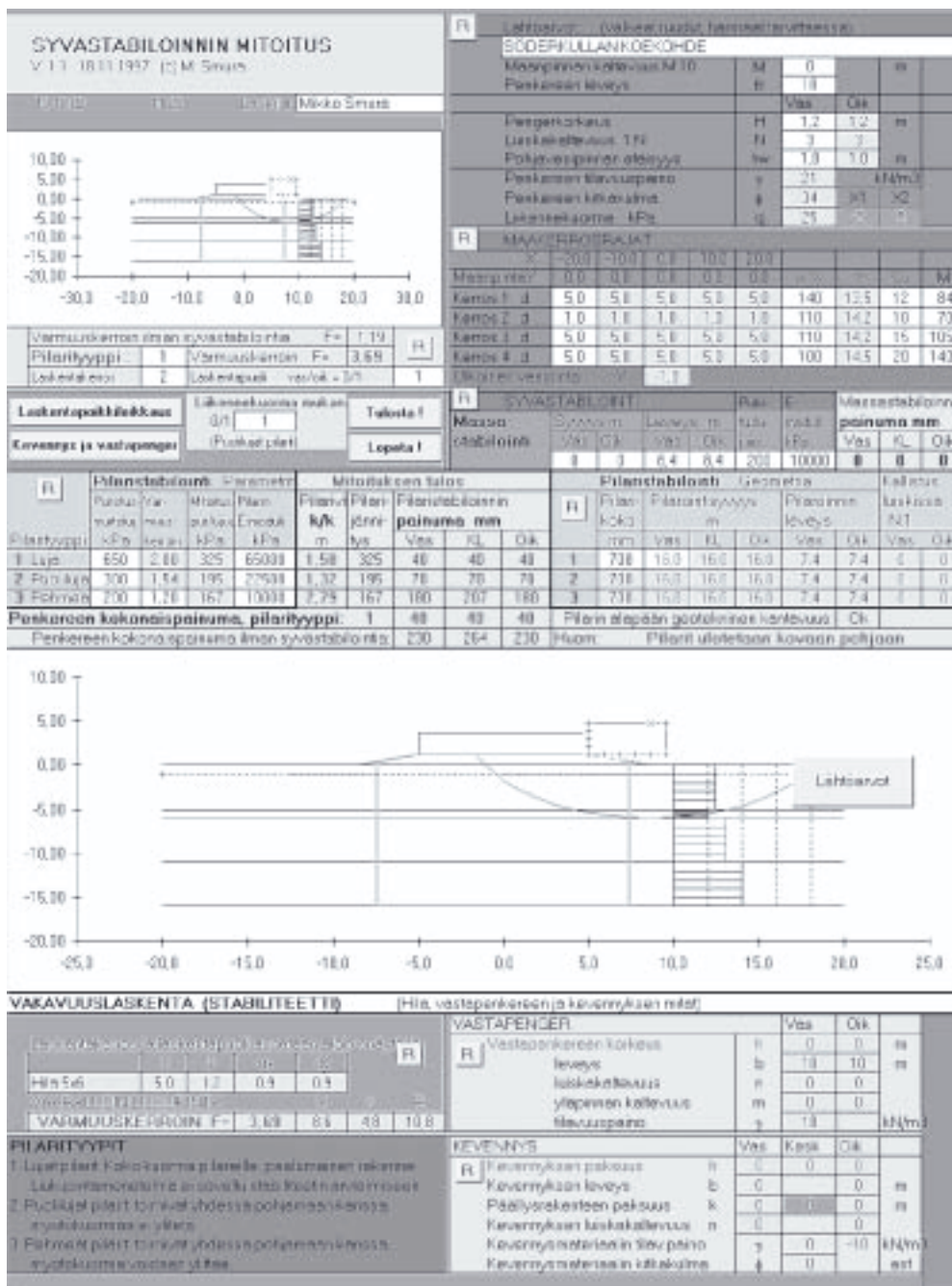
Alue IV: teräsverkko

Teräsverkkoja mitoitettiin laskelmalla BSI ja Bautechnikin kaavoilla tilannetta jossa venymä $e=0.007$. Oletuksena oli, että teräsverkot asettuvat noin 50 mm notkolle pilarien välissä heti rakentamisen jälkeen.

Laskentamenetelmien antamat voimat olivat:

- 1) BSI: 155 kN/m
- 2) Bautechnik: 131 kN/m

BSI:n antamalla voimalla mitoitettiin alueelle teräsverkotus 2xB500K 6/6 100-100 päällekkäin. Tällöin yhdelle säikeelle tulisi vetovoimaa noin 7.7 kN. Korrosiovaraa ei otettu huomioon.



Kuva 8. Koekohteen mitoitus syvästabilointiohjeen mukaisesti. Syvästabiloinnin mitoitushje TIEL 3200465.

2.3 Elementtilaskelmien tulokset

2.3.1 Plaxis-elementtilaskelmat

Laskelmien tarkempi erittely on esitetty raportissa *Asko, A. 1999. Söderkullan koekohteen FEM-laskelmat (Plaxis 7.1). Teknillinen korkeakoulu, Helsinki.*

Laskelmat tehtiin tasomuodonmuutostilassa ja pyörähdyssymmetrisessä tilassa. Pilarikentän kolmiulotteisuutta mallinnettiin tekemällä pyöreistä pilareista suorakulmaisia elementtejä. Suorakulmaisen elementin sivun mittana käytettiin arvoa jolla saavutettiin sama pinta-ala kuin varsinaisen pilarin pinta-ala.

Materiaalimallina käytettiin Soft-Soil-mallia. Mallinus tehtiin pyörähdyssymmetrisenä. Kuormituksen ei käytetty liikennekuormaa. Taulukossa 2 on esitetty laskelmien tulokset.

Taulukko 2. Yhteenveto elementtilaskennasta

	Pilari-jännitys kPa	Jännitys maassa kPa	Kokonais- painuma mm	Vahviste- voima kN
Alue II:	127.7	21.5	42	
Alue III:	126.2	21.5	43	0.4
Alue IV:	125.1	21.3	43	1.4

2.3.2 ABAQUS-laskelmat

Laskelmat on esitetty tarkasti raporteissa: *Rantala, J. 2002. 3D FE- mallinnus. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere. Rantala, J. 2002. 3D FE- mallinnus, Verkkolujitettujen pengerten liikennekuormalaskelmat. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.* ABAQUS-laskelmissa käytettiin kolmiulotteista elementtiverkkoa.

Materiaalimallina käytettiin yksinkertaista Mohr-Coulomb –materiaalimallia. Teräsverkko- ja muoviverkko mallinnettiin palkkielementteinä. Elementit kiinnitettiin lineaarisilla jouselementeillä hiekkakerroksen solmuihin. Taulukossa 3 on esitetty laskelmien tulokset.

Taulukko 3. Yhteenveto elementtilaskelmista.

	Pilari- jännitys (suurin) kPa	Jännitys maassa kPa	Kokonais- painuma mm	Vahviste- voima pilarin päällä kN
Alue II:	127.1	4.2	41	
Alue III:	127.9	4.2	41	0.18
Alue IV:	127.1	4.7	40	0.003

2.4 Laskelmien vertailut

2.4.1 Jännitysjakautumat

Alla olevaan taulukkoon 4 on koottu tulokset jännitysjakautumista ilman liikennekuormitusta. Jännitysten yksikkönä on kPa.

Taulukko 4. Yhteenveto jännityslaskelmista.

Alue	Plaxis	BSI	Bau- technik	Stabilointi- ohje/kovana pilari	ABAQUS 3D
II pilari maa	127.7 21.5	- -	- -	168 (320) 0	127.1 4.2
III pilari maa	126.2 21.5	79 21	63..87 16..11	168 (320) 0	127.9 4.2
IV pilari maa	125.1 21.3	79 21	63..87 16..11	168 (320) 0	127.1 4.7

Taulukosta voidaan nähdä, että stabilointiohjeen mukaisesti mitoittaessa varmuus on riittävä murtumista vastaan. Pilarithan oli mitoitettu 600 kPa tavoitepuristuslujuudelle liikennekuorman ollessa mukana. Plaxis ja ABAQUS näyttävät antavan pilareille samanlaisia jännityksiä riippumatta siitä onko vahvisteita käytetty pilarien päällä. BSI ja Bautechnik antavat suuruusluokaltaan samanlaisia jännityksiä. Taulukon 4 perusteella voidaan todeta, että oletus kuormituksen siirtymisestä kokonaan pilareille ei ole kovin kaukana totuudesta. Oleellista olisi tietää, onko puristusjännitys maan pinnalla vakio koko pilarien välisellä matkalla, vai jakautuuko se erilailla lähestyttäessä pilareita. Pilarien päällä ABAQUS-laskelmat näyttäisivät antavan suurimman jännityksen pilarin reunalle.

2.4.2 Vahvistevoimat

Taulukkoon 5 on koottu yhteenvetona eri laskelmien perusteella saadut venymät. Teräsverkon murtovetovoima on 280 kN/m kohteessa käytetyllä verkolla.

Taulukko 5. Yhteenveto vahvistevoimista pilarin päällä.

Alue	Plaxis kN/m	BSik N/m	Bautech- nikkN/m	ABAQUS kN/m
III	0.4	71	51	0.18
IV	1.4	155	131	0.003

Elementtilaskelmien perusteella vetovoimat jäävät hyvin pieniksi. Maastossa mitatut arvot vahvistavat tätä tulosta. Muilla laskentamenetelmillä saadaan moninkertaisia voimia vahvisteisiin.

2.4.3 Painumatulokset

Taulukkoon 6 on koottu elementtimenetelmillä saadut painumat. Painumat on esitetty tien keskeltä.

Taulukko 6. Yhteenveto painumatuloksista.

	Plaxis mm	ABAQUS mm
Alue I:	38	
Alue II:	42	41
Alue III:	43	41
Alue IV:	43	40

Elementtilaskelmat antavat keskenään hyvin samankaltaisia painumia.

2.5 Instrumentointi

Koalueen instrumentointi on esitetty kokonaisuudessaan suunnitelmassa *Smura, M., Honkala, A. 1998. Koerakennesuunnitelma. Tielaitos, Helsinki.* Kohteiden riittävällä instrumentoinnilla pyrittiin varmistamaan kohteen mittaustulosten riittävyys. Instrumenteista ainoastaan 1 maanpainemittari ja 1 venymämittari lakkasivat toimimasta yli 3 vuoden seurantajakson aikana. Instrumentteja asennettiin seuraavasti:

Alue I:

letkupainumamittarit 4kpl poikkisuuntaan
painumalevyt 10 kpl

Alue II:

letkupainumamittarit 4kpl poikkisuuntaan
painumalevyt 8 kpl
maanpaineanturit 5 kpl

Alue III:

letkupainumamittarit 4kpl poikkisuuntaan
letkupainumamittarit 1 kpl pituussuuntaan
painumalevyt 8 kpl
maanpaineanturit 5 kpl
venymäliuskat 20 kpl
venymäliuskat "dummy" 20 kpl
pohjavesiputki 1kpl

Alue IV:

letkupainumamittarit 4kpl poikkisuuntaan
letkupainumamittarit 1 kpl pituussuuntaan
painumalevyt 8 kpl
maanpaineanturit 5 kpl
venymäliuskat 20 kpl
venymäliuskat "dummy" 20 kpl

Kuvassa 9 on esitetty periaate instrumenttien asennuksesta. Instrumenteilla pyrittiin seuraamaan seuraavanlaisia asioita:

letkupainumamittarit:

poikittaiset- ja pituussuuntaiset painumaprofiilit
venymäliuskat:
vahvisteverkkojen venymät ja syntyvät vahvistevoimat

maanpaineanturit:

maanpaineiden jakautuminen pilareiden välissä ja pilarien päällä

painumalevyt:

letkupainumamittareiden antaman painumatuloksen varmistaminen

Instrumenttien asennus

Letkupainumamittarit asennettiin vahvistealueilla verkkojen päälle. Alueilla III ja IV pituussuuntaiset letkumittarit asennettiin siten, että voitiin mitata pituussuuntaisia muodonmuutoksia.

Painumalevyt (200x200x20mm) asennettiin taseuskerroksen päälle ja vahvisteverkon alle. Levyjen koordinaatit (x,y,z) mitattiin tarkasti. Koordinaateista voidaan mitata myöhemmin penkereen painumista, mikäli halutaan tarkastaa letkupainumamittareiden antama tulos.

3 RAKENTAMINEN

3.1 Rakentamisen henkilöstö ja vastualueet

Koekohteen rakentaminen toteutettiin seuraavalaisella vastuujalla:

Rakennuttaja:
Tielaitos, Tiehallinto
Tielaitos, Uudenmaan tiepiiri

Pääurakoitsija:
Tielaitos, Helsingin urakointiyksikkö

Pilarointiurakoitsija
YIT-Yhtymä Oy

Suunnittelija
Tielaitos, Konsultointi
Fundus Oy

Instrumentointi
Viatak SGT Oy

Mittaukset
Tielaitos, Tuotanto, Mittaustoimisto

Muovivahvisteet
Kaitos Oy

Teräsvahvisteet
Rautaruukki / Polar-Kudos Oy

3.2 Aikataulu

Koekohteen rakentamisen aikataulu päätehtävittäin on esitetty alla. Varsinaisen rakennustyön aikataulu selviää rakentamisraportista päivän tarkkuudella. Karkeasti päätyöt tehtiin seuraavasti:

1. Kiertotien rakentaminen	10/98
2. Pilarointityöt	10-11/98
3. Laadunvalvontakairaukset	12/98
4. Kaivutyöt, instrumenttien asennukset ja päällysrakennetyöt:	1-2/99

3.3 Työvaiheiden suoritus

3.3.1 Valmistelevat työt

Valmistelevinä töinä alueella tehtiin seuraavat toimenpiteet:

- rakennettiin kiertotie vanhan tielinjan kohdalle
- selvitettiin vesijohtolinjan tonttiliittymä noin paalulla 4310 ja merkittiin se maastoon
- vanha päällysrakenne poistettiin tasolle uuden tulevan tien tasaus -0.5m . Poistotyö sujui ongelmitta koska päällysrakenne ei ollut vielä jäänyt. Tältä tasolta suoritettiin pilarointityö.

3.3.2 Pilarointityö

Pilarointityön suoritti YIT. Stabilointikone oli täysin uusi. Uuden koneen hyviä puolia oli hyvä vääntökapasiteetti, sekä erilaisten laadunvalvontatulosten saanti. Sekoitinkärki on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. YIT:n sekoitinkärki.

Ongelmia tuottivat pyöritysnopeuden ja nousunopeuden vaihtelut. Keskimäärin nousunopeus oli määrätyn (12 mm/r) suuruinen, mutta vaihteluväli oli suuri. Ennen koerakentamista alueelle tehdyt koepilarit oli tehty samalla koneella. Koepilareiden tuloksissa nousunopeus oli lähes täysin vakio. Varsinaista syytä vaihteluun YIT ei pystynyt nimeämään.

Pilareiden yläpäistä kaksi viimeistä metriä oli tarkoitus tehdä hitaalla 5mm/r nousunopeudella. Stabilointikoneen ohjausohjelmasta johtuen näin pientä nousunopeutta ei kuitenkaan voitu käyttää. Alueen IV pilarointityön aikana koneeseen jouduttiin vaihtamaan sideaineen suodatuskankaat.

Sideainemäärät pysyivät vaihteluvälin sisällä ja täyttivät laatutavoitteet.

Noin 0.5 metriä paksu vanha tiepenger toimi pilarointikoneen työalustana. Samalla se esti sideaineen pääsemistä maanpinnalle sekä esitiivisti pilarien yläpäitä.

3.3.3 Leikkaustyöt

Leikkaustyöt tehtiin kaivinkoneella siten, että kaivinkone liikkui koko ajan poistettavan penkereen päällä (kuva 11). Tästä aiheutui välillä ongelmia, koska pengeri jäättyi kovaksi, kun sen päällä liikuttiin. Kaivettu pengeri siirrettiin pois kuorma-autolla.



Kuva 11. Vanhan penkereen poisto käynnissä.

Kaivutyön leikkaustasoa seurattiin tähtäyslapuilla ja ajokepeillä. Leikkaustasossa näkyivät pilarien yläpäät. Esiin tulleista pilareista saatiin mitattua pilarien keskikohtien sijainti. Mittaukset tehtiin lähes kaikista pilareista. Ainoastaan alueiden II ja III väleihin jäi muutama pilari mittaamatta. Pilarien toteutuneisiin sijainteihin palataan laadunvarmistuskohdassa 3.4.

3.3.4 Suojakerroksen rakentaminen

Suojakerros (Hk 200mm) levitettiin traktorikaivurilla siten, että kaivuri liikkui ajettavan suojakerroksen päällä (kuva 12). Levitys onnistui erinomaisesti pohjamaan vähäisen (100mm) jäätymisen takia. Alueella III traktorikaivurin pyörä kuitenkin upposi pohjamaahan yhden kerran. Pohjamaan routautuminen oli vähäistä. Alueella I jouduttiin leikkaustaso jättämään suojaamatta viikonlopun ajaksi, mutta silti maa jäättyi vain 80mm syvyyteen. Pakkasta oli yli 20 astetta.

Tien keskiosa kantoi yleensä paremmin. Leikkaustaso oli kallistettu suunnitelman mukaisesti sivuosiin päin. Näin ollen keskiosa oli kuivempi ja se jäättyi nopeammin kuin reunaosilla. Tien reunaosille kertyi pohja-, ja pintavesiä. Osaltaan ne estivät pohjan jäätymistä ja heikensivät kantavuutta. Tämän vuoksi suojakerroksen rakentaminen tehtiin yleensä tien keskeltä reuna-alueille päin.

Ulkolämpötilan perusteella käytettiin osalla instrumentoitavia alueita Thermolon-lämpösuojamattoja. Matoilla estettiin suojakerroksen jäätymistä.



Kuva 12. Suojakerros rakennettu alueelle IV.

3.3.5 Vahvisteiden asennus

Alueella III käytettiin muoviverkkoa ja alueella IV teräsverkkoa. Vahvisteiden asennus aloitettiin instrumentoiduista verkoista. Ennen asennusta merkittiin instrumentoiduilla alueilla kaikkien pilareiden paikat näkyviin. Kun todelliset pilaripaikat olivat selvillä, oli helppoa laittaa instrumentoidut verkot suunnitelluille paikoilleen. Verkkoihin etukäteen asennetut instrumentit tulivat täten oikeille koh-

dille. Muualla vahvistealueilla merkittiin toteutuneita pilarien paikkoja ja suunnitelman mukaisia vahvisteverkkojen kulmakoordinaatteja näkyviin. Näin verkot tulivat mahdollisimman oikein asennettua.

Muoviverkkojen asennus

Verkkorulla aukaistiin alueiden I ja II päällä. Rullista leikattiin oikean kokoinen kappale. Verkon kappaleet vedettiin suojakerroksen päälle esimitattujen suunnitelman mukaisten kulmakoordinaattien kohdalle. Verkot asennettiin siten, että poikittaiset säikeet olivat alimmaisena. Pilari-tarkkeiden ja kulmakoordinaattien perusteella verkko saatiin tarkasti paikalleen.



Kuva 13. Muoviverkot asennettu alueelle III.

Uudet verkot vedettiin edellisen verkon päälle siten, että limitykseksi tuli 900 mm. Limityksen suuruus mitattiin rullamitalalla. Limityksessä päällimmäiseksi asennettiin aina verkko, jonka suunnasta jakavan kerroksen täyttöä oli tarkoitus tehdä (kuva 13).

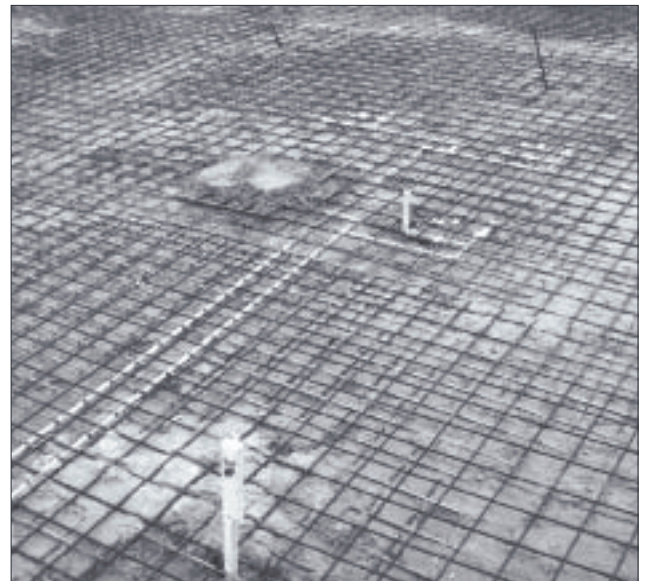
Verkkojen asennustyö sujui nopeasti. Kaikki verkot asennettiin vajaan kahdessa tunnissa.

Teräsverkkojen asennus

Ennen verkkojen asennusta merkittiin tien keskilinja näkyviin. Poikittaisten verkkojen päät saatiin siten helposti oikeille kohdille. Suunnitteluvaiheessa päällekkäisten vahvisteverkkojen koko oli valittu siten, että päällimmäisten ja alimmaisten verkkojen rajakohdat eivät sattuneet samalle kohdalle.

Teräsverkkoja oli kahta erikokoista kappaletta. Alle tulevat verkot olivat pienempiä kuin päälle tulevat. Verkot asennettiin siten, että poikittaiset säikeet tulivat alimmaksi. Verkot olivat painoltaan alle 100 kg, mutta niiden kantamiseen tarvittiin neljä miestä verkon taipumisen vuoksi.

Instrumentoitujen verkkojen asennuksen jälkeen asennettiin ensin poikkisuuntaiset verkot koko alueelle (kuva 14). Verkon paikkaa tarkistettiin suunnitelman mukaisten maastoon merkittyjen mittojen perusteella. Pituussuuntaiset verkot asennettiin poikittaisten verkkojen päälle siten, että 50-50 mm silmäkoko saatiin mahdollisimman hyvin toteutumaan. Joka paikassa ei tätä silmäkokoa saavutettu, sillä verkkojen säikeet eivät olleet aivan suorat. Suunnitelmassa oli esitetty, että verkot kiinnitettäisiin toisiinsa sidelangoilla. Penkereen alla verkot kiinnittyivät niin lujasti toisiinsa, ettei sidelankoja tarvittu.



Kuva 14. Teräsverkot asennettu, venymämittarit näkyvät suojattuina.

3.3.6 Instrumenttien asennus

Ennen instrumenttien asennusta mitattiin toteutuneet pilarien sijaintipaikat merkittiin näkyvästi. Kun pilarien todelliset paikat olivat selvillä, oli helppoa laittaa instrumentit niille kuuluville paikoilleen.

Kaikista instrumenteista (painumalevyt, painumaletkut, venymäliuskat, ja maanpaineanturit) mitattiin x,y,z- koordinaatit. Jatkotutkimuksissa voidaan näin arvioida myös mittarin todellisen sijainnin vaikutusta mittaustuloksiin.

Letkupainumamittarit

Ennen letkujen katkaisemista letkut vedettiin rullalta suoriksi, jotta niiden asettaminen oikealle paikalle olisi helpompaa. Letkuja asennettiin pilari-linjojen kohdalle ja linjojen väliin. Letkut kiinnitettiin pohjamaahan taivutetulla harjateräksellä. Penkeeren teon yhteydessä ne eivät näin päässeet liikumaan sivusuunnassa. Lisäksi letkujen päälle asennettiin sen verran kivetöntä maata, että ne pysyivät tiukasti pohjamaata vasten (kuva 15).

Letkujen päihin asennettiin kepit, joihin letkut kiinnitettiin. Alueilla III ja IV letkut asennettiin vahvisteverkkojen päälle.



Kuva 15. Letkupainumamittarien asennusta alueelle II.

Maanpaineanturit

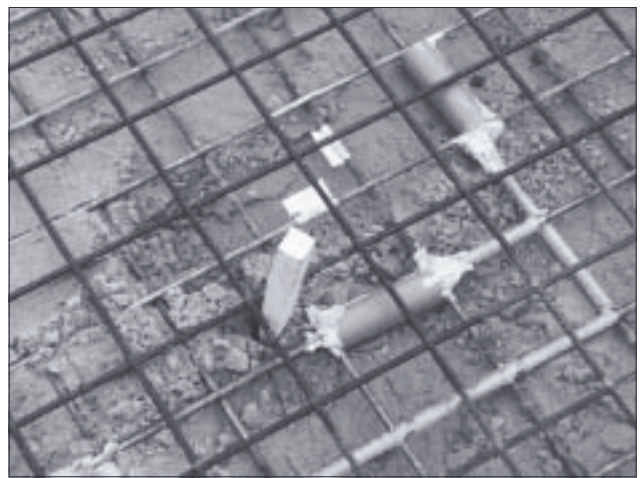
Maanpaineanturit kaivettiin noin 50 mm syvyyteen suojakerrokseen. Anturit asennettiin vaakatasoon vatupassin avulla. Antureiden päälle levitettiin hienoa hiekkaa siten, että suuria pistekuormia ei pääsisi syntymään. Ennen suojahiekan levittämistä mitattiin antureista x,y,z-koordinaatit.

Painumalevyt

Painumalevyt (200x200x20 mm) asennettiin letkujen viereen. Mikäli levyt joskus etsitään kairamalla, ei näin ollen kairata letkuihin. Levyille tehtiin alueilla I ja II 50 mm:n syvennys, johon levyt asennettiin. Ympäriällä oleva hiekka tiivistettiin jalalla siten, että levyille saatiin sivuttaistukea. Sijaintimittausten jälkeen levyjen päälle levitettiin suojahiekkaa. Alueilla III ja IV levyt asennettiin vahvisteverkkojen päälle.

Venymäliuskat

Venymäliuskat olivat valmiiksi kiinnitettyinä vahvisteverkkoihin. Verkot asennettiin vasta maanpainemittarien asentamisen jälkeen. Vahvisteverkkojen asennus aloitettiin instrumentoitavien alueiden kohdalta siten, että instrumentit saatiin osumaan oikeille kohdille (kuva 16). Pilarien toteutuneet paikathan eivät olleet täysin samat kuin suunnitellut paikat. Venymäliuskojen sijainti mitattiin ja liuskojen päälle levitettiin suojahiekkaa ennen jakavan kerroksen rakentamista.



Kuva 16. Teräsverkot ja niihin asennetut venymäliuskat. Venymäliuskat on suojattu.

Pohjavesiputki

Paalulle 4320 asennettiin vasemmanpuoleisen pilaririvin pilarien väliin 3 metriä pitkä pohjavesiputki. Putken alapäästä 2 m oli siiviläosaa. Putket asennettiin jakavan kerroksen päältä. Pohjaputkesta otettiin vesinäytteet, joista määritettiin sideaineen liukenemista.

Routamittari

Tien vasempaan reunaan paalulle 4314 asennettiin routamittari. Tiehöylä rikkoi sen kuitenkin kolme viikkoa asennuksen jälkeen.

3.3.7 Päällysrakennekerrosten rakentaminen

Päällysrakennekerroksista tehtiin instrumentoituilta alueilta toteutumamittaukset. Todellisten kuormitustilanteiden simulointia varten alueista voidaan tehdä vaikka kolmiulotteinen maastomalli.

Jakavan kerroksen rakentaminen

Jakava kerros tehtiin traktorikaivurilla. Kuorma purettiin aina valmiin täytön päälle, josta kaivuri levitti sitä eteenpäin.

Kaivuri nosti varovasti kauhalla soraa suoraan instrumentoidulle alueelle siten, että instrumentit eivät päässeet varsinaisen täyttötöyden aikana liikahtamaan (kuva 17).



Kuva 17. Jakavan kerroksen levitys instrumentoidulla alueella.

Vahvistealueilla oli tarkoitus nostaa kauhalla täytönmateriaalia verkkojen saumakohtiin. Verkot pysyivät kuitenkin kireinä, vaikka täyttöä ei etukäteen limituskohdalle nostettukaan (kuva 18). Täyttötöy onnistui hyvin sekä muovi-, että teräsverkkoalueella.



Kuva 18. Jakavan kerroksen levitys muovi- ja teräsverkkoalueen rajakohdassa.

Jakava kerros rakennettiin kahtena kerroksena siten, että ensimmäinen kerros tiivistettiin 7 tn jyryllä staattisesti. Tässä vaiheessa tehtiin kaikista instrumenteista mittaukset.

Toinen kerros rakennettiin samaan tapaan kuin ensimmäinenkin kerros. Toinen kerros tiivistettiin täryjyryllä. Tämän jälkeen tehtiin uudet mittaukset. Letkupainumamittareista tehtiin lisäksi kaksinkertaiset mittaukset mittaustarkkuuden selvittämiseksi. Mittauksia tehtiin lisäksi ajamalla jyry maanpaine- ja venymämittareiden päälle.

Kantavan kerroksen rakentaminen

Kantava kerros rakennettiin traktorikaivurilla yhtenä kerroksena. Tiivistys tehtiin 7tn täryjyryllä. Lämpötila oli -13 astetta, kun kantava kerros rakennettiin. Jakava kerros oli routaantunut. Kaikista instrumenteista tehtiin mittaukset kantavan kerroksen rakentamisen jälkeen. Mittauksia tehtiin myös ajamalla jyry staattiseksi kuormaksi penkereen päälle.

3.4 Laadunvarmistus

3.4.1 Laadunvalvontakairaukset

Pilarien laadunvalvontakairaukset tehtiin pilareista jotka sijaitsivat instrumentoitavalla alueella. Kaikki laadunvalvontakairaukset tehtiin Tielaitoksen puristin-heijarikairalla (Kuva 19).

Pilarien teon ja kairausten väliseksi ajaksi tuli alueilla I ja II 50 vrk, alueella III 39 vrk ja alueella IV 32 vrk. Lujuustuloksien tulkintaa vaikeuttaa pilarien koestaminen eri-ikäisinä.

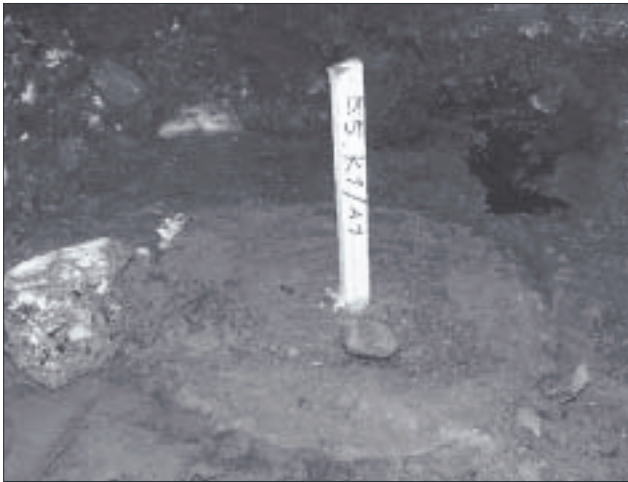


Kuva 19. Puristin-heijarikairauksen tulostusdiagrammi.

Vanha tiivistyskerroksena toiminut pengeri kaivettiin pois ja pilarien päät kaivettiin näkyviin. Kairaukset tehtiin keskeltä pilaria. Osasta pilareita tehtiin kairaukset myös pilarin keskipisteen ja ulkoreunan puolivälistä. Pilarit olivat kuitenkin niin kovia, että ainoastaan pilarin keskeltä tehdyt kairaukset pysyivät pilarissa riittävän syvälle.

Kairauskohdista mitattiin myös keskipisteen sijainti. Sijaintimittaukset palvelivat pilarien sijaintipoikkeamien tarkastamista.

Pilarit löytyivät hyvin, sillä pilarin ja maan välinen rajakohta oli selvä (kuva 20). Osaltaan tähän on positiivisessa mielessä vaikuttanut myös vanha tiepenger.



Kuva 20. Alue I, pilari numero 55.

Kaikista instrumentoiduilla alueilla sijaitsevista pilareista tehtiin puristin-heijarikairaukset. Kairausvastuksen perusteella tulkittiin pilarien leikkauslujuutta. Leikkauslujuudet on tulkittu seuraavalla kaavalla:

- leikkauslujuus (kPa) = $0.1 \times$ kärkivastus

Pilarien leikkauslujuustavoite oli 160 kPa alueella I ja muualla 300 kPa. Lujuudet piti saavuttaa 28 vrk iässä. Ljuuksien sallitut poikkeamat ovat:

- pilareiden pituudesta 5% saa olla osuuksia, joissa ljuuus on alle 70% tavoitelujuudesta
- yksittäinen pilari saa alittaa tavoitelujuusvaatimuksen 0.5 metrin matkalla 50%

Kairaukset tehtiin pilarin keskeltä, koska näin kairaus pysyi paremmin pilarissa. Pilarin yläosalle tuli tässä tapauksessa kuitenkin "liian" heikko tulos

pilarointityössä jäävän keskireiän takia. Asia varmistettiin tekemällä vertaileva kairaus pilarin keskireiän ja ulkohalkaisijan puolivälistä. Ljuusero oli huomattava, mutta kairaus ei pysynyt pilarissa kuin reilun metrin matkan.

Lyhyinä kommentteina eri alueiden ljuuksista voidaan todeta seuraavaa:

Alue I: Laadunvarmistuskairaukset on tehty 51 vrk iässä. Ljuudet olivat keskimäärin jopa kaksinkertaisia tavoitteeseen (160 kPa) verrattuna. Sekä yksittäiset, että keskimääräiset ljuudet täyttävät laatukriteerit (kuvat 21, 22).

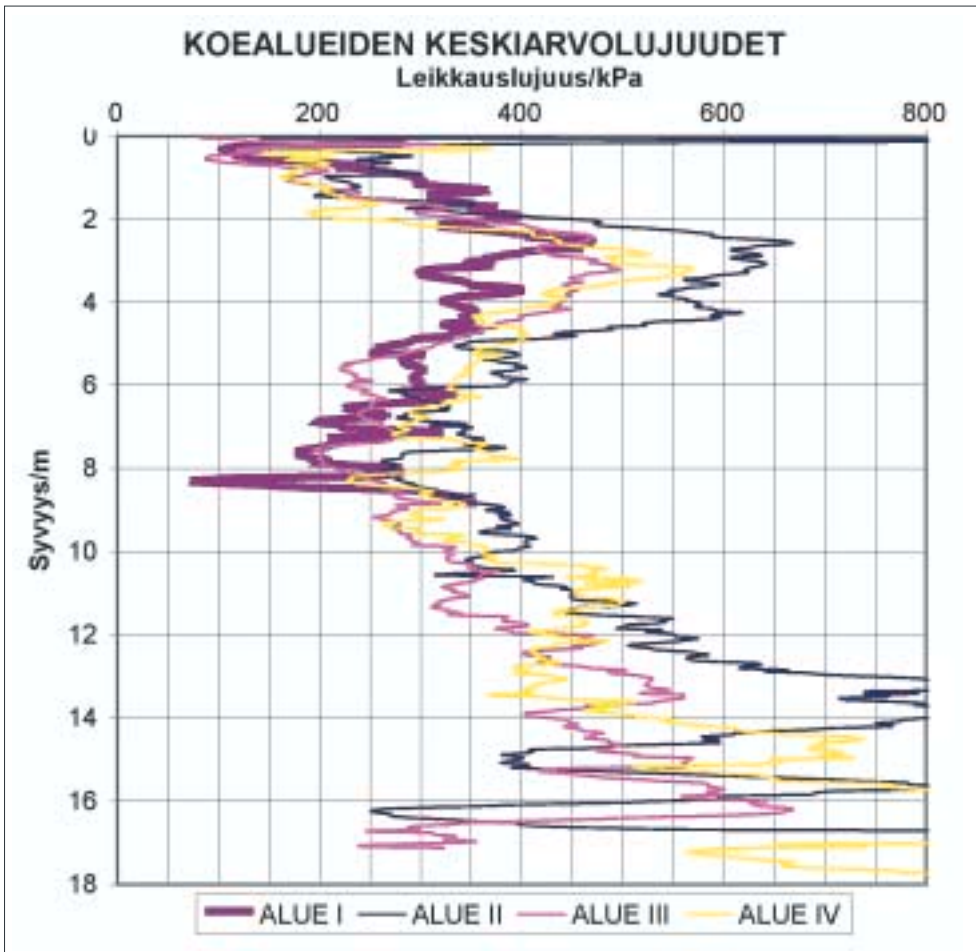
Alue II: Laadunvarmistuskairaukset tehty 50 vrk iässä. Keskimääräiset ljuudet 2-4 metrin ja 11-14 metrin välillä ovat kaksinkertaisia tavoitelujuuteen verrattuna. Syvyysvälillä 4-11 metriä ljuudet ovat tavoitteen mukaisia. Yksittäisessä pilarissa 149 on ljuusvaihtelua. Muut pilarit täyttävät laatukriteerit (kuvat 21, 22).

Alue III: Laadunvarmistuskairaukset on tehty 31 vrk iässä. Keskimääräiset ljuudet olivat 0-2 metrin syvyydessä noin 60% tavoitteesta. Tämä todennäköisesti ei pidä paikkaansa, vaan keskireiän ljuuskato vaikuttaa asiaan. Ljuuden alitus on 6-8 metrin syvyydellä keskimäärin noin 30%. Yksittäisissä pilareissa on osuuksia joissa ljuuus on noin puolet tavoitteesta. Muilla syvyyksillä ljuudet ovat noin 1.5 kertaisia vaadittuun ljuuteen verrattuna (kuva 22). Verrattuna alueen II tuloksiin kyseisellä syvyydellä on lisäljuutta tullut 20 päivän aikana noin 50 kPa. Tämä seikka näkyy hyvin diagrammista, johon on koottu kaikkien alueiden keskiarvoljuudet (kuva 21). Sideainepitoisuudet ovat kyseisillä alueilla samat.

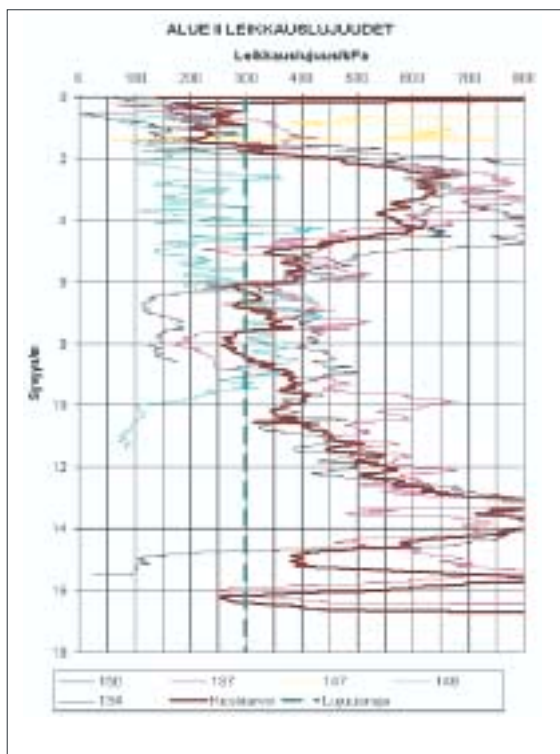
Alue IV: Laadunvarmistuskairaukset tehty 30 vrk iässä. Ljuudet ovat hyvin samantapaiset kuin alueella III (kuvat 21, 22).

Projektin kannalta kriittisimmän seikan eli pilareiden yläosan voidaan todeta täyttävän laatukriteerit. Tällöin voidaan olettaa, että pengeri holvautuu heti pilareiden yläpäästä lähtien.

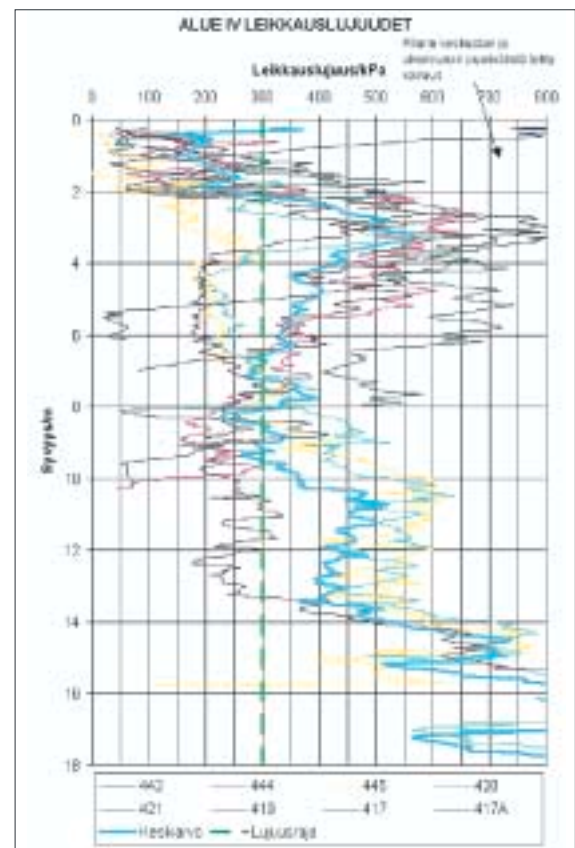
Pilareista yritettiin ottaa myös näytteitä mm. läpivirtausputkella. Näytteenotto ei kuitenkaan onnistunut niin hyvin, että varsinaista laboratoriokoe-kappaleita olisi saatu valmistettua.



Kuva 21.
 Koerakennealueiden keskiarvolujuudet.



Kuvat 22. Koalueiden lujuudet.



3.4.2 Pilarointityön laadunvarmistus

Työselityksen mukaisesti urakoitsija toimitti tiedot nousu- ja pyöritysnopeuksista, sekä sideaineen menekeistä. Pilarointityöstä voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

- Sideaineen syöttö oli laatuksien mukainen
- Kerrosnousunopeuden keskiarvo on oikea (vaatimus 12mm/r), mutta vaihteluväli on huomattavan suuri. Työselityksessä ei ollut annettu vaihteluvälille arvoja. Nousunopeudet vaihtelivat 5-40 mm/r
- Pilarien yläosasta ei kahta viimeistä metriä voitu tehdä työselityksessä esitettyllä 5 mm/r kierrosnousunopeudella

Nousunopeuden vaihteluiden syytä ei urakoitsija pystynyt selvittämään. Asia on sikäli mielenkiintoinen, että ennen varsinaista koerakennetta tehdyt koepilarit tehtiin samalla sideaineella ja samalla koneella, mutta näissä pilareissa nousunopeus oli tasainen. Jatkossa pilarointikohteissa tulee työselityksissä kiinnittää huomiota myös nousunopeuden sallittuun vaihteluun, koska liiallisesta vaihtelusta aiheutuu varmasti lujusvaihtelua.

3.4.3 Mitta- ja sijaintipoikkeamat

Rakennusalueella on mitattu sijainti- ja tasopoikkeamat seuraavista rakenneosista (kuva 23):

- pilareista
- suojakerroksesta
- kantavasta kerroksesta
- kaikista instrumenteista



Kuva 23. Maanpainemittareiden sijaintipoikkeamien mittaamista.

Tässä kohdassa käsitellään lähinnä pilarien sijaintipoikkeamat ja alusrakenteen leikkaustason poikkeamat. Näillä seikoilla on todennäköisesti suurin vaikutus pilarien kuormitukseen. Jatkossa on mahdollista tehdä myös tarkempia analyyseja eri kerrospaksuuksilla, mikäli niistä voidaan löytää selitystä mahdollisille epäloogisuuksille.

Pilarien sijainti mitattiin pilarien keskeltä sillä tarkkuudella kuin pilarien keskipiste löydettiin maastossa. Sijaintimittauksissa tulee siten jonkinlaista hajontaa jo pelkästään mittaustyön johdosta. Pilarien yläpäistä otettiin myös korkeuskoordinaatit, jolloin saatiin kuva leikkaustason tarkkuudesta. Oheismateriaalissa on esitetty taulukot, joista selviää pilarien sijaintipoikkeamat laadunvalvontakairausten aikana ja varsinaisen kaivutyön jälkeen. Taulukoista nähdään seuraavat tulokset:

- Laadunvalvontakairausten aikana kaivua ei ole tehty ylisyväksi, koska ylimääräistä maata on pilareiden päällä keskimäärin 210 mm
- Leikkaustason keskimääräinen ero teoreettiseen leikkaustasoon verrattuna on -19 mm (minimi -210 mm ja maksimi 80 mm).
- Pilarin 417 sijaintimittauksessa on jokin virhe, sillä pilari ei ollut 1500 mm väärässä paikassa. Keskimääräisessä sijaintivirheessä tämän pilarin poikkeamaa ei ole otettu huomioon.
- Keskimääräinen sijaintipoikkeama kaivuvaiheessa tehdyissä pilarien sijaintimittauksissa on 193 mm, kun laatuvaatimus oli 50 mm.
- Laadunvalvontakairausten aikana tehdyissä sijaintimittauksissa keskimääräiseksi sijaintipoikkeamaksi saatiin 142 mm. Mittaustarkkuuden voidaan arvioida olevan noin 50 mm (193mm-142mm) koska sijaintimittaukset tehtiin samoista pilareista
- Laatuvaatimuksissa esitetty sijaintivaatimus 50 mm on vaativa. Näin pienen poikkeaman toteaminen riittävän tarkasti mittaamalla on vaikeaa.

Rakenteen käyttäytymisen analysoinnissa tulee tärkeäksi pilarien todellinen sijainti, koska kuorman jakautuminen riippuu pilarivälistä.

3.4.4 Kantavuusmittaukset

Jakavan kerroksen päältä tehtiin kantavuusmittaukset (kuva 24) kaikilta alueilta. Tielaitoksen yleisten työselitysten mukaista 90 MPa vaatimusta

ei saatu täytettyä kuin alueella I. Tälläkin alueella pengeri oli todennäköisesti jäässä. Taulukkoon 7 on koottu tulokset kantavuusmittauksista. Kantavan kerroksen ja asfaltin päältä ei mittauksia ole tehty.

Taulukko 7. Kantavuusmittaukset jakavan kerroksen päältä.

Paalu	Alue	vas	kl	oik	keskiarvo MPa
4270	I	86	139	131	118
4290	II	66	124	83	91
4300	II	36	86	50	57
4320	III	44	45	40	43
4330	III	44	39	49	44
4340	III	39	39	47	42
4350	IV	48	75	57	60
4360	IV	75	80	56	70
K.a					65

3.4.5 Troxler-mittaukset

Jakavan kerroksen päältä tehtiin myös Troxler-mittauksia tilavuuspainon ja tiiveysasteen arvioimiseksi. Troxler-mittauksia voidaan pitää lähinnä suuntaa antavana. Mittaustulosten perusteella voidaan kuitenkin jakavan kerroksen tilavuuspainona käyttää riittävällä tarkkuudella 19 kN/m³. Taulukossa 8 on esitetty Troxler-tulokset.

Taulukko 8. Troxler-mittaukset jakavasta kerroksesta.

		Alue I	Alue II	Alue III	Alue IV
Mittaussyvyys	mm	100	100	100	50
Märkätilavuuspaino	Wet density kN/ m ³	19,46	19,54	18,39	19,29
Kuivatiheys	Dry density kN/ m ³	19,07	18,97	17,71	16,23
Proctor-tiiveysaste	Proctor-%	95,4	94,8	88,5	81,1
Kosteus	Moisture kg/ m ³	39	57	68	306
	%	2	3	3,9	18,9
Huokosuhde	Void ratio	0,416	0,423	0,525	0,664



Kuva 24. Kantavuusmittauskalustoa.

3.4.6 Huokospainemittaukset

Huokospaineita on mitattu sekä ennen rakentamista, rakentamisen aikana ja rakentamisen jälkeen. Huokosvedenpaineissa ei ole merkittäviä eroja. Huokospaineiden kehitys on esitetty taulukossa 9. Huomattavia huokospaineiden muutoksia ei ole havaittu. Kaikki huokospainemittaukset ovat olleet 0.6 metrin paine-eron sisällä. Syvyydellä 10.2m sijaitsevassa putkessa ovat huokospaineet kuitenkin nousseet pilarointityön aikana 0.6 metriä.

3.4.7 Vesinäytteet

Alueelle asennetusta pohjavesiputkesta on tarkistettu veden ominaisuudet 23.2.1999. Kaikki arvot alittavat talousvedeltä vaadittavat arvot. Veden pH-luku on 6.7, joten veden mahdollisesta kosketuksesta muoviseen vahvisteverkkoon ei pitäisi olla materiaalille haittaa.

Taulukko 9. Huokospainemittaukset.

Mittauspäivä	Putki 1	Putki 2	Putki 3	Työvaihe	Huomautukset
Kärjen syvyys	3,10 m	5,10 m	10,20 m		
02.07.98	3,08	3,05	2,86	0-mittaus	
29.10.98	3,01	2,99	2,82	Ennen pilarointityötä	
06.11.98		3,26	3,39	Pilarointityön jälkeen	hävinnyt
13.01.99		2,86	2,88	Vanha pengeri kaivettu	
20.01.99		2,72	3,05	Jakava kerros ajettu	

4 SEURANTAMITTAUSTEN TULOKSET

4.1 Painumatulokset

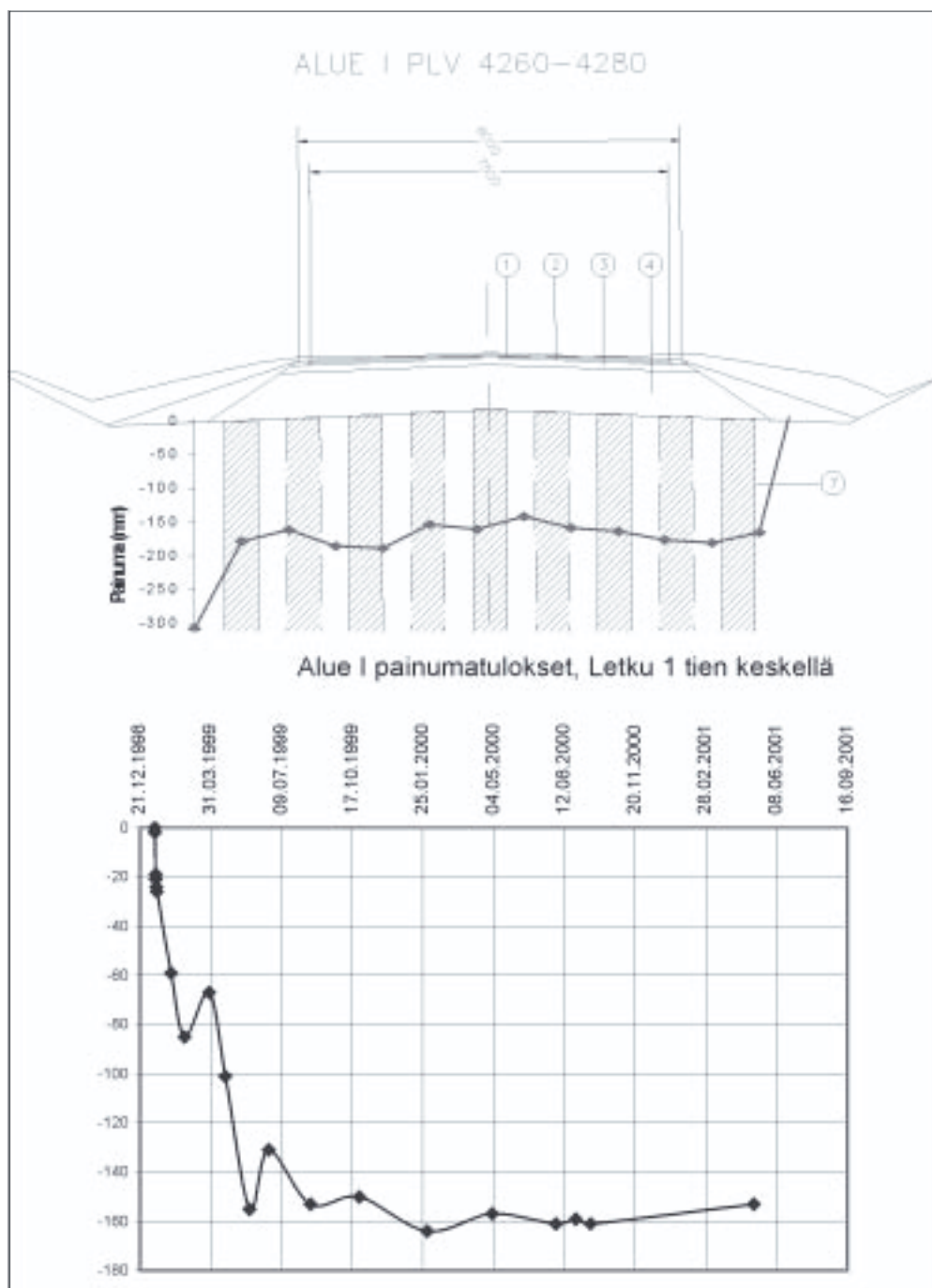
Painumamittausten tulkinta perustuu ainoastaan letkupainumamittausten antamiin havaintoihin. Painumalevyjä ei ole kairattu esiin, eikä niiden korkeusasemaa ole selvitetty letkupainumahavaintojen varmistamiseksi.

Painumamittausten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

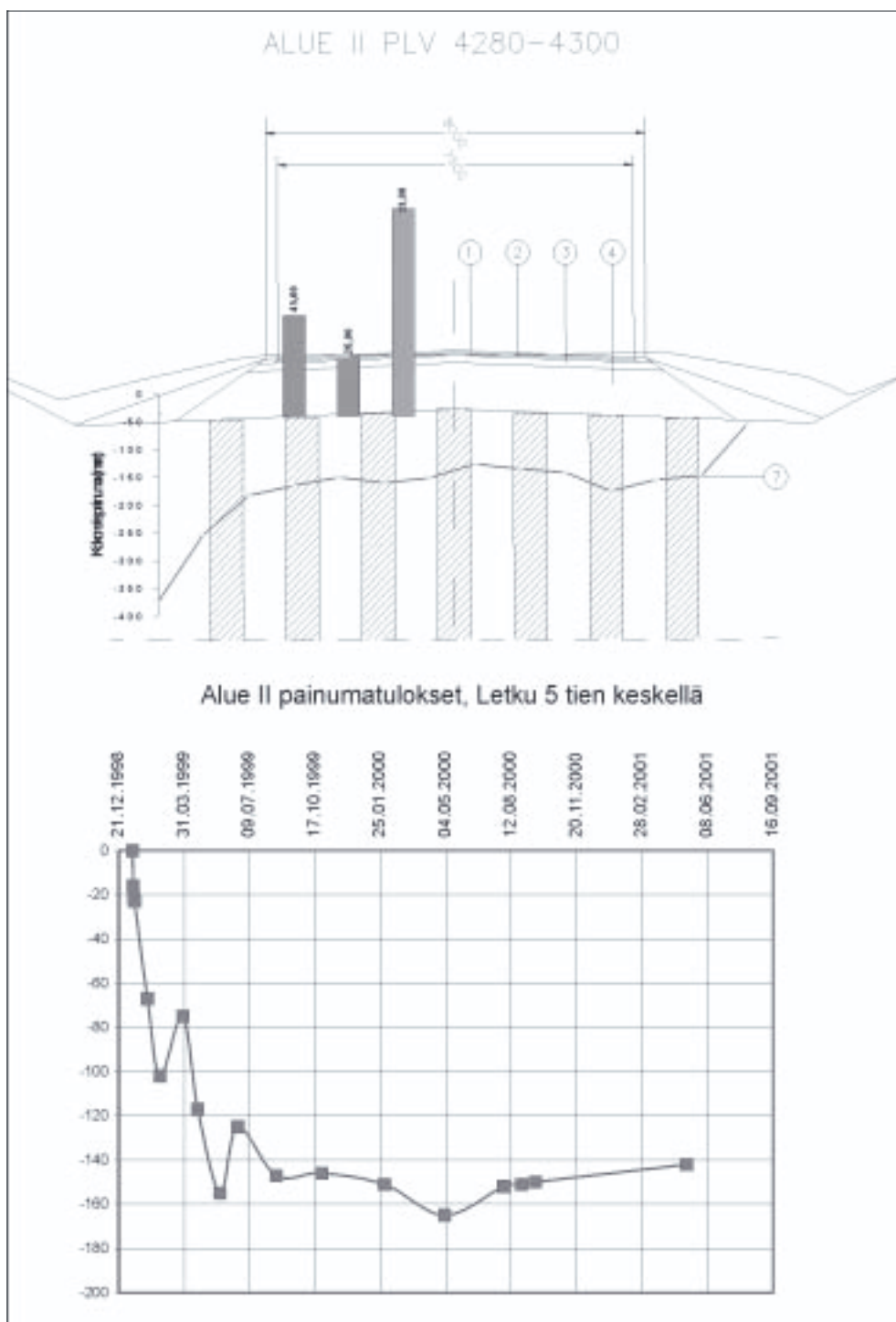
- Kaikilla alueilla painuminen on loppunut noin 4-6 kk kuluessa rakentamisen alusta (kuva 29)
- Vahvisteellisten alueiden III ja IV painumat ovat vain noin kolmasosa vahvisteettomien alueiden I ja II painumista (kuva 30)
- Periaatteessa voidaan sanoa, ettei painumia enää ole tulossa. Viimeisen vuoden aikana ei mittaustarkkuuden puitteissa ole muutoksia havaittu
- Alueet I ja II samoin kuin alueet III ja IV näyttävät käyttäytyvän keskenään samantapaisesti
- Painumaerojen pilarien keskellä ja pilarien välissä voidaan todeta olevan seuraavaa luokkaa
 - alueella II 10..15 mm
 - alueella III 6..8 mm
 - alueella IV 3..9 mm
- Alueen I painumaeroja ei voida erottaa koska pilarit ovat kolmioverkossa ja letkut kulkevat kohtisuoraan tien poikkisuunnassa. Mikään letkuista ei suoraan ole pilariväleissä, joten pilarivälin painumaa ei voida arvioida
- Sulamispainumaa ja routanousua ei ole esiintynyt mittaustarkkuuden puitteissa. Toisaalta mittausten aikana pohjamaa on saattanut jo olla sula
- Alueiden painumakäyttäytymisessä ei näyttäisi olevan eroa, mikäli alkumuodonmuutokset ensimmäisen puolen vuoden osalta jätetään huomioimatta
- Alueilla havaitut kokonaispainumat ovat alueilla I ja II noin 150 mm tien keskellä ja 40..50 mm alueilla III ja IV

Kuvissa 25..28 on esitetty alueiden tyyppipoikki-leikkauksissa painumaprofiili poikkisuunnassa sekä aika-painumakuvaaja letkupainumamittausten perusteella. Aika-painumakuvaaja on saatu piirtämällä kultakin alueelta letkupainumamittaritien keskellä olevan mittauspisteen havainnot. Kuvissa on mainittu kyseisen letkupainumamittarin numero. Samoissa kuvissa on esitetty myös maanpainetulokset.

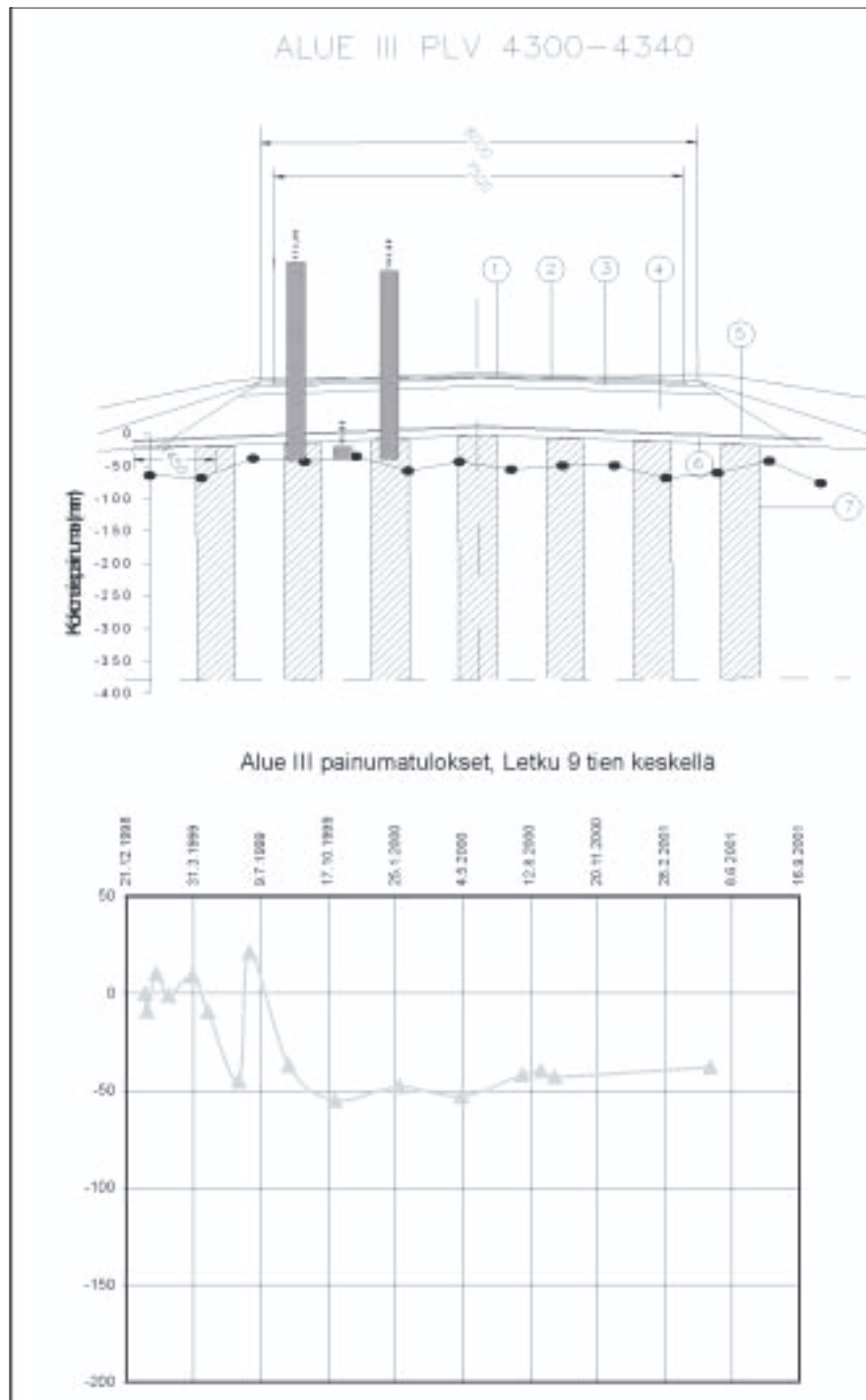
Erityisen mielenkiintoista olisi tarkastaa letkupainumamittareiden korkeusasema tien reunassa. Mittausten perusteella tien reunassa tai luiskassa olisi pitänyt tapahtua jopa 300 mm painumia. Tämä tarkoittaa sitä, että jos letkut kaivetaan varovasti esiin tien luiskasta, niin niiden korkeusaseman muutosten pitäisi näkyä mittauksissa verrattuna rakennusaikaisiin mittauksiin. Yhtenä syynä voi tietyksi olla myös se, että letkut ovat leikkautuneet maahan pengertöiden yhteydessä.



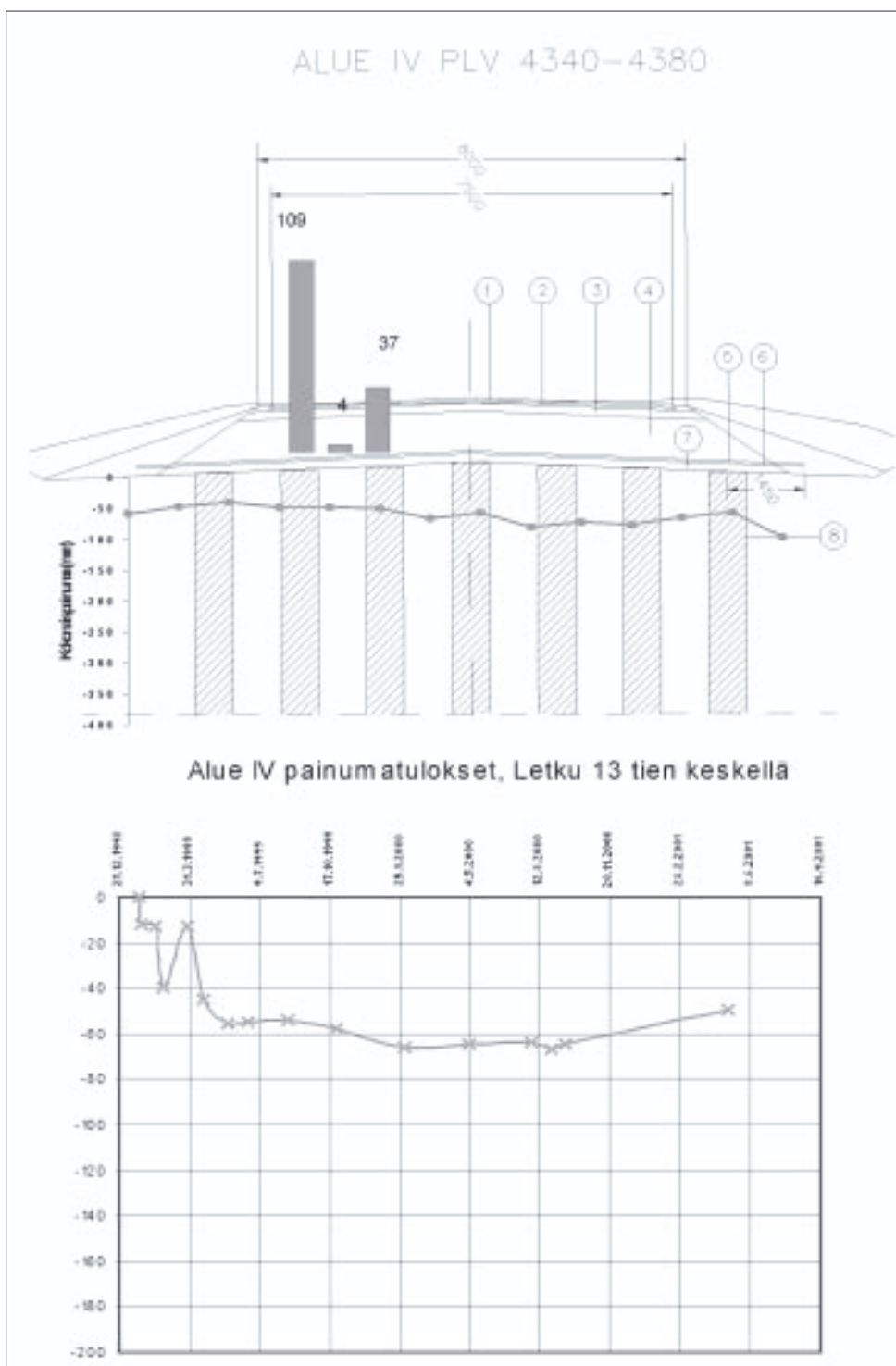
Kuva 25. Ylempi kuva: Painumaprofiili alueella I.
 Alempi kuva: Tien keskikohdan aika-painumakuvaaja.



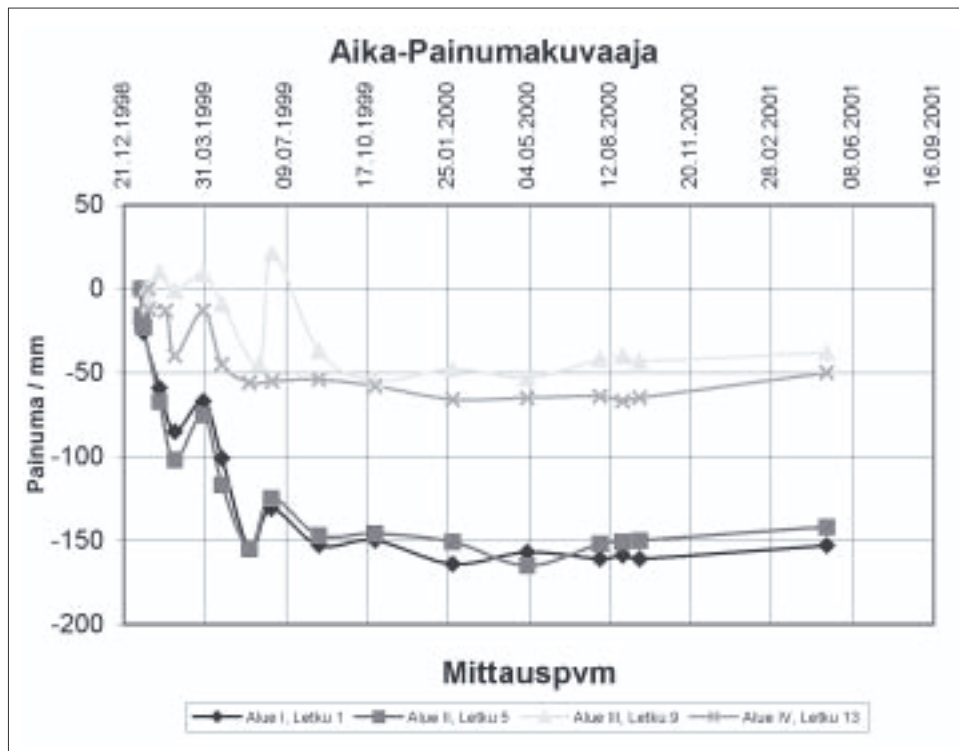
Kuva 26. Ylempi kuva: Painumaprofiili alueella II.
 Alempi kuva: Tien keskikohdan aika-painumakuvaaja



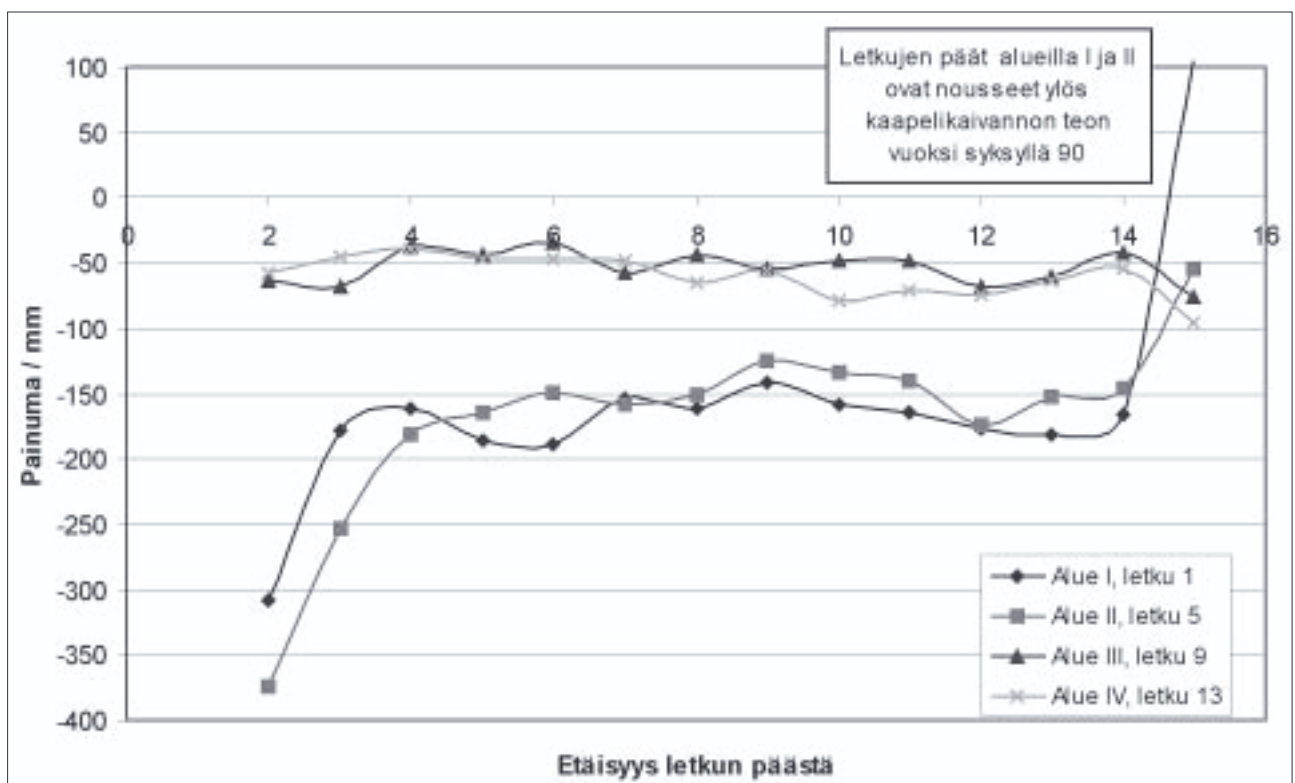
Kuva 27. Ylempi kuva: Painumaprofiili alueella III.
Alempi kuva: Tien keskikohdan aika-painumakuvaaja.



Kuva 28. Ylempi kuva: Painumaprofiili alueella IV.
 Alempi kuva: Tien keskikohdan aika-painumakuvaaja.



Kuva 29. Tyypilliset aika-painumakäyrät alueiden keskeltä otetuista painumaletkuista.

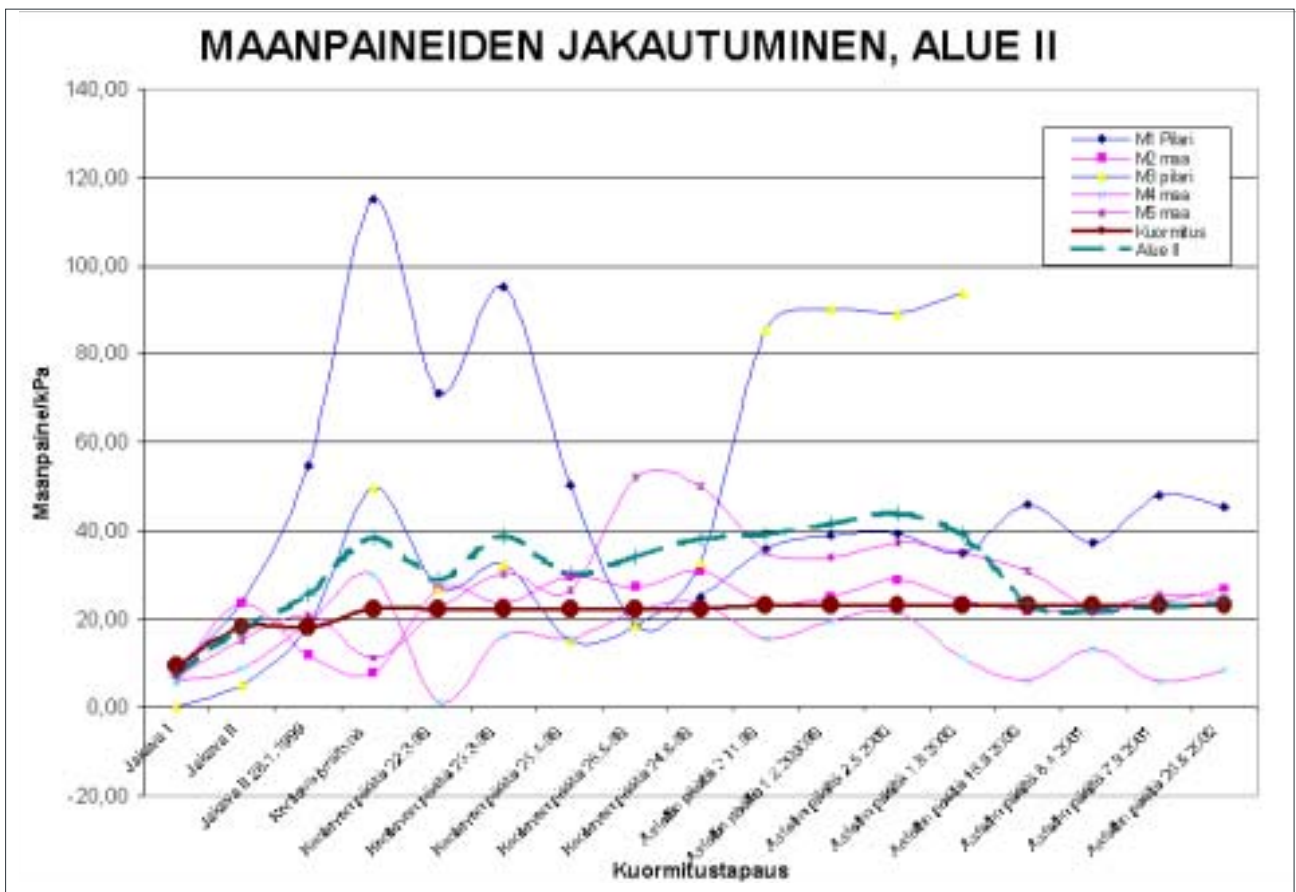


Kuva 30. Poikkisuuntaiset muodonmuutokset eri alueilla.

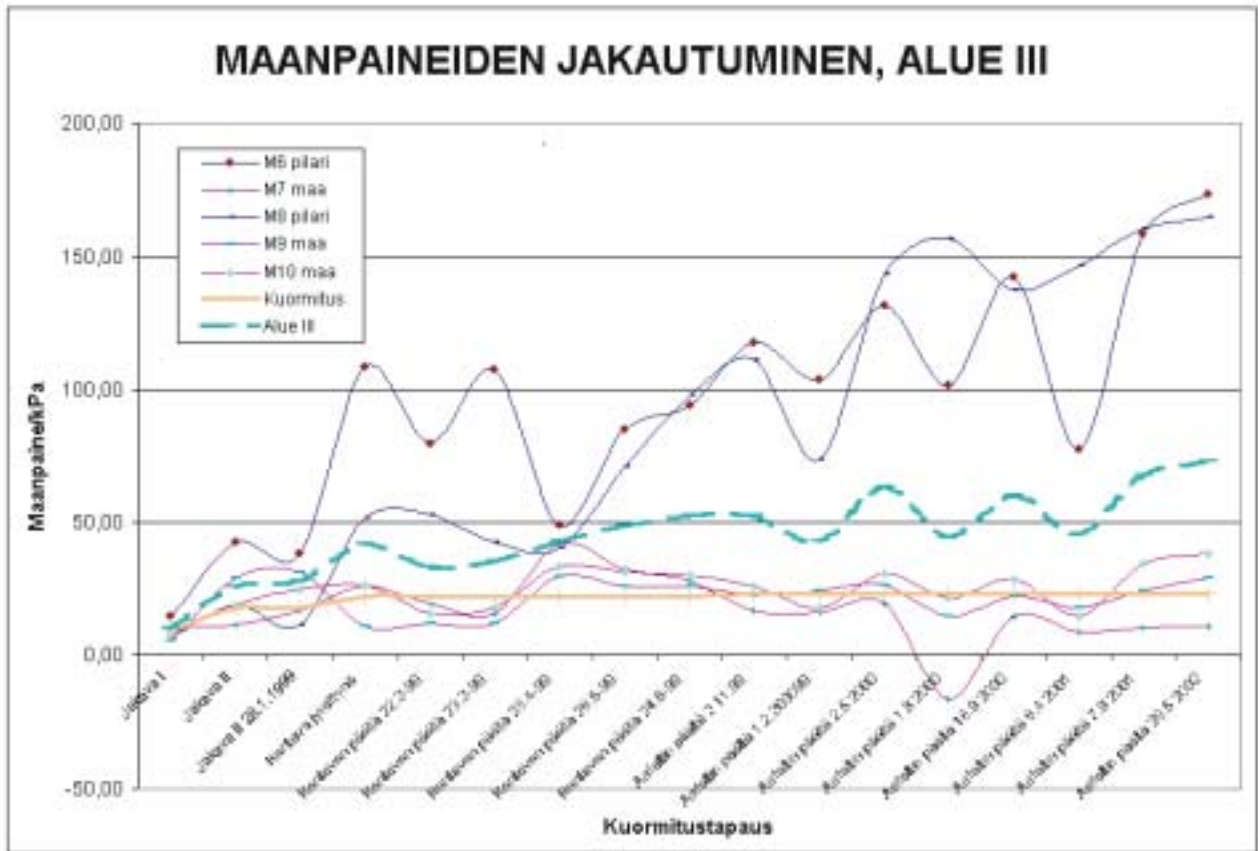
Kuvissa 31, 32 ja 33 on esitetty maanpaineiden kehittymistä ajan funktiona. Kuvaajista on poistettu mittaukset, joissa on ollut mukana ylimääräinen liikennekuorma. Täysi pengerkuorma on tullut kuormitukseksi vasta kesäkuussa 1999. Asfaltin vaikutus kokonaiskuormitukseen on kuitenkin vain 1 kN/m², ellei asfaltilla oleteta olevan jotain muuta vaikutusta esimerkiksi holvautumisen suhteen.

Maanpainemittausten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

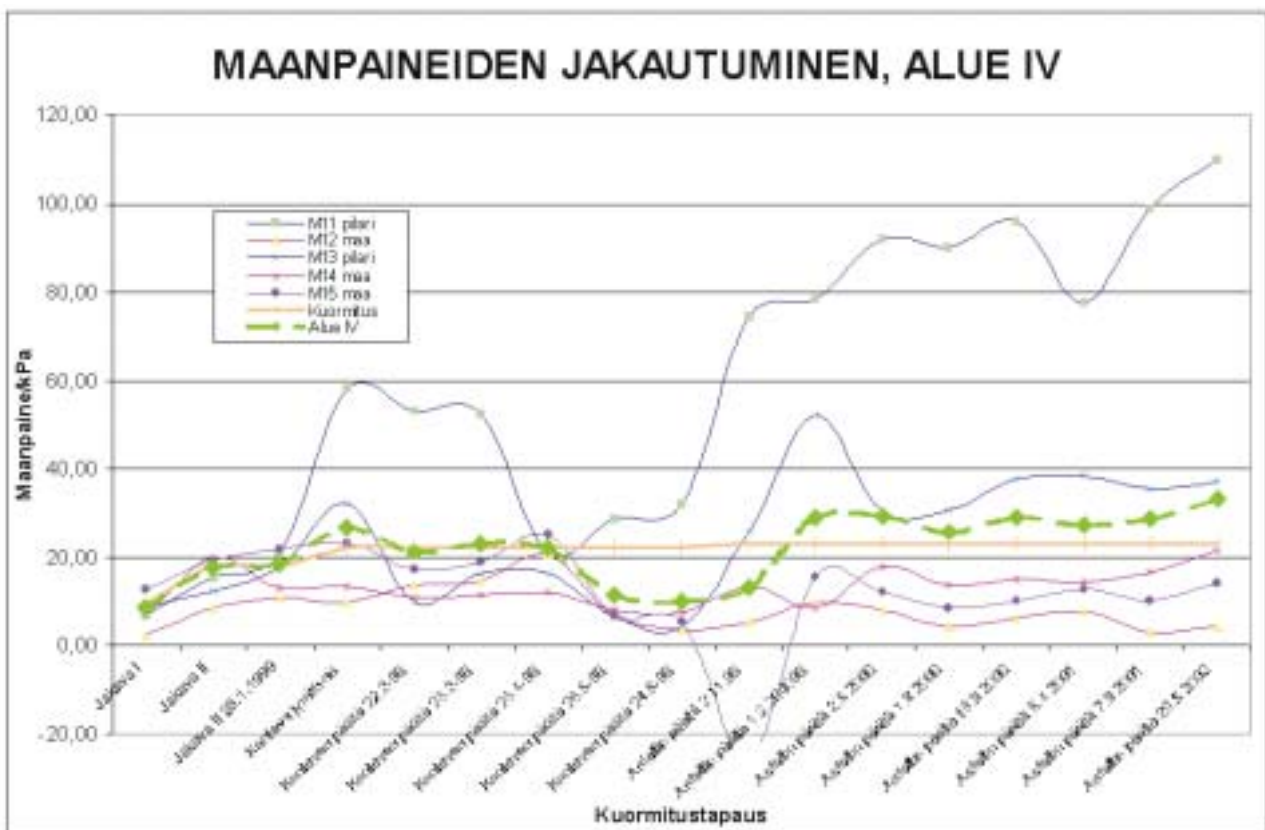
- Maanpaineet pilarien päällä ovat suuremmat kuin pilarien välissä. Suurimmillaan erot ovat alueella III, jossa pilarin päällä oleva kuorma on suurimmillaan 173 MPa ja pilareiden välissä 10 kPa
- Alueilla III ja IV näyttäisivät maanpaineet pilarien päällä lisääntyvän koko ajan. Alueella II maanpaineiden keskittyminen näyttäisi pysähtyneen. Tämä on mielenkiintoista sikäli, että painumat näyttävät pysähtyneen, vaikka kuorman keskittyminen jatkuu.



Kuva 31. Alue II maanpaineiden jakautuminen



Kuva 32. Alue III maanpaineteiden jakautuminen



Kuva 33. Alue IV maanpaineteiden kehittyminen

4.3 Venymämittaukset

Venymämittausten ongelma tuntuu jatkuvasti olevan venymien pienuus. Kaiken kaikkiaan toispuoleisen venymäliuskan toimiminen "oikealla" tavalla on kyseenalainen. Venymäliuskat liimataan mitattavaan kohtaan joten ei voida olla varmoja siitä, että mittari mittaa oikeaa suuretta. Koska mitattava säie on ulkomitoiltaankin pieni, vaikuttaa siihen myös muu mekaaninen käyttäytyminen kuin venyminen. Mitattavaan kohtaan saattaa syntyä esimerkiksi taipumaa, joita toispuoleisesta venymäliuskasta ei voida mitata. Tässä kohteessa maanpainneiden keskittyminen on ollut niin suurta, että vähintäänkin "loogisesti" ajatellen mitattavia venymiä pitäisi syntyä. Venymämittausten tuloksia ei tässä kohdassa esitetä vaan niihin palataan kohdassa koekuormitus.

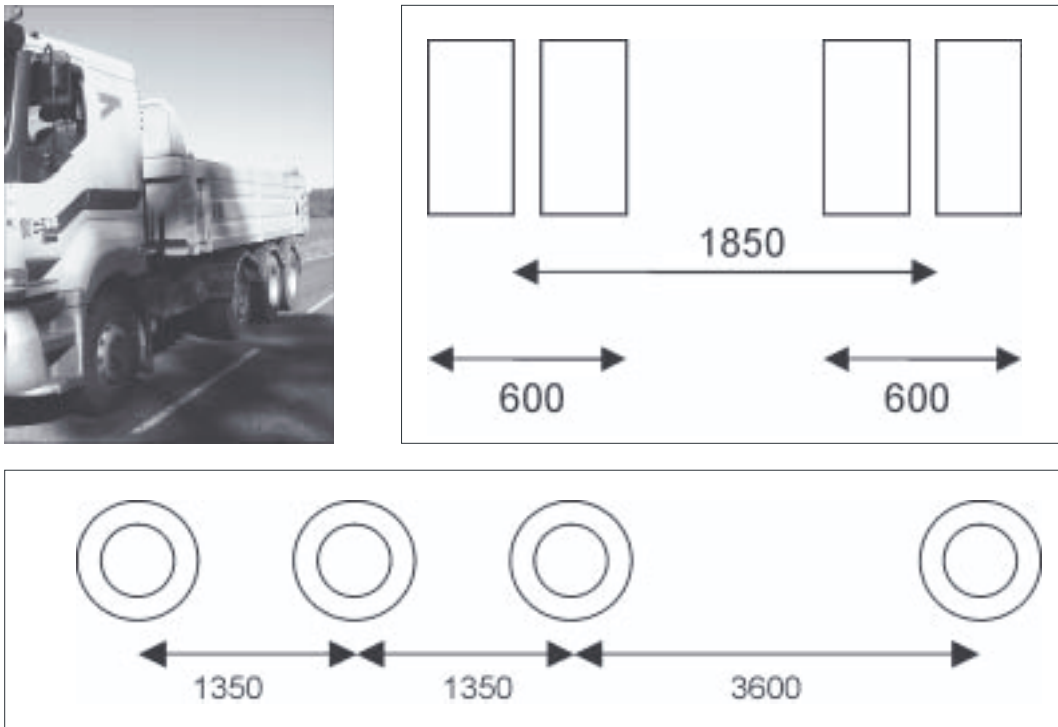
5 KOEKUORMITUS

5.1 Koekuormituksen suoritus

Koekuormitus suoritettiin 4- akselisella kuorma-autolla (kuva 34), jonka tekniset tiedot ovat seuraavat:

Kokonaispaino: kuorma päällä 32 900 kg
Painojakautuma: etuakseli 8000 kg
taka-akselit 6000 kg + 9950 kg
+ 8050 kg

Kuorma-auton renkaan kosketuskohdan pituus mittausten perusteella oli 250mm kun telipyörät olivat alhaalla.



Kuva 34. Kuormituskaluston mitat (mm). Ylemmässä kuvassa taka-akseliston mitat ja alemmassa kuvassa akselivälit.

5.2 Tehdyt mittaukset

Koekuormituspäivänä sää oli selkeä ja ulkolämpötila +20 astetta. Alkuperäistä koerakennesuunnitelmaa muutettiin työmaalla. Koekuormitus suoritettiin seuraavalla tavalla:

1. Nolla-mittaukset kello 8.00 tehtiin sekä maanpainemittareista että venymämittareista.
2. Kuorma-auton mittaukset kello 9.00
3. Maanpaine- ja venymämittaukset tehtiin kussakin kuormituspisteessä teli alhaalla ja ylhäällä
 - a. Sovittiin, että kuormituspisteinä käytetään ajoneuvon keskimmäisen taka-akselin apukuljettajan puoleista rengasparia
 - b. Sovittiin, että mittaukset tehdään kuvien 35 ja 36 mukaisissa paikoissa telipyörät alhaalla ja ylhäällä



Kuva 35. Alue III kuormituskohdat: numerot esittävät pilarien paikkoja



Kuva 36. Keskimmäisen taka-akselin apukuljettajan puoleiset paripyörät ajettiin kunkin kuormituspisteen kohdalle. Kuormittava akseli on varjostettu. Mittaukset tehtiin telipyörät ylhäällä ja alhaalla.

Mittaukset alueella IV:

1. Mittaus 4R1: Kuormitus aloitettiin alueelta 4, pilarin 419 päältä. Telipyörät pidettiin alhaalla. Kuormat sijaitsivat mittareiden M11, M13 ja M14 kohdalla. Mitattiin maanpaineet ja venymät.
2. Mittaus 4R2: Kuormituskohtana käytettiin alue 4 pilarin 419 kohtaa. Telipyörät pidettiin ylhäällä. Kuormat sijaitsivat mittareiden M11 ja M13 kohdalla. Paripyörät sijaitsivat suoraan pilareiden päällä. Mitattiin maanpaineet ja venymät.
3. Mittaus 4k1: Kuormitus sijaitsi pilarien keskellä. Telipyörät olivat alhaalla. Kuormat sijaitsivat mittarin M15 kohdalla ja osittain M12 kohdalla. Mitattiin maanpaineet ja venymät.
4. Mittaus 4k2: Kuormitus sijaitsi pilarien keskellä. Telipyörät olivat ylhäällä. Kuormitus sijaitsi mittarin M15 kohdalla. Mitattiin maanpaineet ja venymät. Kuormitusalue oli noin 400 mm pitkä koska rengas painui lyttyyn suuren kuorman vuoksi. Alueella 4 ei havaittu venymissä juurikaan muutoksia kuormituksen vaihteluista huolimatta.

Mittaukset alueella III:

1. Mittaus 3r1: Kuormitus pidettiin kaikilla aksleilla. Keskimmäinen akseli sijaitsi suoraan maanpaineanturin M6 päällä. Muut pyörät sijaitsivat maanpaineantureiden M8 ja M9 kohdalla. Mitattiin maanpaineet ja venymät.
2. Mittaus 3r2: Telipyörät pidettiin ylhäällä. Kuormitus sijaitsi maanpainemittareiden M6 ja M8 kohdalla. Mitattiin maanpaineet ja venymät.
3. Mittaus 3k1: Kuormitus oli kaikilla aksleilla. Kuorma sijaitsi maanpainemittarin M10 kohdalla ja osittain M8 kohdalla. Mitattiin maanpaineet ja venymät.
4. Mittaus 3k2: Telipyörät pidettiin ylhäällä. Venymämittari V9 antoi erittäin suuren mittausarvon muutoksen. Kuormitus sijaitsi vain maanpainemittarin M10 kohdalla. Mitattiin maanpaineet ja venymät.

Mittaukset alueella II:

1. Mittaus 2r1: Kuormitus pidettiin kaikilla aksleilla. Keskimmäinen akseli sijaitsi maanpainemittarin M1 kohdalla. Muut kuormituskohdat sijaitsivat maanpainemittareiden M3 ja M4 kohdalla. Mitattiin maanpaineet.

- Mittaus 2r2: Mittaukset tehtiin kuten edellä, mutta telipyörät pidettiin ylhäällä. Mitattiin maanpainheet.
- Mittaus 2k1: Kuorma pidettiin kaikilla akseleilla. Keskimmäisen akselin oikeanpuoleiset paripyörät sijaitsivat maanpainemittarin M5 kohdalla. Etummainen taka-akseli sijaitsi maanpainemittarin M2 kohdalla. Mitattiin maanpainheet.
- Mittaus 2k2: Mittaukset tehtiin telipyörät ylhäällä. Kuorma sijaitsi vain maanpainemittarin M5 kohdalla.

5.3 Kuormitusten suuruudet

Edellisessä kappaleessa on esitetty kuorma-auton mitat ja painojakautuma. Lähtötietojen perusteella voidaan arvioida kuormitusten olevan seuraavankaltaisia maanpainantureiden tasossa.

Kuormitustapaus 1: Telit pidettiin alhaalla. Kuormituspinta-ala rengasparin kohdalla oli 0.2mx0.6m asfaltin tasossa ja 1.45x1.8m antureiden tasossa. Kuormituksen arvioitiin jakautuvan 2:1 säännöllä.

	Taka-akseli	Keski-akseli	Etu-akseli
Kokonaiskuorma F	41 kN	51 kN	31 kN
Pinta-kuorma asfaltilla (0.2x0.6m)	276 kPa	341 kPa	205 kPa
Kuorma antureiden tasolla (1.8x1.45m)	15 kPa	19.6 kPa	12 kPa

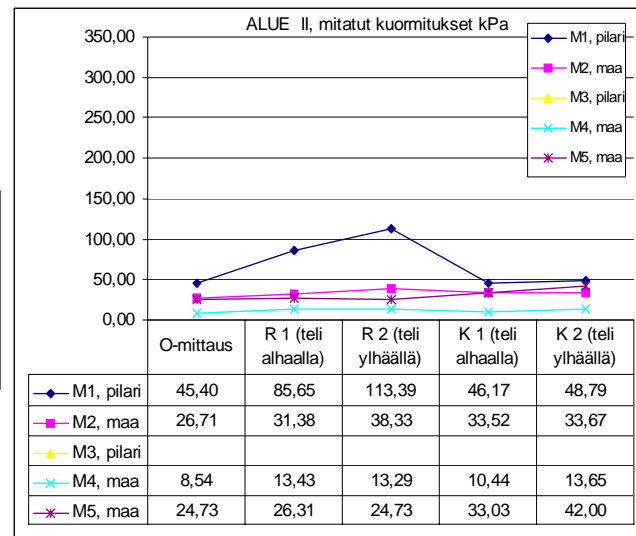
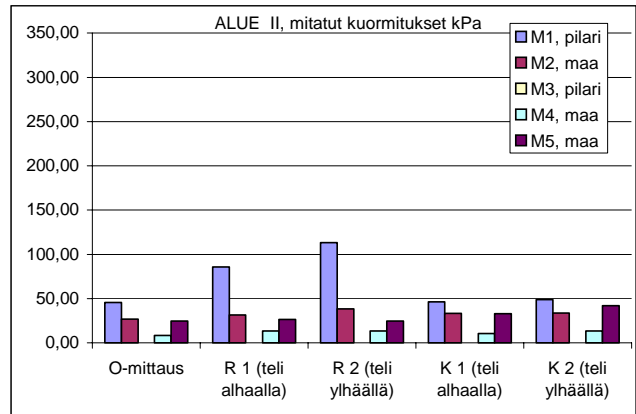
Kuormitustapaus 2 : Telipyörät pidettiin ylhäällä. Kuormituspinta-ala rengasparin kohdalla oli 0.4 m x 0.6 m asfaltin tasossa ja 1.6 m x 1.8 m antureiden tasossa.

	Taka-akseli	Keski-akseli	Etu-akseli
Kokonaiskuorma F	0	120 kN	0
Pinta-kuorma asfaltilla	0	498 kPa	0
Kuorma anturitasolla	0	42 kPa	0

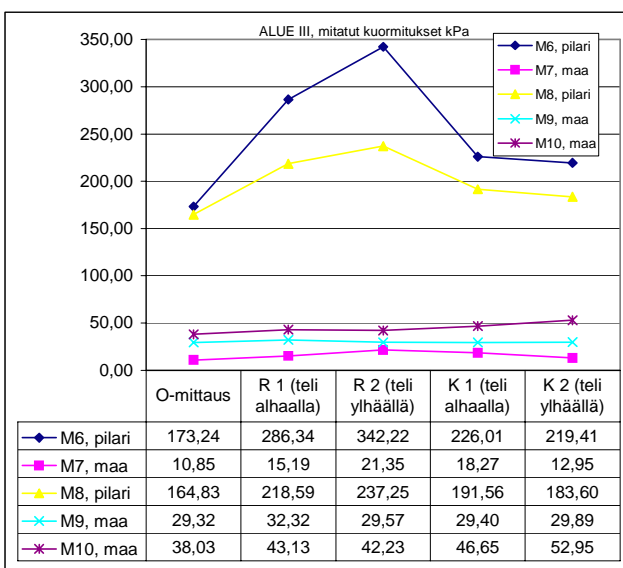
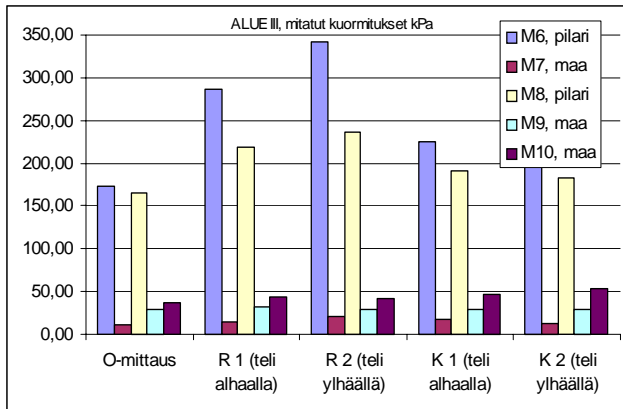
5.4 Mittaustulokset

5.4.1 Maanpainemittaukset

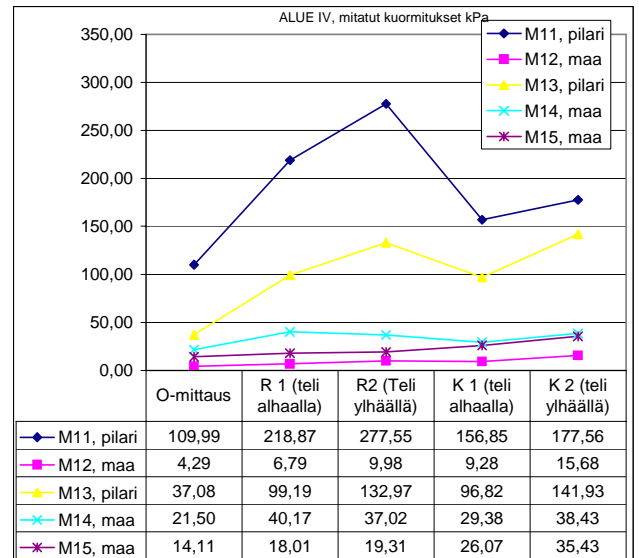
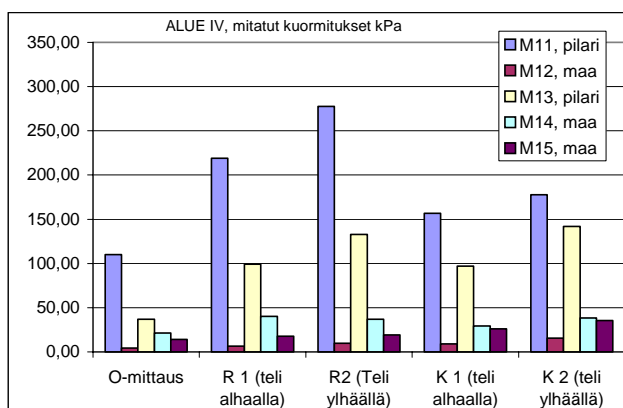
Kuvissa 37, 38 ja 39 on esitetty maanpainemittaukset kultakin alueelta eri kuormitustilanteissa.



Kuva 37. Alue II kuormitustulokset



Kuva 38. Alue III kuormitustulokset



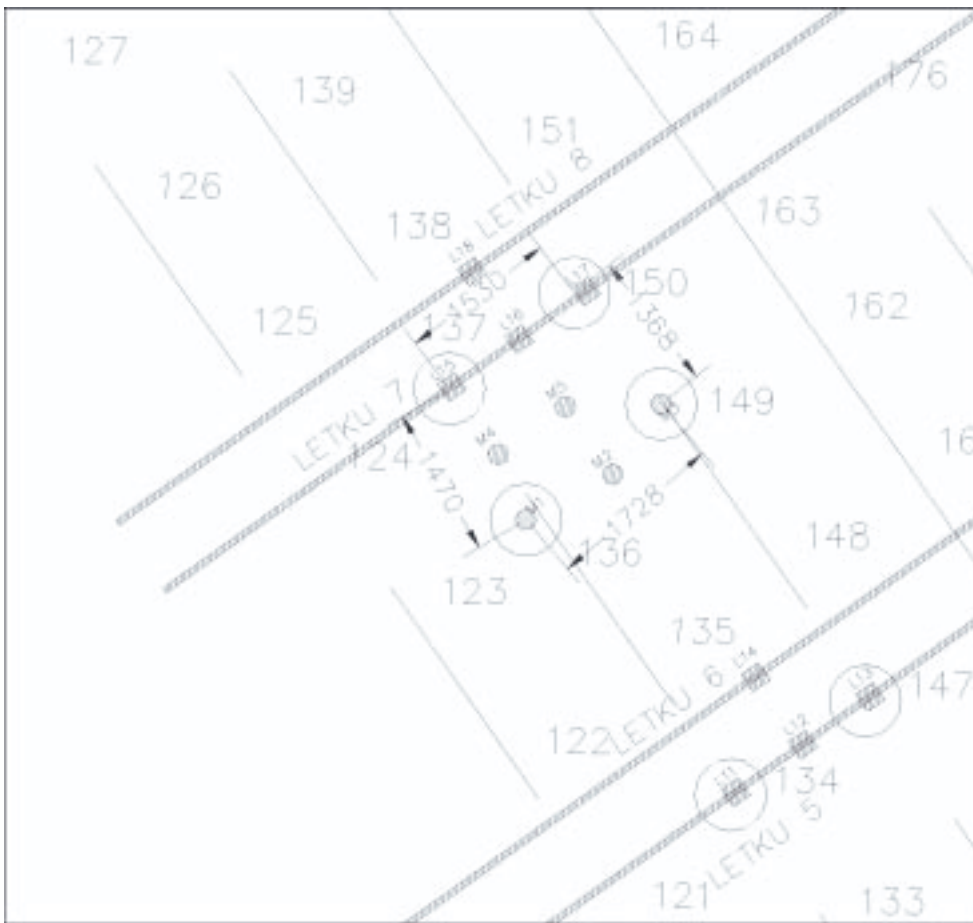
Kuva 39. Alue IV kuormitustulokset

Maanpainemittausten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

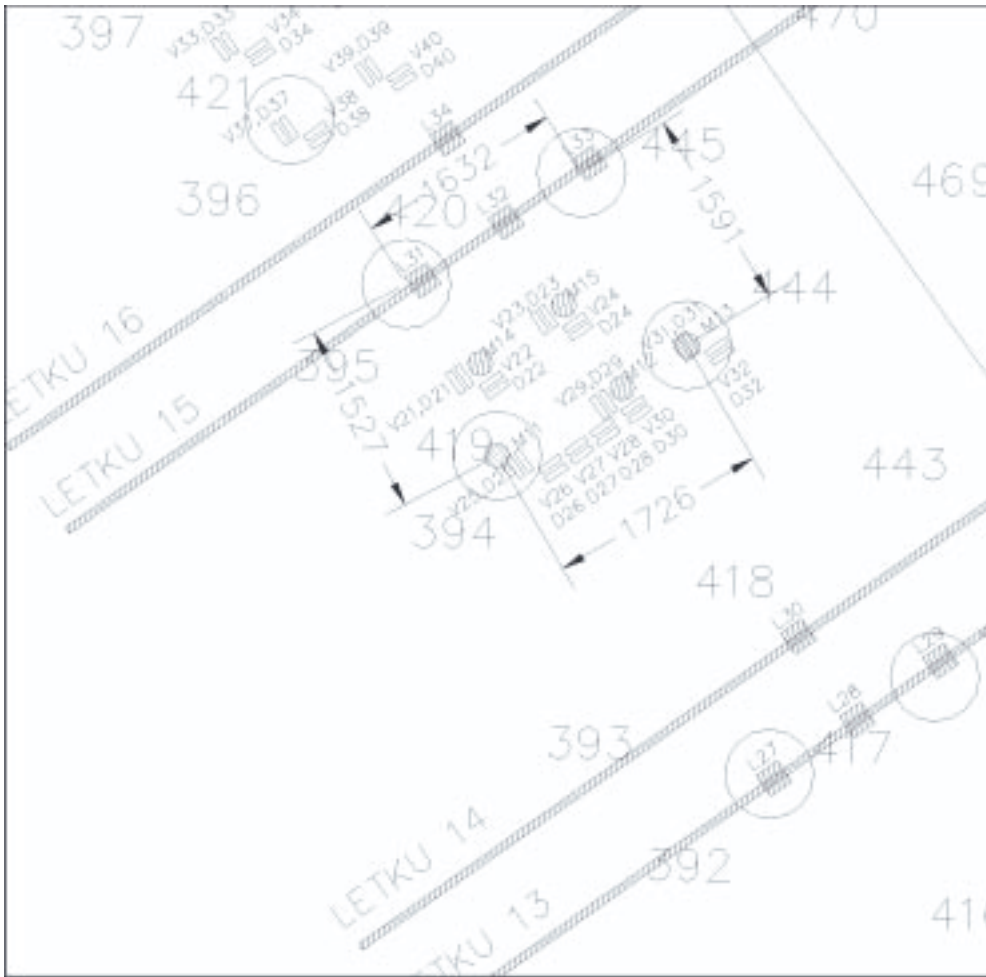
- Vahvistealueilla kuormitus jakautuu selvästi enemmän pilareille verrattuna alueisiin, joilla ei ole vahvistetta. Kuormituksen lisäys on vahvistealueilla jopa 2.5 kertaa suurempi kuin vahvisteettomalla alueella.
- Pilarien välissä maanpaineen kehittyminen vastaa suurin piirtein 2:1 kuormitusjakautumalla saatavia maanpaineen lisäyksiä. Kuormituksen lisäys on noin 15..20 kPa. Tämä voidaan erityisesti nähdä mittauksista, joissa kuormitus on pilarien keskellä sijaitsevien maanpainantureiden kohdalla. Jännitysliisäys pilarien välissä on vain 15..20 kPa, vaikka pilarin päälle saadaan vastaavassa kuormitustilanteessa jopa 175 kPa jännitysliisäys.
- Erittäin huomioitava seikka on nähtävissä, kun verrataan kuormitustapauksia, joissa kuormitus on siirretty pilarilta pilarien väliin. Vahvisteettomalla alueella jännitys palautuu pilarin päällä tasolle, jolla se oli 0-mittauksen aikana. Täten näyttäisi siltä, että vahvisteettomalla alueella pilarin välissä oleva kuorma ei jakaannu pilareille. Vahvistetuilla alueilla pilarien kohdalle siirtyy selvästi kuormaa vaikka kuormitus on pelkästään pilarien välissä. Erityisen selvästi tämä näkyy alueella IV. Kuormitus on pilarin kohdalla jopa 105 kPa 0-tilannetta suurempi, vaikka varsinaisessa kuormituskohdassa maanpaineen lisäys on

vain noin 20 kPa. Alueella III tämä ei ole nähtävissä yhtä selvästi, mutta silti pilarin päällä oleva kuormituslisäys on suurempi kuin pilarin välissä.

Kuvissa 40, 41 ja 42 on esitetty kuormituskohteiden pilarien toteutumapaikat ja pilarien väliset etäisyydet. Reunimmaisesta pilarin päällä oleva rengaspari on ainoa kohta jossa voidaan todeta kuormituksen olevan tarkasti pilarin päällä. Pilarien väliset etäisyydet eroavat melkoisesti toisistaan.



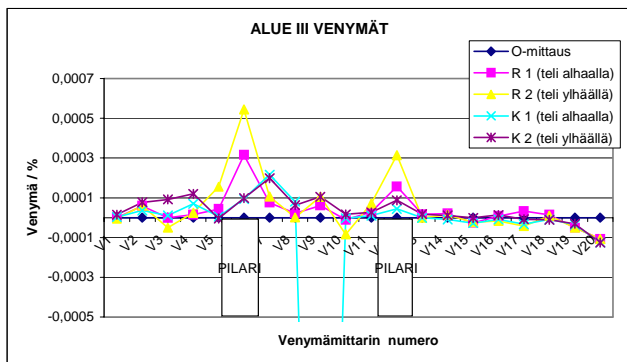
Kuva 40. Alue II toteutuneet pilarien paikat



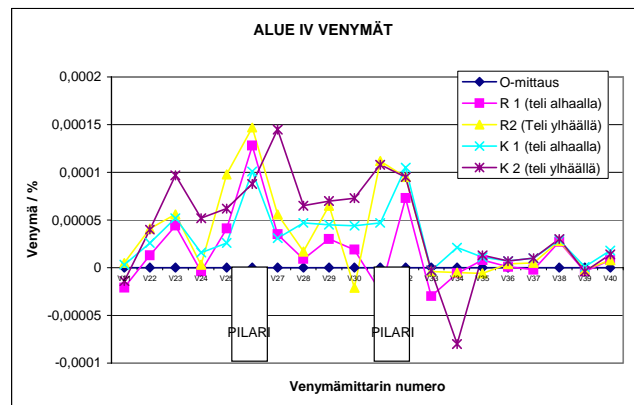
Kuva 42. Alue IV toteutuneet pilarien paikat

5.4.2 Venymämittaukset

Kuvissa 44 ja 45 on esitetty graafisesti venymien muutokset 0-mittaukseen verrattuna eri kuormitustilanteissa.



Kuva 44. Venymämittaukset alueella III



Kuva 45. Venymämittaukset alueella IV

Venymämittausten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

- Eriytyinen huomio tehtiin venymämittarissa V12. Siirrettäessä kuormitus pilarien keskele, muuttui V12 huomattavasti kaikkia muita venymäliuskoja enemmän. Kyseinen venymämittari mitattiin vielä uudestaan, jotta saatiin tarkistettua venymäliuskan toimivuus. Kun kuormitustapa muutettiin nostamalla teli-pyörät ylös, palautui myös venymä edeltävälle tasolle. Maksimivenyvä/kutistuma kuormituksesta johtuen oli noin -0.4% .
- Toinen huomattava seikka on se, että kuormitustavasta riippumatta suurimmat venymien muutokset keskittyvät poikittaisten pilarilinjojen kohdalle. Pituussuuntaisten pilarilinjojen välissä taas ei juurikaan tapahdu venymämuutoksia. Alueella IV kaikissa kuormitustapauksissa suurimmat venymät tulevat pilarien kohdalle. Alueella III kuormituksen siirryessä pilarien välille, syntyvät suurimmat venymät suoraan poikittaisten pilarilinjojen pilarien välille.
- Venymiä ei tapahdu venymäliuskoissa, jotka sijoittuvat pilarien väliin tien pituussuunnassa. Mittarit, jotka ovat suoraan poikittaisten pilarilinjojen välissä, reagoivat voimakkaasti
- Kaiken kaikkiaan venymät ovat niin pieniä, ettei vahvistevoimia juurikaan mobilisoidu.
- FM-laskelmissakin suurimmat verkkojen muodonmuutokset tapahtuvat pilarien päällä.

6 MITTAUSTULOSTEN JA MITOITUSLASKELMIEN VERTAILUT

6.1 Painumatulokset

Painumamittausten tulkinta perustuu ainoastaan letkupainumamittausten antamiin havaintoihin. Painumalevyjä ei ole kairattu esiin, eikä niiden korkeusasemaa ole selvitetty letkupainumahavaintojen varmistamiseksi.

Taulukkoon 11 on koottu lasketut ja mitatut painumat. Mitatut painumat ovat tien keskilinjan kohdalta.

Taulukko 11. Yhteenveto painumatuloksista

	Plaxis	Abaqus	Syvästabilointi-ohje TIEL 3200465	Mitatut
	mm			mm
Alue I:	38		70	153
Alue II:	42	41	40	142
Alue III:	43	41		38
Alue IV:	43	40		50

Oleellinen ero on vahvisteellisten ja vahvisteettomien alueiden painumissa. Alueiden I ja II painumat ovat kolminkertaisia alueisiin III ja IV verrattuna. Elementtilaskelmien perusteella painumissa ei kuitenkaan pitäisi olla eroa. Painumaprofiili on alueilla I ja II muutoinkin erikoinen, sillä penkereen reunat painuivat huomattavasti enemmän kuin tien keskiosa.

Syvästabilointiohjelmalla tehdyt laskelmat eivät huomioi vahvisteverkkoja. Alueen II mitoituksessa pilarin on oletettu toimivan lujina pilareina ja alueella I puolilujina (Syvästabiloinnin mitoitushje TIEL 3200465). Laskelmaesimerkki on esitetty kappaleessa 2 kohdassa 2.2 (kuva 8).

Vahvisteellisilla alueilla lasketut ja mitatut painumat ovat samaa suurusluokkaa. Elementtilaskelmien perusteella painumat ovat lähes samansuuruisia riippumatta siitä onko pilareiden päällä vahvistetta vai ei.

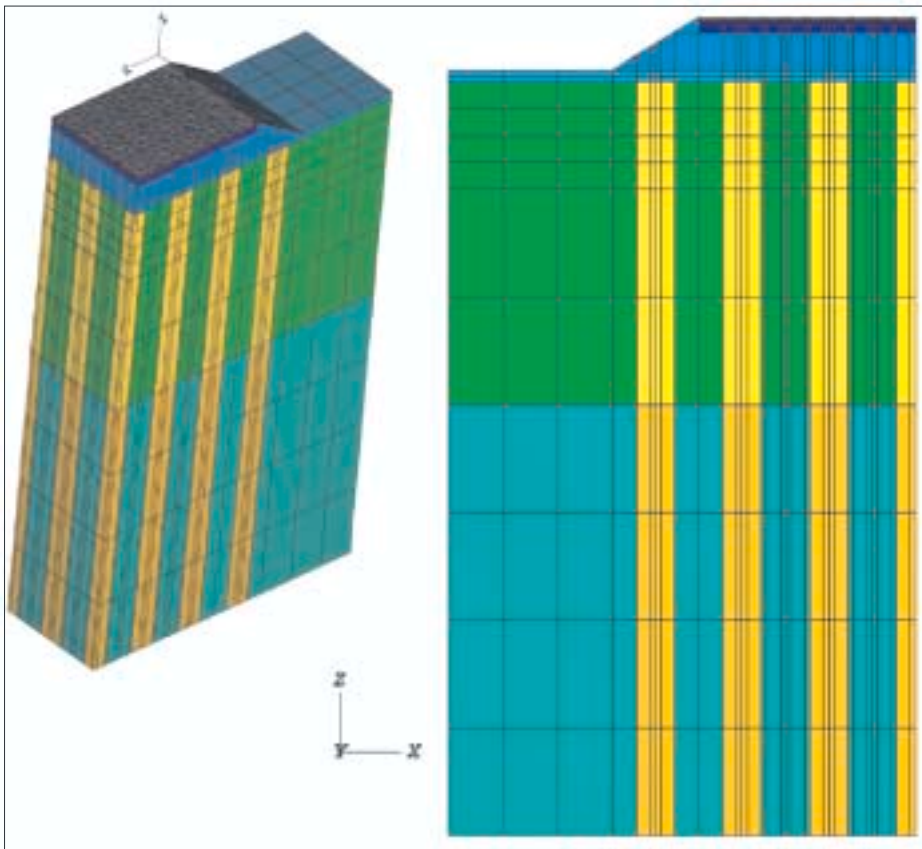
6.2 Jännitysjakautumat

Taulukossa 12 on esitetty laskelmien antamat jännitykset ja mitatut jännitykset.

Taulukko 12. Yhteenveto jännityslaskelmista ilman liikennekuormaa

Alue	Plaxis	BSI	Bautech-nik	Stabilointiohje/ kovana pilari	ABAQUS 3D	Mitatut arvot
II pilari	127.7	-	-	168 (320)	127.1	45..93
maa	21.5	-	-	0	4.2	25..27
III pilari	126.2	79	63..87	168 (320)	127.9	165..173
maa	21.5	21	16..11	0	4.2	11..29
IV pilari	125.1	79	63..87	168 (320)	127.1	37..110
maa	21.3	21	16..11	0	4.7	4..22

Taulukossa on suluisissa esitetty syvästabilointiohjeen mukaisesti syntyvät jännitykset liikennekuorman kanssa. Kaikkien mitoitusskalmien perusteella ei ole eroa sillä onko pilarien päällä vahvistetta vai ei. Tämä ei kuitenkaan voi pitää paikkaansa sillä mitattujen jännitysten perusteella jännityserot ovat kuitenkin olemassa.



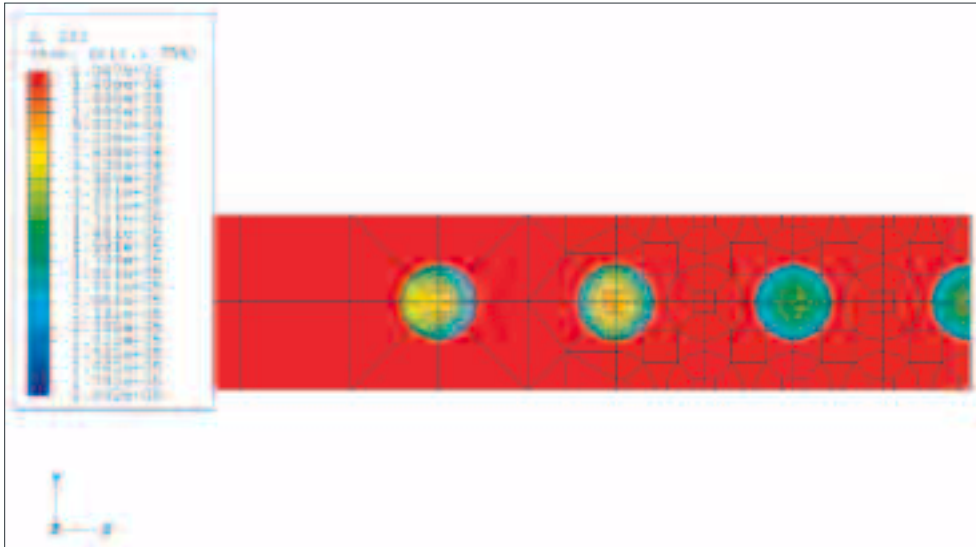
Kuva 46. Abaqus analysoinneissa käytetty mallinnusverkko

Taulukoissa 13 ja 14 on esitetty Abaqus-laskelmien (kuva 46) tulokset ja koekuormituksessa mitatut tulokset.

Taulukko 13. Yhteenveto jännityslaskelmista alueella IV (teräsverkkoalue)

Pystyjännitys tai mitattu maanpaine [kPa]			
	M13 pilari	M11 pilari	M12 maa
ABAQUS			
omapaino	120	120,5	3,8
R2	200	250	5,2
Koekuormitus			
omapaino	37,08	109,99	4,29
R2	132,97	277,5	9,98

Kuormitus jakautuu Abaqus-mallissa epätasaisesti. Pilarien laidassa on selvästi keskiosia suuremmat kuormahuiput. Maksimipystyjännitys maanpainemittarissa M11 on noin 250 kPa ja vaihteluväli 100 – 250 kPa. Maanpainemittarissa M13 maksimijännityksen arvo oli noin 200 kPa ja vaihteluväli 120 – 200 kPa. Mikäli rakenne oikeastikin käyttäytyy näin, selittää se osaltaan myös maanpainemittareiden tulosten vaihtelua. Mittaritan eivät ole välttämättä juuri pilarin keskellä tai reunalla. Kuvas-
vassa 47 on esitetty jännitysjakautumaa pilarikentässä.

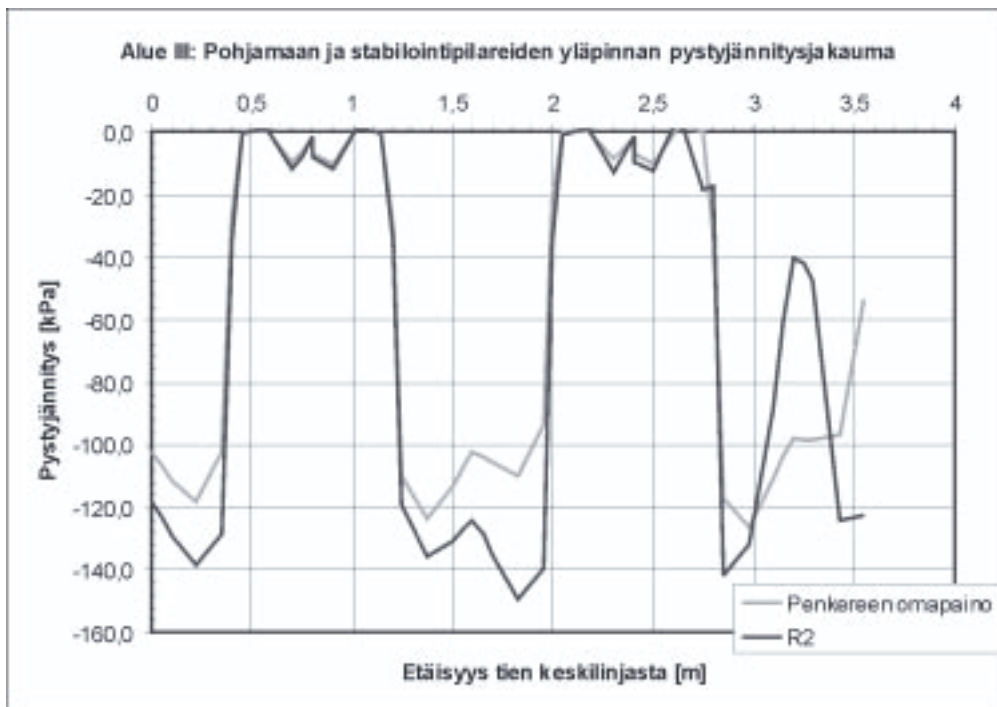


Kuva 47. Pilarien jännityksen jakautuma Abaqus-laskelmien perusteella

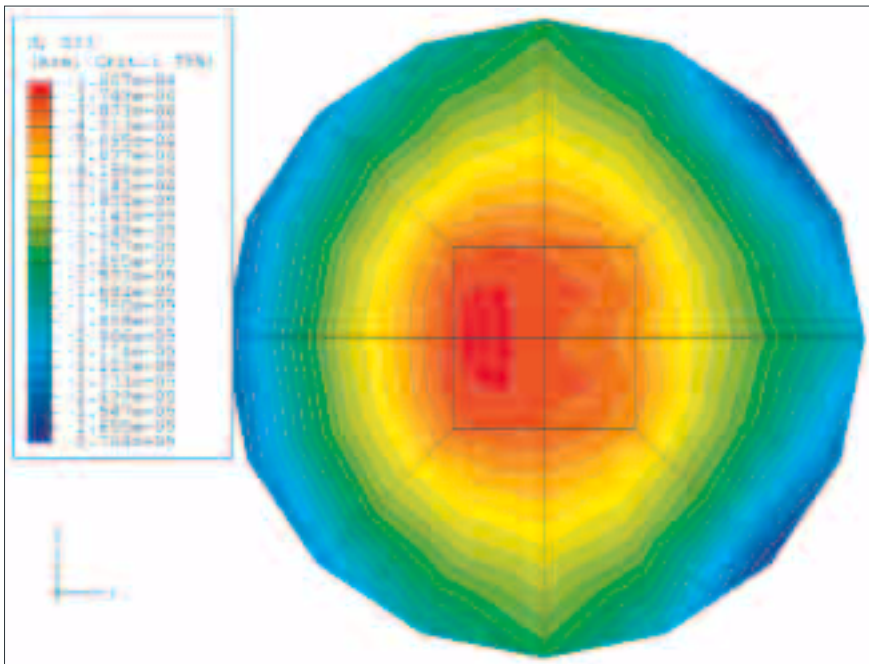
Taulukko 14. Yhteenveto jännityslaskelmista alueella III.

Pystyjännitys tai mitattu maanpaine [kPa]			
	M6 pilari	M8 pilari	M7 maa
ABAQUS			
omapaino	120	122	10
R2	270	200	14
Koekuormitus			
omapaino	173,24	164,83	10,85
R2	342,22	237,25	21,35

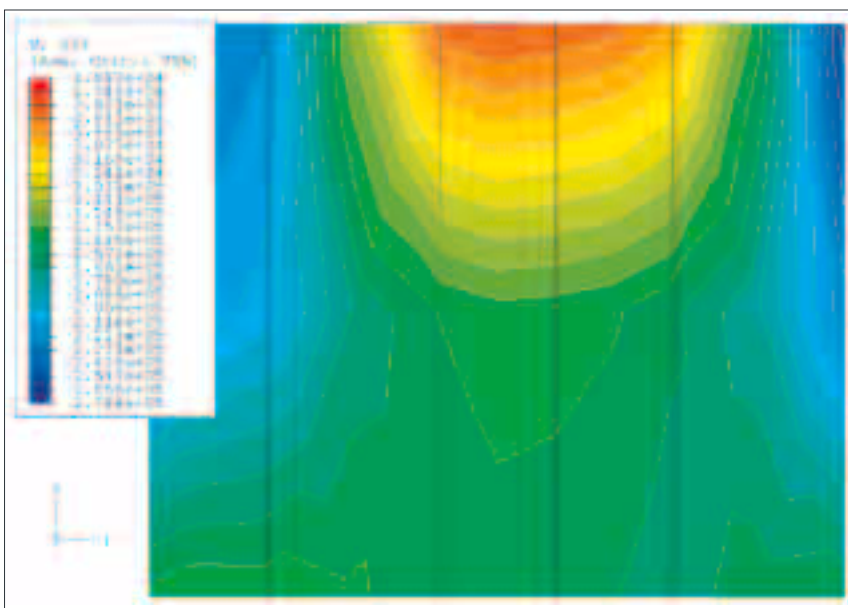
Jännitys jakautuu mallissa epätasaisesti pilarien päihin siten, että pilarien reunaosilla on selvästi keskiosia suuremmat kuormahuiput aivan kuten alueen IV laskelmissa (kuva 48, 49, 50). Jakautumapiirroksista saatu maksimipystyjännitys maanpainemittarissa M6 270 kPa vaihteluvälillä ollessa 65-270 kPa. Maanpainemittarin M8 maksimijännityksen arvo oli noin 200 kPa.



Kuva 48. Pohjamaan ja stabilointipilareiden yläpinnan pystyjännitysja kauma leikkauslinjalla I – I, (kuva 6, tien keskilinja = 0 m). Jännityshuiput eivät näy kuvassa, koska ne syntyvät leikkauskohtaan nähden kulmittain.



Kuva 49. Alueen III kuormituksen alapuolella olevan pilarin yläpäähän pystyjännitysjaakaumat, vaakaleikkaus paalun yläpäältä



Kuva 50. Pystyleikkaus paalun yläpäältä (korkeus 0,5 metriä)

Tuloksia tulkittaessa voidaan todeta Abaqus-laskelmien ja koekuormituksessa mitattujen arvojen vastaavan hyvin toisiaan. Toisaalta voidaan todeta, ettei täysin väärä laskentatapa ole vaihtoehto, jossa kaiken kuorman oletetaan menevän pilareille (320 kPa).

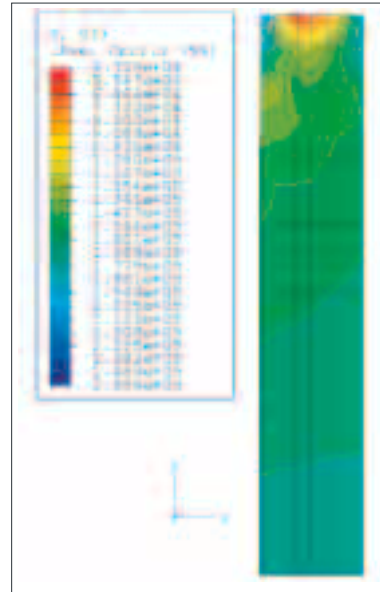
Taulukko 15. Yhteenvedo jännityslaskelmista alueella II (Referenssialue)

Pystyjännitys tai mitattu maanpaine [kPa]			
	M1 pilari	M3 pilari	M2 maa
ABAQUS			
omapaino	120,4	116,6	3,8
R2	255	200	9
Koekuormitus			
omapaino	45,40	93,74 (vanha)	26,71
R2	113,39	-	38,33

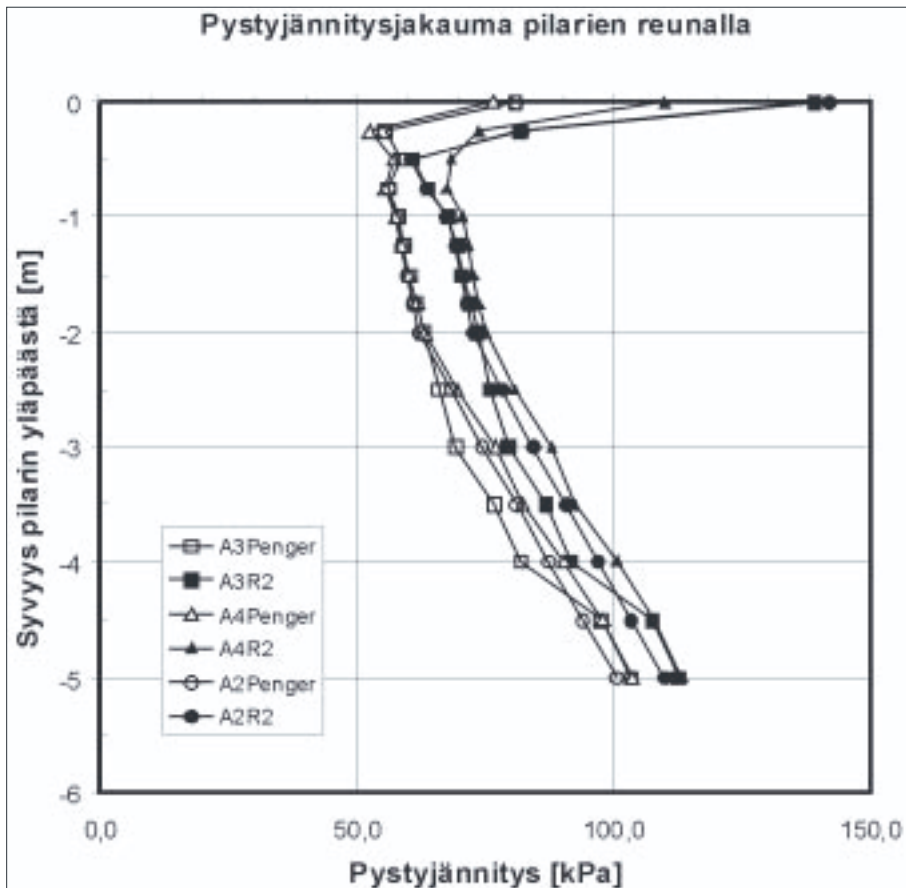
Alueella II laskennat eroavat mitatuista arvoista huomattavasti enemmän kuin muilla alueilla (taulukko 15). Tämän eron voi selittää Abaqus-laskennan tapauksessa sillä, ettei malli ota konsoli-daatiota huomioon.

Alueella II on todettu noin kolminkertaiset painumat kuin vahvisteellisilla alueilla. Tämän vuoksi tuntuukin loogiselta, että maanpaineet alueella II pilarien välissä ovat suuremmat kuin mitä vahvisteellisilla alueilla.

Kuvassa 51 on esitetty Abaqus-laskelmista saatava pilarin yläpäähän jännitysjakautuma.



Kuva 51. Referenssi-piikkileikkauksen pilarin yläpäähän pystyjännitysjakauma alueella II täydellä liikennekuormalla R2 ja jakaumakuvaaja pilarin pystyleikkauksessa välillä 1 – 4 m. Pilarin yläpäähän maksimipuristusjännitys oli 255 kPa



Kuva 52. Pystyjännitysjakaumat (Abaqus) pilarin yläosissa lasketuissa kuormitustapauksissa

Kuvassa 52 on esitetty Abaqus-laskelmilla saatavat pilarien jännitysjakautumat eri alueilla ja eri syvyyksillä. Laskelmilla voidaan todeta vahvisteellisten alueiden jakavan pilarien yläpäähän huomattavasti enemmän kuormaa kuin vahvisteetomilla alueilla. Kuitenkin jo puolen metrin syvyydessä voidaan havaita jännitysten tasoittuvan hyvin nopeasti.

6.3 Venymämittaukset

Venymämittausten venymät ilman liikennekuormitusta ovat niin pieniä, että niiden tulkinta on oikeastaan tarpeetonta. Venymäliuskojen antama tulos voi niiden kiinnitys- ja mittaustavasta johtuen olla kyseenalaista. Esimerkiksi taipuman vaikutusta ei voida toispuoleisilla venymäliuskoilla mitata. Tämän vuoksi tässä osiossa keskitytään vertailemaan vain koekuormituksessa saatuja venymätuloksia mitattuihin arvoihin.

Taulukoihin 16 ja 17 on koottu FE-laskelmilla saadut tulokset ja verrattu niitä mittaustuloksiin. Plaxis-laskelmia ei ole taulukoitu, koska kyseisellä laskentaohjelmalla ei ole tehty koekuormitusta vastaavia mallinnuksia.

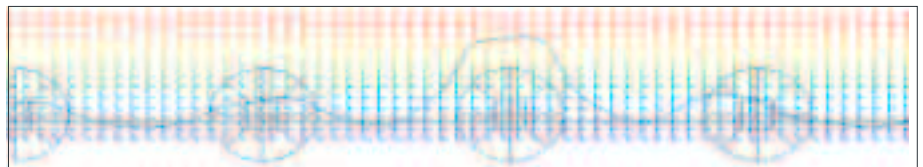
Taulukko 16. Alueen III venymätulokset

Vahvisteverkon venymä ϵ			
	M6	M8	M7
ABAQUS			
R2	0,00165	0,00046	-0,00014
Koekuormitus			
R2	0,00055	0,0003	-0,0001

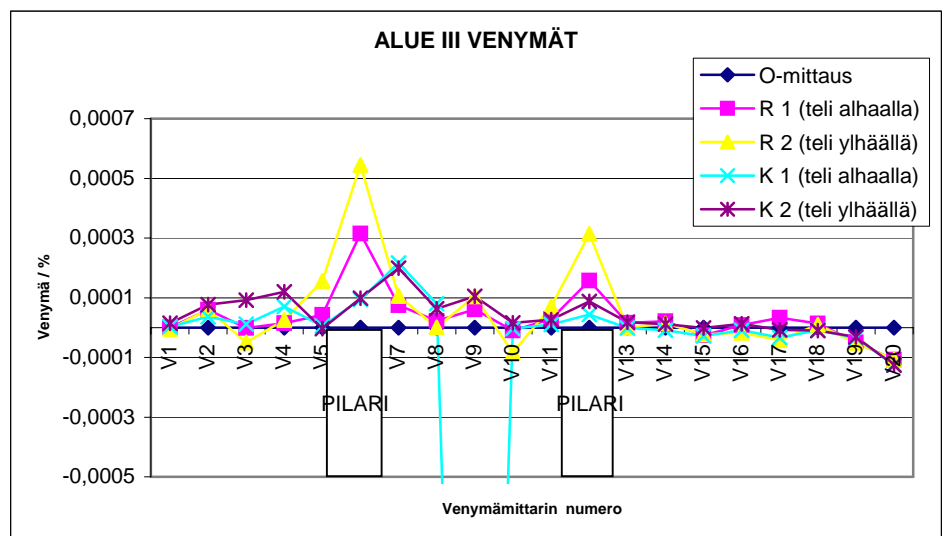
Taulukko 17. Alueen IV tulokset

Vahvisteverkon venymä ϵ			
	M13	M11	M12
ABAQUS			
R2	0,00001	0,000158	-0,00007
Koekuormitus			
R2	0,00055	0,00015	-0,00006

Tuloksista voidaan todeta, että Abaqus-laskennan antamat tulokset täsmäyvät kohtalaisesti mitattuihin arvoihin. Tämän mukaan venymäliuskat toimisivat ainakin näin suurilla kuormituksilla. Kuvassa 53 on esitetty alueelta III Abaqus-laskelmilla saadut venymäprofiilit tien poikkisuunnassa. Kuvassa 54 on esitetty mitatut venymäarvot vastaavasta poikkileikkauksesta.



Kuva 53. Abaqus-laskennan venymäprofiili



Kuva 54. Mitattujen arvojen venymäprofiili

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Havainnot painumamittauksista

Painumamittausten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

- Kaikilla alueilla painuminen on loppunut noin 4-6 kk rakentamisen jälkeen
- Alueilla havaitut kokonaispainumat ovat alueilla I ja II noin 150 mm tien keskellä ja 40..50 mm alueilla III ja IV
- Vahvisteellisten alueiden (III ja IV) painumat ovat vain noin 30% vahvisteettomien alueiden (I ja II) painumista
- Painumista ei enää tapahdu, koska viimeisen kahden vuoden aikana ei mittaustarkkuuden puitteissa ole painumista havaittu
- Alueet I ja II samoin kuin alueet III ja IV näyttävät käyttäytyvän keskenään samankaltaisesti
- Pilarien ja pilarivälien painumaerojen voidaan todeta olevan seuraavaa luokkaa
 - alueella II 10..15 mm
 - alueella III 6..8 mm
 - alueella IV 3..9 mm
- Alueen I painumaeroja ei voida erottaa, koska pilarit ovat kolmioverkossa ja letkut kulkevat kohtisuoraan tien poikkisuunnassa. Mikään letkuista ei suoraan ole pilariväleissä. Suoraa pilarivälin painumaa ei täten voida arvioida

Sulamispainumaa tai routanousua ei ole esiintynyt mittaustarkkuuden puitteissa. Mittausten aikana pohjamaa on saattanut jo olla sulanut. Alueiden painumakäyttäytymisessä ei näytä olevan eroa, mikäli alkupainumat ensimmäisen puolen vuoden osalta jätetään huomioimatta.

Vahvisteellisten ja vahvisteettomien alueiden painumissa on suuri ero. Periaatteessa tätä eroa voidaan selittää vahvisteettomien alueiden konsolidoitumisella. Vahvisteellisilla alueilla kuorman voidaan olettaa siirtyvän suoraan pilareille. Lisäksi pilarointityöstä johtuva maapohjan häiriintyminen saattaa vaikuttaa vahvisteettomien alueiden käyttäytymiseen enemmän kuin vahvisteellisilla alueilla.

Vahvisteettomilla alueilla penkereen reunat ja erityisesti luiskat ovat painuneet huomattavasti enemmän kuin tien keskilinjän kohdalla. Tämä voi johtua esimerkiksi luiska-alueen matalasta penke-

reestä. Penger holvautuu vielä vähemmän pilareille kuin varsinaisella pengerosuudella. Vahvisteellisilla alueilla vahvisteet myös siirtävät kuormaa pilareille. Lisäksi edellisessä kohdassa mainittu häiriintyminen vaikuttaa todennäköisesti vahvisteetomilla alueilla enemmän kuin vahvisteellisilla.

Alueen I painumat ovat samansuuruiset kuin alueella II vaikka pilariväli on suurempi. Tätä voidaan selittää sillä, että alueella II ovat pilarien lujuudet suuremmat kuin alueella I. Periaatteessa kuormituksesta siirtyy lujemmille pilareille enemmän kuormaa, vaikka pilariväli kasvaa.

Havainnot maanpainemittauksista

Maanpainemittausten perusteella (ilman liikennekuormaa) voidaan todeta seuraavaa:

- Maanpaineet pilarien päällä ovat suuremmat kuin pilarien välissä. Suurimmillaan erot ovat alueella III. Tällä alueella pilarin päällä oleva jännitys on suurimmillaan 173 MPa ja pilareiden välissä 10 kPa
- Alueilla III ja IV näyttävät maanpaineet pilarien päällä lisääntyvän koko ajan. Alueella II, jossa ei ole vahvistetta, maanpaineiden keskittymisen näyttää pysähtyneen. Tämä on mielenkiintoista sikäli, että painumat näyttävät pysähtyneen vaikka kuorman keskittymisen jatkuu.

Maanpainemittausten perusteella koekuormituksen aikana voidaan todeta seuraavaa:

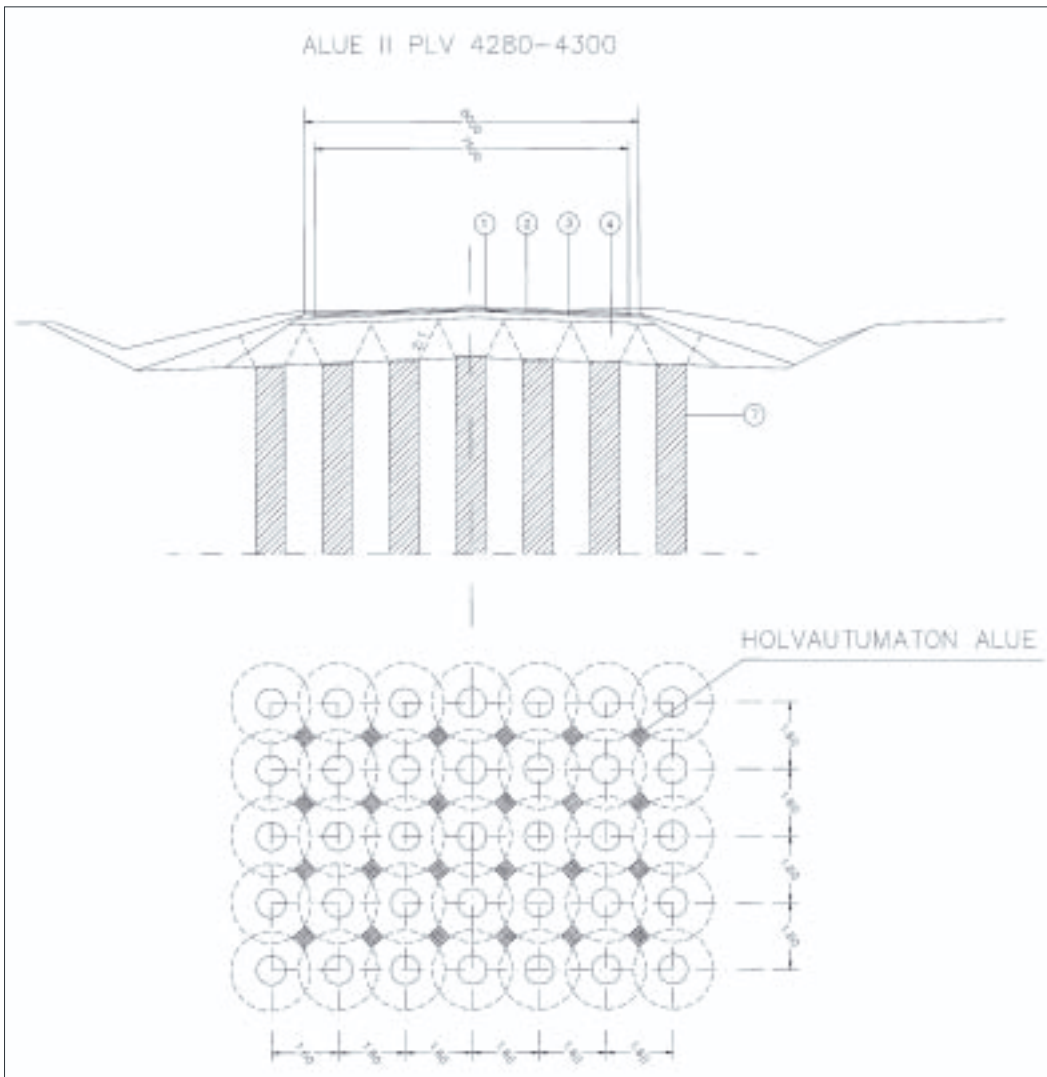
- Vahvistealueilla III ja IV kuormitus jakautuu selvästi enemmän pilareille kuin alueella II, jossa ei ole vahvistetta. Pilareiden jännitys on vahvistetuilla alueilla jopa 2.5 kertaa suurempi kuin vahvisteettomalla alueella.
- Pilarien välissä maanpaineiden kehittyminen vastaa suurin piirtein 2:1 kuormitusjakautumalla saatavia maanpaineen lisäyksiä. Maanpaineen lisäys on 15..20 kPa.
- Erittäin huomioitava seikka on nähtävissä, kun verrataan kuormitustapauksia joissa kuormitus on siirretty pilarilta pilarien välille. Vahvisteettomalla alueella jännitys palautuu pilarin päällä tasolle, jolla se oli 0-mittauksen aikana. Täten näyttäisi siltä, että vahvisteettomalla alueella

pilarin välissä oleva kuorma ei jakaannu pila-reille. Vahvistetuilla alueilla pilarien kohdalle siirtyy selvästi kuormaa vaikka kuormitus on pelkästään pilarien välissä.

Maanpainemittausten perusteella vahvisteellisilla alueilla maanpaineiden keskittyminen näyttää edelleen olevan käynnissä. Maan päällä olevien mittareiden maanpaineet eivät kuitenkaan ole vähenemässä. Painuminen ei kuitenkaan etene pilarien välissä, vaikka pengerkuorma siirtyy pila-reille. Kuormitukset saattavat siirtyä esimerkiksi vain pilarin läheltä ja pilarien keskelle sijoitetut maanpaineanturit eivät "paljasta" tätä kuormituksen keskittymistä. Kuormituksen keskittyminen voi johtua myös siitä, että pilarin päällä oleva kuormitusjakautuma muuttuu ajan myötä tasaisemmaksi. Kuormituksen keskittymistä ei voida arvioida tarkasti vaan se tulisi todeta jatkomittauksilla.

Pilarien välistä mitatut maanpaineet ja laskelmilla saadut maanpaineet ovat suurusluokaltaan samanlaisia. Käytännössä pilarien välissä on tasais-ta pengerkuormaa vastaava kuormitus. Tämä seikka on todettu sekä mitatuista että lasketuista maanpaineista.

Pilarille tulevaksi jännitykseksi saadaan noin 100 kPa, mikäli pengerkuorman oletetaan jakautuvan kuvan 55 mukaisesti. Kuvassa kuormituksen oletetaan jakautuvan kartion muotoisesti kaltevuudel-la 2:1. Kyseisellä kuormitustavalla saadaan "yhtä" hyvä arvio pilarijännityksistä kuin mitä saadaan muilla mitoitusmenetelmillä kun lähtötietojen tarkkuus tarkempaan mitoitukseen on riittämätön. Esimerkiksi alueella II pilarin päällä oleva maanpaine-mittari M3 antaa paineeksi 93kPa, joka on pysynyt myös lähes vakiona. Kuvasta 55 voidaan nähdä, että vielä näinkin suurella pilarivälillä penkereen holvautumisen voi ajatella tapahtuvan lähes kokoaan.



Kuva 55.
Pengerkuorman jakautuminen 2:1 periaatteella alueella II

Kokonaiskuorman jakautumisesta pohjamaan ja pilarien välillä ei voida tehdä kovin tarkkoja arvioita, koska mittaustulokset eroavat toisistaan suhteellisen paljon. Tehtyjen mittausten perusteella kuormien jakautumista saadaan taulukossa 18 esitetyt arviot. Kuormituksena ei ole liikennekuormaa.

Taulukko 18. Kokonaiskuorman jakautuminen

Alue nro	Kuorma maalla %	Kuorma pilarilla %
Alue II:	71	29
Alue III:	50	50
Alue IV:	58	42

Havainnot venymämittauksista

Koekuormitusten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

- Kuormitustavasta riippumatta suurimmat venymien muutokset keskittyvät poikittaisten pilarilinjojen kohdalle. Pituussuuntaisten pilarilinjojen välissä taas ei venymämuutoksia juurikaan tapahdu. Alueella IV kaikissa kuormitustapauksissa suurimmat venymät tulevat pilarien kohdalle. Alueella III kuormituksen siirtyessä pilarien välille, syntyvät suurimmat venymät suoraan poikittaisten pilarilinjojen pilarien välille.
- Venymiä ei tapahdu venymäliuskoissa jotka sijoittuvat pilarien väliin tien pituussuunnassa. Mittarit jotka ovat suoraan poikittaisten pilarilinjojen välissä reagoivat voimakkaasti
- Kaiken kaikkiaan venymät ovat niin pieniä, ettei vahvistevoimia juurikaan mobilisoidu

Oikeaa mitoitusmenetelmää ei suoranaisesti ole olemassa. Vahvisteellisilla alueilla saadaan elementtilaskelmilla riittävän tarkkoja tuloksia. Oletuksena tässäkin tapauksessa on ettei konsolidaatiota tapahdu. Konsolidaation ja vahvisten käyttäytymisen mallintaminen ei nykyisillä ohjelmilla ole mahdollista.

Laskelmista saaduista maanpainejakautumista voidaan havaita, että kuormitus jakautuu jo metrin syvyydessä lähes samalla tavalla kaikilla alueilla. Oleellinen asia vahvisterakenteita suunniteltaessa onkin se, sallitaanko penkereelle hieman suurempi painuma, jos se tapahtuu kuitenkin hyvin nopeasti.

Kaiken kaikkiaan koekohde sijoittuu tutkimuksen kannalta vaikeaan paikkaan sen vuoksi, että kuormituslisäys vanhaan penkereeseen verrattuna on pieni. Painumat jäivät tämän vuoksi hyvin pieniksi.

ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-093-6
TIEH 3200820-v