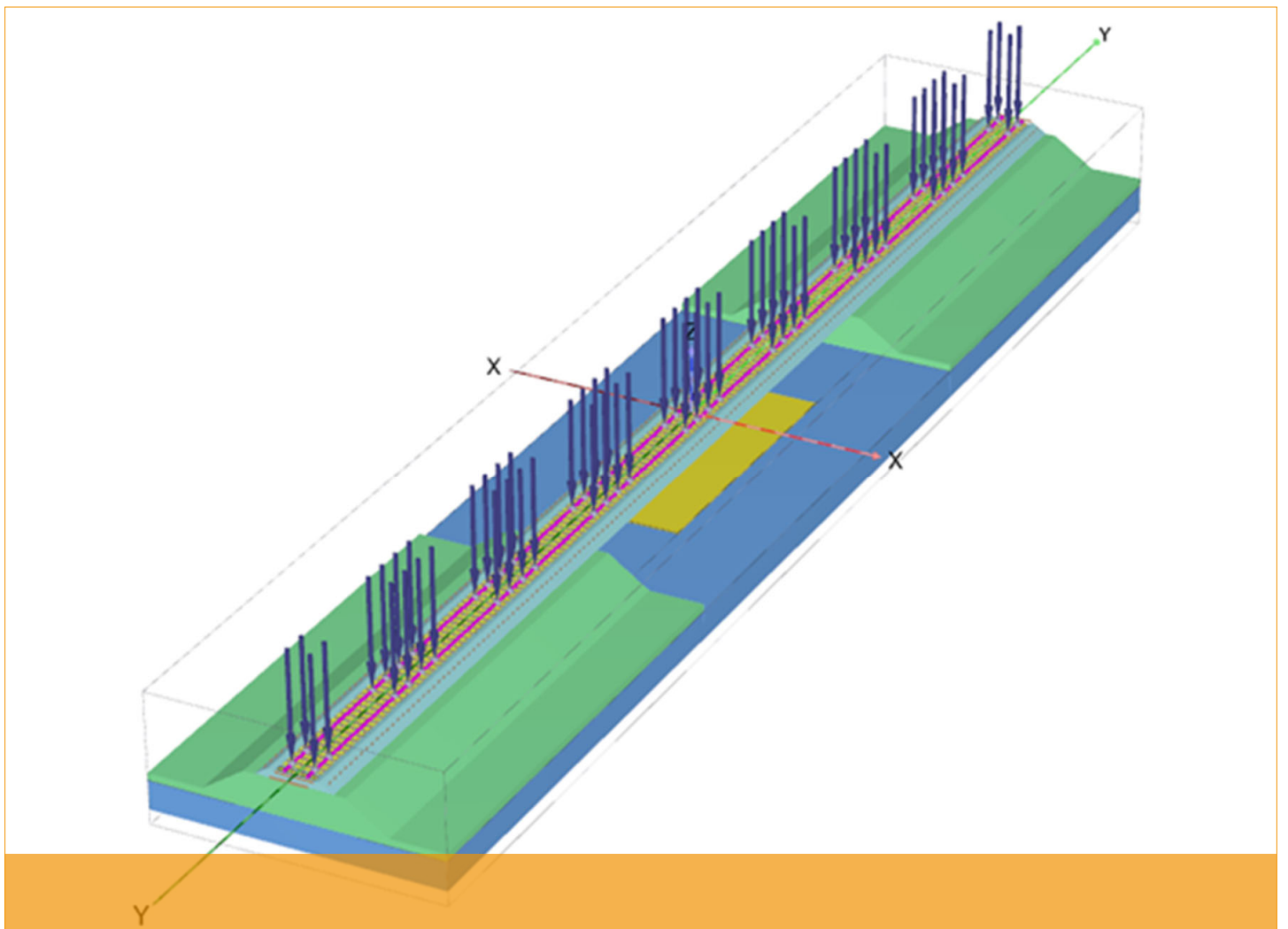


Kim Andersson-Berlin

Junakuorman aiheuttamat jännitykset paalulaatan pinnassa

FEM-laskennan työraportti

The Stresses caused by a Train Load on a Pile Supported
Embankment Slab



Kim Andersson-Berlin

Junakuorman aiheuttamat jännitykset paalulaatan pinnassa

FEM-laskennan työraportti

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 60/2018

Liikennevirasto

Helsinki 2018

Kannen kuva: Plaxis-laskentamalli rajoitetulla laaatalla

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-641-6

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Kim Andersson-Berlin: The Stresses Caused by a Train Load on a Pile Supported Embankment Slab. Finnish Transport Agency, Engineering and Environment. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 60/2018. 85 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-641-6.

Executive summary

The aim of this study was to analyze effects of a trainload on a pile supported embankment slab. The trainload model is composed of a vertical load from the weight of the train per metre and a horizontal load (to simulate train braking). The vertical load is modeled as the load model LM71 with the factor $\alpha=1$ (EN 1991-2). It is composed of the point loads of 250kN/axle and the line loads of 80 kN/m, referred to as LM71 here after. LM71 is primarily compared to two different load models:

- LM71 MAX, which is composed of consecutive point load groups equal to LM71 with $\alpha=1$. The point load groups are positioned at such a distance that the stress pattern on a rigid surface at 1.5 m depth is approximately the same.
- E4 according to the standard EN 15528 witch composed of point loads of 250 kN and the load per unit length is 80 kN/m.

The horizontal component of the load is given as 25 % of the vertical load. For bridges, EN 1991-2 specifies a braking load of 20 kN/m to a maximum of 6000 kN, which corresponds to 25 % of the vertical load of 80 kN/m.

The load models are presented in figure 1.

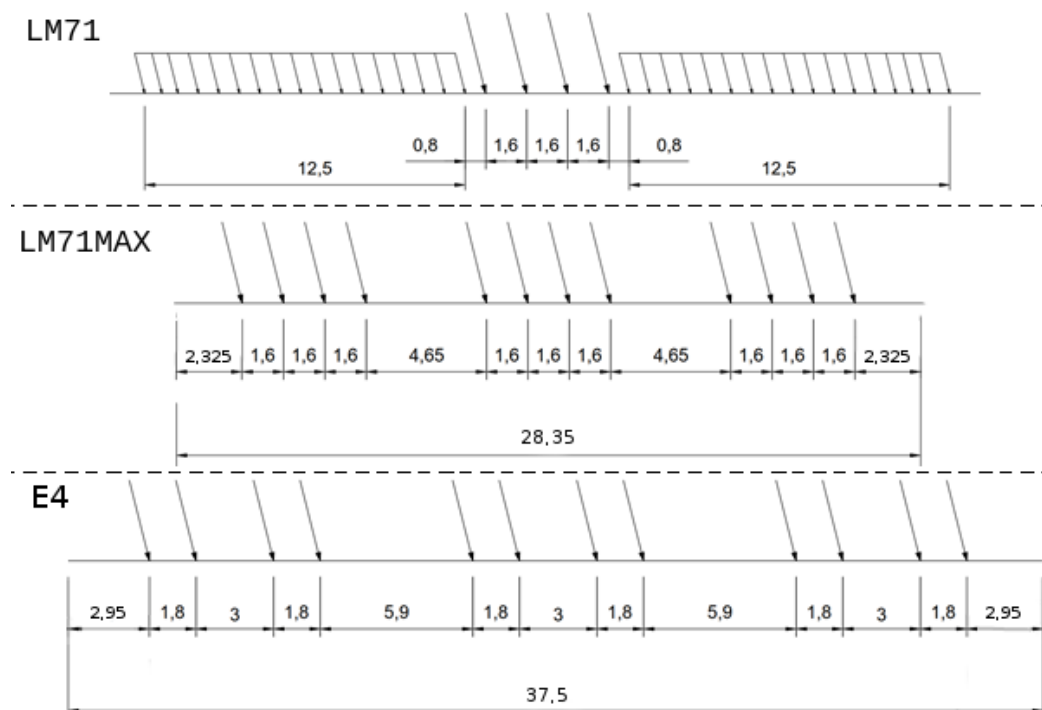


Figure 1. Trainload models of the study. **LM71:** LM71 with $\alpha=1$ (also called LM71-22,5) i.e. point loads 250 kN and line load 80 kN/m (EN 1991-2). **LM71MAX:** Load of the consecutive LM71 point load groups. **E4:** point loads of 250 kN which provide a unit length load of 80 kN/m as specified in EN 15528. The total vertical load is 3000 kN for all cases and the horizontal load is given as 25 % of the vertical load.

The study was conducted with finite element analysis using Plaxis 3D software. A cross-section of the railway was modelled in detail composing all track superstructure components. The applied cross-section was the normal cross-section for a straight horizontal track section according to Finnish Transport Agency publication Ratatekniset ohjeet, Osa 3 (RATO3). The sleepers were elevated 50 mm to separate the rail from the ballast. Mohr-Coulomb material model was used for the track bed and soil layers. The material parameters were selected according to the previous studies of the subject (Kalliainen et.al 2017). A snapshot of the model geometry from the Plaxis 3D-software is shown in Figure 2.

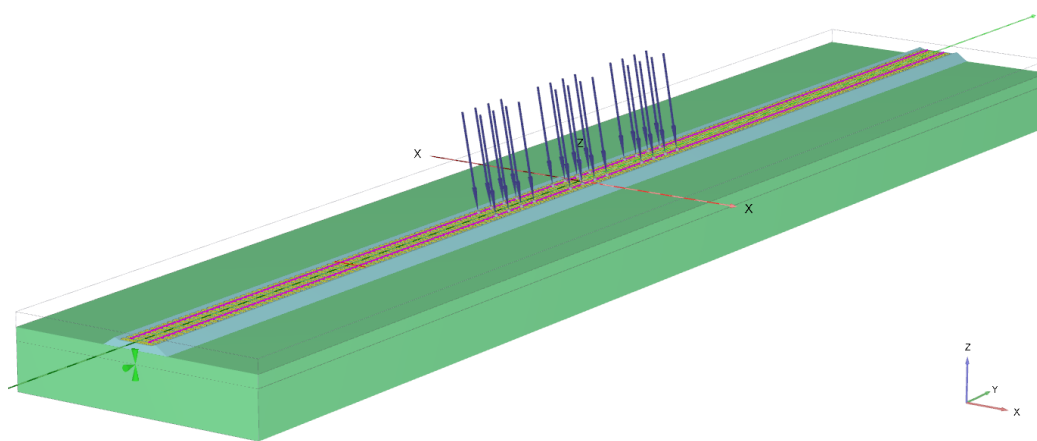


Figure 2. *The Plaxis3D-model used in the calculations with LM71MAX load. The model is 104 m long and the pile supported embankment slab is modelled as a surface with vertical movement prevented – in this case 1,5 m below the top of the sleepers. The vertical and horizontal stresses at the surface are read from the calculation results. For this purpose, an interface element was created to model the interaction between the soil and the slab.*

The calculated vertical force on a pile supported embankment slab at depth of 3 m is shown in figure 3 and the horizontal load in figure 5. The calculated vertical stress on the surface was integrated over the width of the slab model to enable presentation of the results as force per unit length.

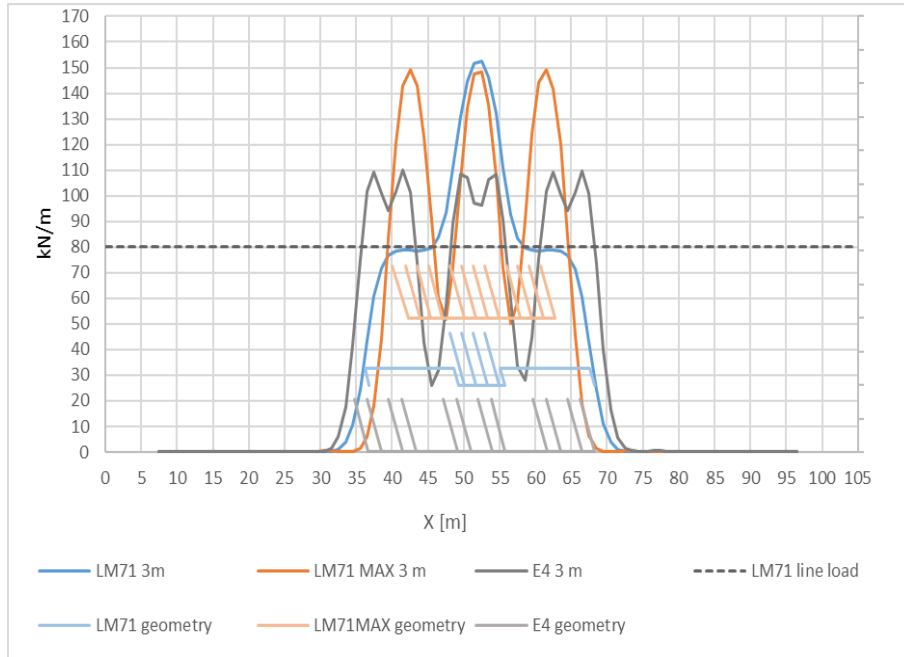


Figure 3. Vertical force per unit length on a pile supported embankment slab 3 m below rails. The different load models are plotted with corresponding colours. Note differences in load model lengths.

When shear stress on top of the slab is studied, the shear stress caused by the vertical load and shear stress caused by the horizontal load should be distinguished. To illustrate this the total lengthwise share stress was plotted along the centerline on figure 4. The load is the four point loads of LM71 without the line loads.

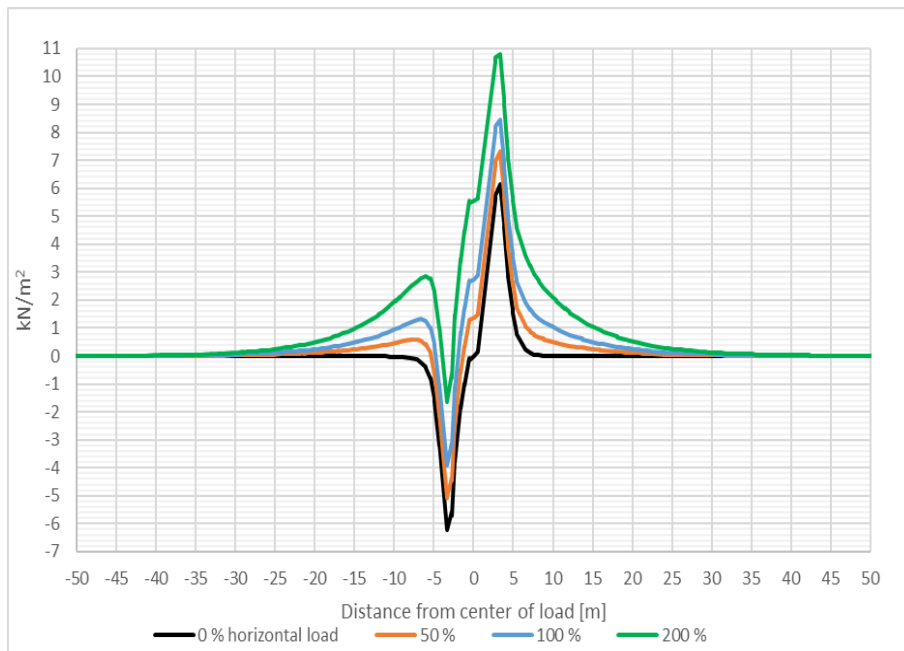


Figure 4. The total lengthwise share stress plotted along the centerline of the pile supported embankment slab. Increased horizontal load at the railway track is presented with different colours. The load is the LM71 axle group without the line loads 80 kN/m.

As presented in Figure 4 the vertical loads cause a shear stress field which effect as tension is a slab.

Shear stress on a slab caused by horizontal loads only was calculated by subtracting the vertical load effects (above) from total shear stress.

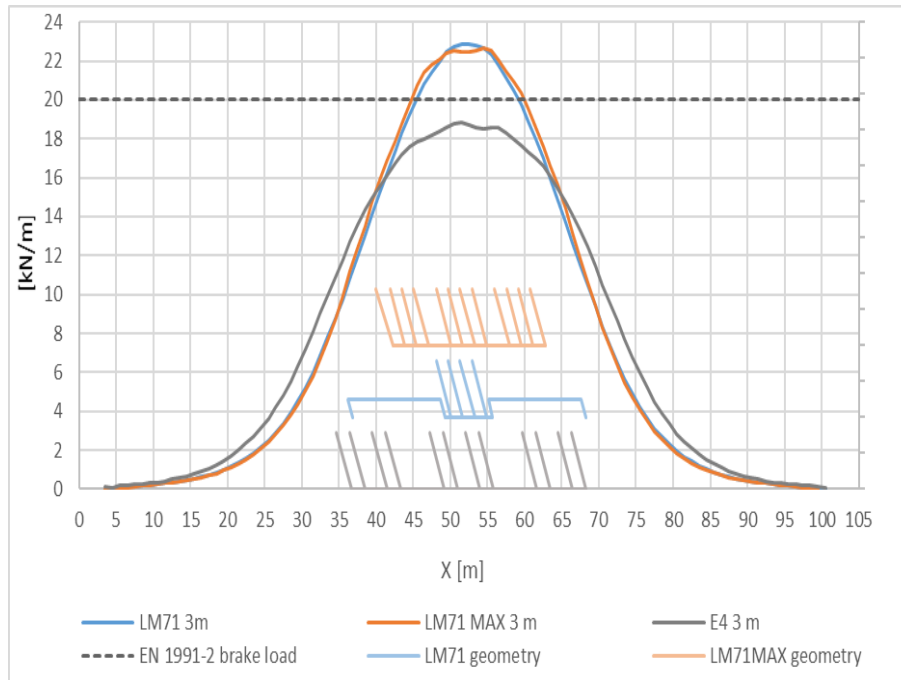


Figure 5. Horizontal force per unit length on a slab 3 m below surface. The load models are plotted with the corresponding colour. Note the differences in the load model lengths.

The results show that the axle group of the LM71 load contribute to a local vertical (or normal) and horizontal (or shear) stress increase at the surface of a slab compared to a line load 80 kN/m only. When the slab is at depth of 3 m the vertical stress increase caused by the axle group is approximately 85 % (figure 3) and the increase in horizontal stress is approximately 10 % (figure 5) compared to stresses induced by the line load only. At a depth of 5 m the braking load of the train is no longer different under the axles compared to the line load, the vertical component is however still about 55 % higher. The corresponding stress for the slab at the depth of 1,5 m is 100 % for vertical stress and 25 % for horizontal stress

It is also worth noting that the line loads in LM71 locates only 0,80 m apart from the point loads. The effect of line loads overlapping with the effect of the axle group. This overlapping effect is relatively greater at greater depths (see figure 3 and figures 43 to 45 in the main text).

The vertical stress between the sleepers was zero but directly under the sleepers the pressure was high, approximately 400 kPa. The vertical stress distribution was studied with the model where no pile supported embankment slab was present. This case was compared to the vertical stress on top surface of the slab. It was observed that the vertical stress on top of a pile supported embankment slab was about 30 % higher than without the stiff slab at the corresponding depths.

In these calculated cases the model trainload is very short, only three axle groups, and the pile supported embankment slab is very wide: full width of the model. If the slab is narrow or if the train is considerably longer than the slab the question becomes how much of the load is carried by the structure.

To answer the first question the slab was modelled narrower as shown in Figure 6, which corresponds with actual structures in soft soil areas.

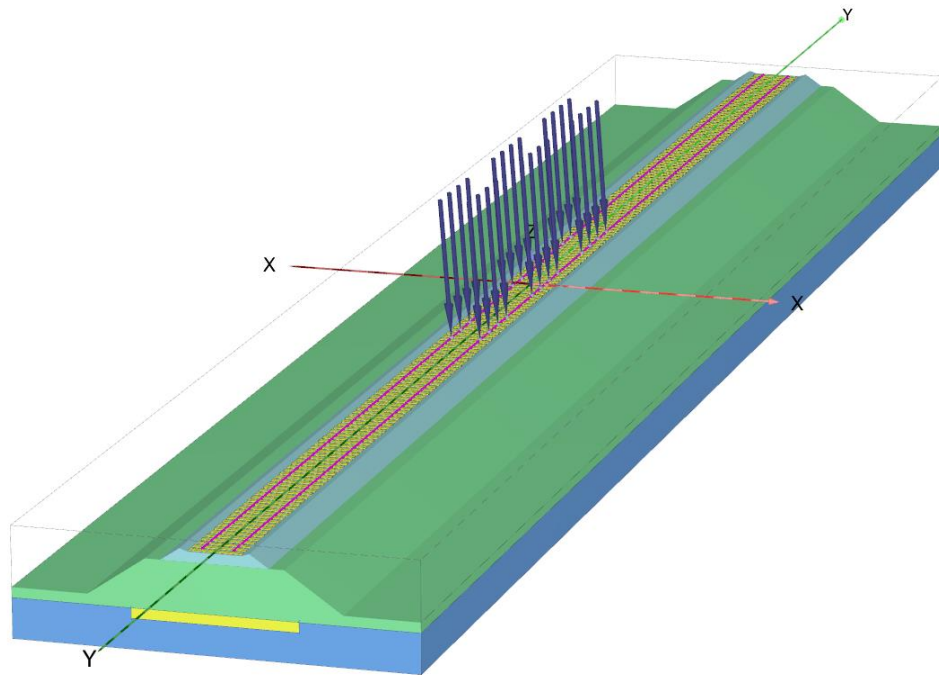


Figure 6. The model modified with a narrower pile supported embankment slab under the railway. The model with the raft at 3 m depth is shown.

The horizontal shear stress at the surface of the slab caused by the horizontal load at the track was calculated in the same way as earlier by subtracting the shear stress caused by the vertical load from the total shear stress. The lengthwise shear stress along the centreline of the slab and at the cross section are plotted in Figure 7. According to the calculations, the shear stress is concentrated on the stiff structure. In this case, the structure movement was prevented vertically and also horizontally in the lengthwise direction of the slab.

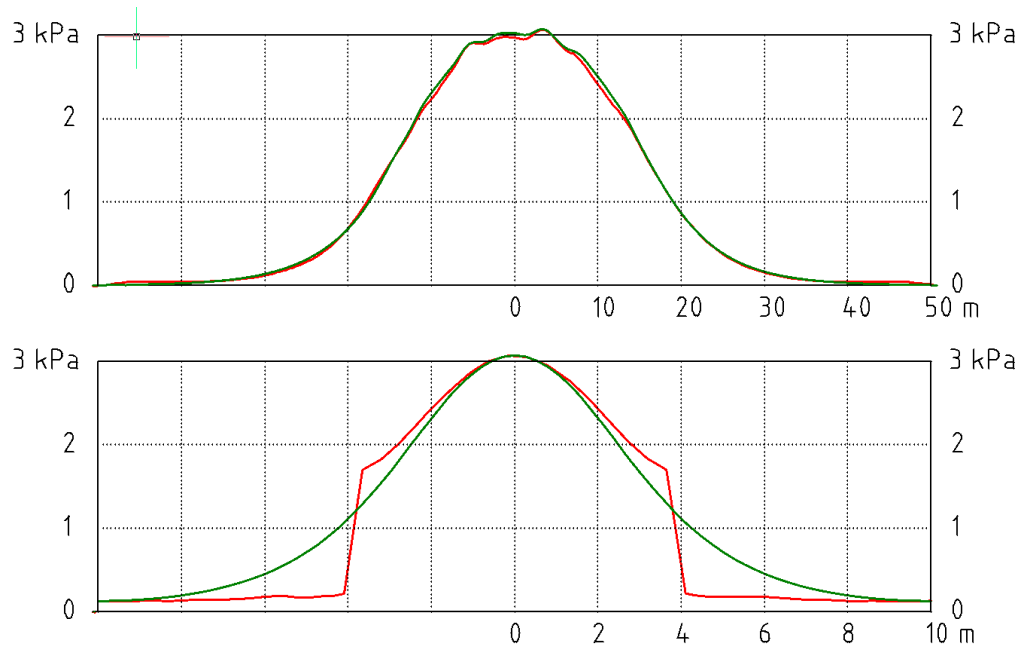


Figure 7. Above: Lengthwise shear stress at surface if pile supported embankment slab along centreline of structure. **Below:** Lengthwise stress (same direction as above) along cross section at centre of structure. Note that the pile supported embankment slab is 100 m long but only 20 m wide so the scale in x -direction of graphs are different in the plots above.

The effect of the load, which is significantly longer than the slab, was analyzed with revised model as illustrated in Figure 8.

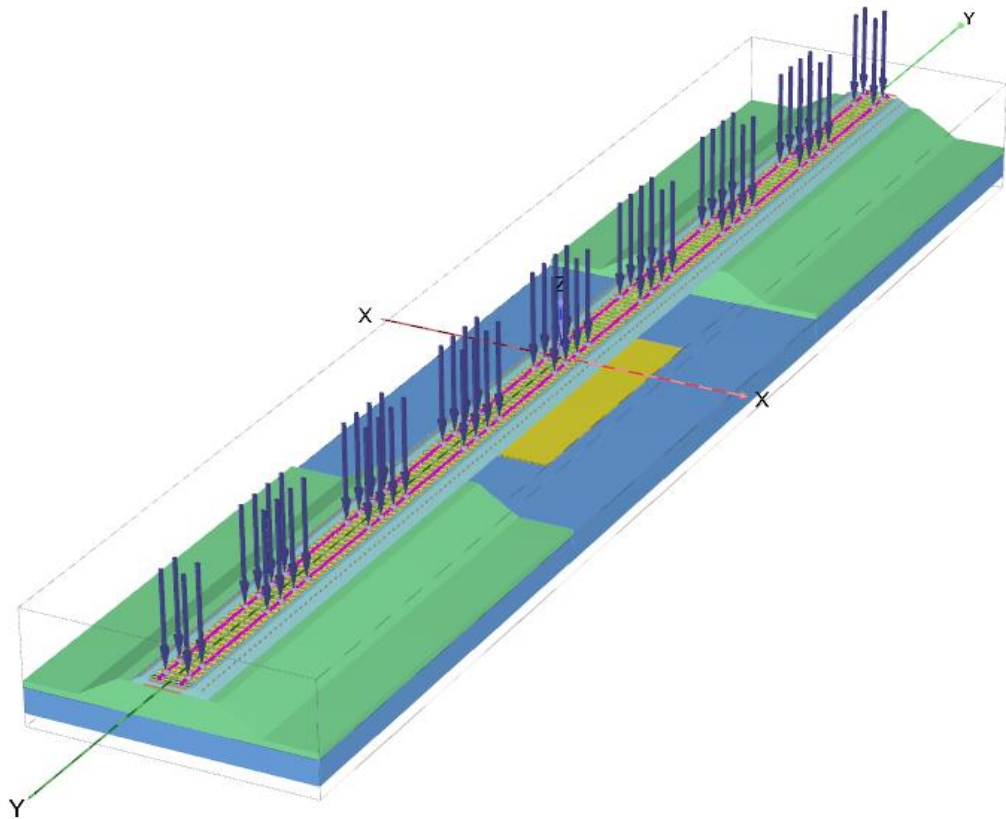


Figure 8. The model modified with a narrow and shortened pile supported embankment slab under the railway. The model with the raft at depth of 3 m and the load continuous through the model.

The movements of the slab were first only prevented vertically and later also horizontally for the point loads through the whole model. The horizontal shear stress on the surface of the slab was again integrated over the width of the slab to calculate the horizontal force per unit length. The result is shown in figure 9.

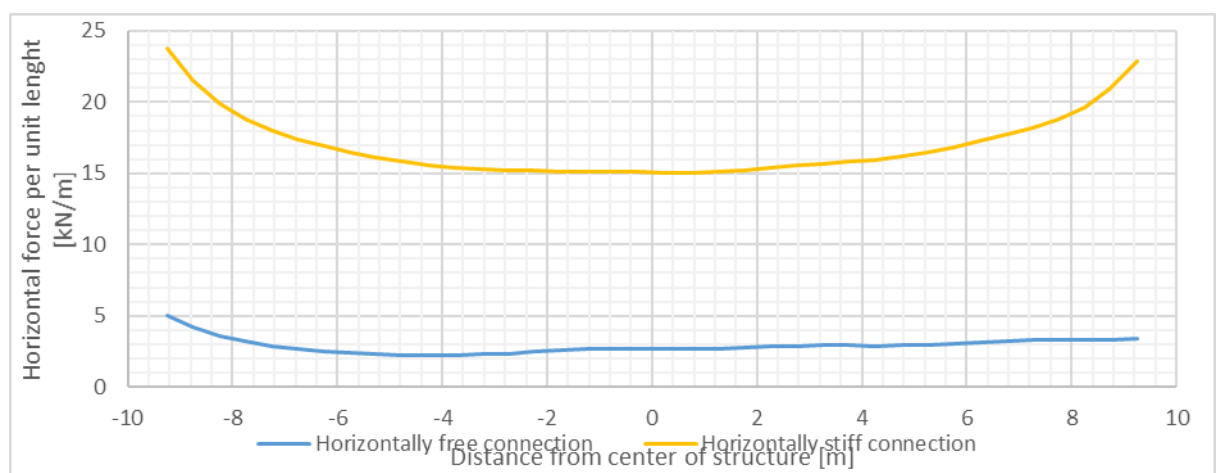


Figure 9. Horizontal force per unit length on a 20 meter long pile supported embankment slab at a depth of 3 m. The load consists of LM71 point load groups creating the horizontal force of 20 kN/m at the track level. The horizontal load effect depends on horizontal stiffness of the modelled slab: 3 kN/m for horizontally free connection or 15 to 23 kN/m for horizontally fixed connection.

It was also observed that the horizontal stress on top of the 20 meter long and 8 m wide slab with fixed connection has equal stress as the slab with full width and length. This corresponds to the situation where the highest possible train load is transferred to the slab.

The load effect on a wall crossing the railway when all movement of the wall is prevented, as in the case of a very stiff bridge abutment, was also studied. The horizontal stress increase and concentrate with decreasing distance of the load. At 5 m distance, the horizontal resultant induced by the weight of the train is approximately the same as the resultant caused by the braking of the train. However, at 1 m distance from the wall, the resultant caused by the weight of the train is double to the one caused by the braking of the train. The results of the calculation at the centerline of the railway are shown in Figure 10.

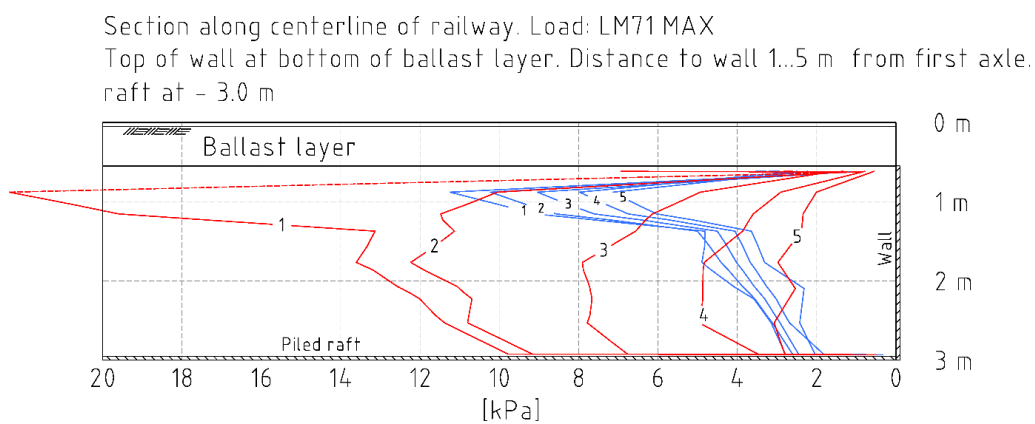


Figure 10. The horizontal load effects against a wall crossing the railway under the sleepers level. In red color: the horizontal earth pressure caused by the vertical load of the train. In blue color: the load effect on the wall caused by the braking load of the train.

The effects of the loads on the structure system composed a bridge and pile supported embankment slabs needs further studies.

Kim Andersson-Berlin: Junakuorman aiheuttamat jännitykset paalulaatan pinnassa. Liikennevirasto, tekniikka- ja ympäristöosasto. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 60/2018. 85 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-641-6.

Avainsanat: rautatiet, junat, kuormat, paalulaatat, jännitykset, FEM, elementtimenetelmä

Tiivistelmä

Työssä tutkittiin junakuorman vaikutusta paalulaattaan suoralla rataosalla. Junakuormina huomioitiin pystysuuntainen junakuorma ja junan jarrutuksesta syntyvä pituussuuntainen kuorma. Lisätarkasteluna tutkittiin sitä, miten junakuormat vaikuttavat radan poikkisuunnassa kulkevaan pystysuuntaiseen, jäykkään, seinään. Lisäksi tarkasteltiin jännityksen jakautumista maassa ilman paalulaattaa. Tutkimus tehtiin elementtimenetelmällä käyttäen Plaxis 3D -ohjelmistoa.

Ratarakenteen poikkileikkaus tehtiin suoran radan normaalipoikkileikkauksen mukaiseksi, joka on esitetty Ratateknisten ohjeiden osassa 3. Laskentaan mallinnettiin myös kiskot ja betoniset ratapölkkyt. Maan materiaalimallina käytettiin pääosin Mohr-Coulomb-mallia, Materiaaliparametrien valinnassa sovellettiin aiemmissa tutkimuksissa määritettyjä parametreja.

Laattaan kohdistuvista jännityksistä todettiin, että pystysuunnassa LM71 kuorman akseliryhmä nostaa viivakuorman aiheuttamaa metrikohtaista vaikutusta laatan pinnassa. Laatan ollessa puolentoista metrin syvyydessä kasvu on 100 %, kolmen metrin syvyydessä 85 % ja viiden metrin syvyydessä 55 %. Vaakasuuntaisen kuorman metrikohtainen vaikutus laattaan oli puolentoista metrin syvyydessä 25%, kolmen metrin syvyydessä 10 % ja viiden metrin syvyydessä lähes nolla.

Radan poikkisuunnassa sijaitsevaan jäykkään seinään kohdistuva paine kasvoi odotetusti, kun junakuormaa siirrettiin laskennassa lähemmäs seinää. Laskentatuloksista todettiin, että kun junan ensimmäinen akseli on viiden metrin etäisyydellä seinästä, jarrutuksesta ja pystykuormasta aiheutuvat vaakavoimat ovat lähes yhtä suuret. Kun kuormaa siirretään lähemmäs seinää, pystykuormasta syntyvä vaakavoima kasvoi. Kun akseli on noin metrin päässä seinästä, pystykuormasta syntyvä vaakavoima on suuruudeltaan kaksinkertainen jarrutuksesta syntyvään vaakavoimaan.

Jännityksen jakautuminen laskettiin maassa pölkyn alla ja pölkkyjen välissä. Lisäksi laskettiin eri syvyyksillä sijaitsevan laatan yläpintaan syntyvä normaalijännitys. Tarkasteltaessa maassa olevaa pystysuuntaista jännitystä huomattiin, että pölkkyjen välissä jännitys palasi nolnaan maapinnassa, kun taas pölkkyjen alla jännitys on huomattavan korkea. Normaalijännitys laatan pinnassa suoraan kuorman alla oli laskelmassa noin 30 % korkeampi kuin laskettu pystyjännitys maassa.

Koko mallin kokoiseen paalulaattaan kohdistuvat jännitykset vastaavat sitä tilannetta, kun rajoitetun kokoisen laatan siirtymät on estetty. Tämä edustaa sitä tilannetta missä suurin mahdollinen osuus kuormasta siirtyy laatalle. Laatan pituussuuntaisen jäykkyyden ja sillan ja paalulaatan yhteistoiminnan mallintaminen vaatii lisätutkimusta.

Kim Andersson-Berlin: Av trafiklasten orsakade spänningar i pålplattor under järnvägar. Trafikverket, Teknik och miljö avdelning. Helsingfors 2018. Trafikverkets undersökningar och utredningar 60/2018. 85 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-641-6.

Sammanfattning

I arbetet har undersökts hur trafiklasten från tåg påverkar pålplattor under tågbanan. Lasterna i beräkningarna har varit både den vertikala komponenten som orsakas av tågets vikt samt den horisontala komponenten som orsakas av ett inbromsande tåg. Vidare har undersökts vilka laster som påverkar en fullständigt styv vägg tvärs tågbanan under spåret, t.ex. ändbalken från en bro, när tåget närmar sig väggen. Vidare har också ur beräkningsmodellen tagits fram spänningarna i marken under tåglasten då ingen pålplatta hindrar vertikala rörelser i marken och dessa har jämförts med motsvarande då pålplattan hindrar vertikal rörelse i marken. Beräkningarna har utförts med elementmetoden med Plaxis 3D programvara.

Banans tvärsnitt modellerades enligt normalsnittet för en järnväg vid rakt banavsnitt enligt Ratateknikets ohjeet (RATO) del 3. Räl och syllar av betong modellerades också. Som jordmodeller har använts Mohr-Coulomb. Tidigare undersökningar användes som grund vid bestämning av modellparametrarna för jordlagren.

Ur resultaten framgick att LM71 lastens axelgrupp lokalt höjer vertikallasten på pålplattan i jämförelse med linjelasten. Då pålplattan ligger på 1,5 m djup är höjningen ca 100 % till det dubbla. Då plattan ligger på 3 m djup är höjningen ca 85 % och på 5 m djup ca 55 %. Motsvarande siffror för horisontallasten är en 25 % lokal höjning i skjuvspänningen vid plattans överkant då plattan ligger på 1,5 m djup och ca. 10 % lokal höjning i skjuvspänningen då plattan ligger på 3 m djup. Då plattan ligger på 5 m djup orsakades ingen lokal höjning i skjuvspänningen på plattans överkant.

Normalkraften mot en styv vägg som ligger tvärs banan under syllarna växte som förväntat när tåglasten närmade sig väggen. På 5 m avstånd var horisontalkomponenten orsakad av tågets vikt ungefär lika stor som den orsakad av bromslasten från tåget. Då tåglasten är ca 1 m från väggen är horisontalkomponenten orsakad av tågets vikt ungefär dubbelt större än den orsakad av bromslasten.

Den vertikala spänningen rakt under tåglasten lästes ur beräkningsmodellen i ett skede där ingen pålplatta begränsade de vertikala rörelserna. Då man jämförde denna med den lokala spänningen rakt under tågets axelgrupp på plattans överkant kunde man konstatera att spänningarna på plattan var ca 30 % högre än de i marken utan pålplatta. Nära markytan var den vertikala spänningen mellan syllarna naturligtvis noll och rakt under syllarna väldigt hög, ca 400 kPa.

Ur beräkningsresultaten framgick att de spänningar som mobiliseras på ytan av pålplattan då den modelleras som hela beräkningsmodellens botten motsvarar den situation då rörelsen av en till storleken begränsad platta – mer lik en verklig – begränsas i tågbanans längdled. Fördelningen de laster som tåget orsakar på en kombination av bro och pålplatta kräver ännu fortsatta undersökningar.

Esipuhe

Tässä selvityksessä on tutkittu pysty- ja vaakasuuntaisen junakuorman vaikutusta paalulaataan. Tavoitteena on ollut luoda FEM-malli, jolla voidaan määrittää paalulaatan pintaan muodostuva normaali - ja leikkausjännitys, kun paalulaatta sijaitsee eri syvyydellä radan alla. Lisäksi on selvitetty kuormituskaavion vaikutusta muodostuviin rasituksiin. Tämä raportti muodostaa ensimmäisen osan selvityksestä, jota on tarkoitus jatkaa osalla, jossa tarkastelu laajennetaan junakuorman vaikutuksen selvittämiseen paalulaatan ja sillan muodostamalle rakenteelle.

Työn on toteuttanut Liikenneviraston toimeksiannosta Insinööritoimisto Arcus Oy, jossa työstä on vastannut Kim Andesson-Berlin. Työtä on ohjannut ryhmä, jonka jäseninä ovat olleet Tuomas Kaira, Panu Tolla ja Jaakko Heikkilä Liikennevirastosta sekä Sami Noponen Sweco Rakennetekniikka Oy:stä.

Helsingissä joulukuussa 2018

Liikennevirasto
Tekniikka- ja ympäristöosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	15
1.1	Työn tavoite	15
1.2	Tutkimusmenetelmä	15
2	RAUTATIELIIKENTEEN KUORMAT	16
2.1	Kuormakaaviot	16
2.2	Veto- ja jarrukuormat.....	16
3	MALLINNUKSEN LÄHTÖTIEDOT	18
3.1	Rakennekerrokset.....	18
3.2	Laatta	19
3.3	Raide	20
3.4	Rajapinnat.....	20
3.5	Kuorma	22
4	LASKENTA	25
4.1	Osio 1 - Ensimmäinen laskenta.....	25
4.1.1	Laskentaverkko	25
4.1.2	Ensimmäisen laskennan tulos.....	26
4.1.3	Kuorman vaakakomponentti	29
4.1.4	<i>Resultantin tarkistuslaskelmat</i>	31
4.2	Osio 1 - Toinen laskenta.....	33
4.2.1	Toisen laskennan tulokset	36
4.2.2	Maan jäykkyyden vaikutus tuloksiin	43
4.3	Osio 1 - Kolmas laskenta	45
4.3.1	Kolmannen laskennan kuormakaaviot	46
4.3.2	Kolmannen laskennan tulokset.....	47
4.3.3	Herkkyystarkastelu.....	57
4.3.4	Superpositioperiaate	59
4.4	Osio 2 - Neljäs laskenta	61
4.4.1	Laskenta poikkisuunnasta rajatulla laatan geometrialla	61
4.4.2	Laskenta radan poikkisuuntaisella seinällä.....	64
4.4.3	Pystysuuntainen jännitys maassa kuorman alla	68
4.5	Osio 2 - Viides laskenta	70
4.5.1	Kuormat.....	71
4.5.2	Laskennan tulokset	72
4.5.3	Vertailulaskenta vaakasuunnassa liikkumattomalla laatala.....	76
5	RAITEEN JÄNNITYS JA MUODONMUUTOS.....	80
6	YHTEENVETO	83
	LÄHTEET	85

1 Johdanto

1.1 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on ollut selvittää, miten junakuorma vaikuttaa paalulaataan ja luoda edellytykset paalulaatan ja sillan yhteistoiminnan mallintamiselle. Raportissa tarkastellaan miten kuormien aiheuttamat jännitykset välittyvät laatan pinnalle suoralla rataosalla, kun otetaan huomioon junan aiheuttaman pystykuorman ja pituussuuntaisten vaakakuorman, kuten jarrukuorman, vaikutus. Lisäksi on tarkasteltu radan poikkisuuntaisen jäykkään seinään kohdistuvaa kuormaa, jännitysjakamaa maassa junakuorman alla ilman laattaa ja kiskojen akselin suuntaista normaali jännitystä sekä siirtymiä.

1.2 Tutkimusmenetelmä

Asiaa tutkittiin elementtimenetelmällä tehdyillä laskelmilla Plaxis 3D-ohjelman avulla. Työssä esitellään mallinnuksessa käytetyt parametrit ja geometria, laskennan kulku sekä laskentatulokset. Laskentamalli kehittyi projektin edetessä, joten laskennat on jaettu kahteen osioon ja osiot eri vaiheisiin.

Osiot 1 koostuu kolmesta eri laskentavaiheesta ja niissä tarkastellaan junakuorman vaikutuksia äärettömän kokoisen laatan pinnassa, jota on mallinnettu mallin pohjan kokoisen laatan pinnassa. Vaiheessa 1 tutkitaan, miten pölkyn ja maan rajapinnan parametrien muuttaminen ja miten mallin pituuden muuttaminen vaikuttaa laatan pinnan jännityksiin. Vaiheessa kaksi mallin geometriaa ja paalulaatan mallinnustapaa muutetaan ensimmäisen vaiheen tulosten perusteella ja tutkitaan edelleen maan jäykkyysparametrien vaikutuksia laatan pinnan jännityksiin. Kolmannessa vaiheessa esitetään lopullisella mallilla lasketut tulokset syvyyksillä 1,5 m, 3 m ja 5 m ja tutkitaan edelleen superpositioperiaatteen soveltamista.

Osiossa 2 laskentamallia kehitettiin edelleen kaventamalla laattaa niin, että sen leveys vastaa tavanomaista laattaa radan alla. Tämän jälkeen laattaa on vielä lyhennetty vastaamaan tyypillistä sillan taustapaalulaatan pituutta. Osiossa 2 on myös tutkittu radan poikkisuuntaiseen seinään kohdistuvia kuormia sekä jännitystä maassa ilman paalulaatta.

Jokaisessa vaiheessa kerrotaan, miten laskentamallia on muutettu edellisiin laskentoihin verrattuna.

2 Rautatieliikenteen kuormat

2.1 Kuormakaaviot

Junakuormien kuormakaaviot riippuvat siitä, onko kyseessä uusi vai vanha infrarakenne Uusilla radoilla käytetään SFS-EN 1991-2 mukaista kuormakaaviota LM71. Vanhojen ratojen kuormakaaviot on esitetty eurooppalaisessa standardissa SFS-EN 15528 ja näitä ei saa käyttää uusien ratojen suunnittelussa (s. 14).

Vanhoilla radoilla käytettävä kuormakaavio valitaan YTE-rataluokan perusteella. YTE-rataluokka ilmaistaan liikennekoodilla tai liikennekoodien yhdistelmällä. Matkustaja- ja tavaraliikenteelle on omat koodinsa, joiden yhdistelmää käytetään sekaliikenteen radoilla. Kun radalla kulkee vain yhdentyypistä liikennettä, voidaan käyttää yhtä koodia tai koodien yhdistelmää. Taulukossa 1 on esitetty InfraYTE:n mukaiset tavaraliikenteen liikennekoodit ja kunkin liikennekoodin suorituskykyparametrit. (YTE 2014, s. 16). Akselipaino ja nopeus esittävät vähimmäisarvoa.

Taulukko 1. InfraYTE:n mukaiset liikennekoodit tavaraliikenteelle.

Liikennekoodi	Ulottuma	Akselipaino (t)	Radan nopeus (km/h)	Laiturin hyötypituus (m)
F1	GC	22,5	100 – 120	740 – 1050
F2	GB	22,5	100 – 120	600 – 1050
F3	GA	20	60 – 100	500 – 1050
F4	G1	18	ei	ei
F1520	S	25	50 – 120	1050
F1600	IRL1	22,5	50 – 100	150 – 450

2.2 Veto- ja jarrukuormat

Raiteen yläpintaan aiheutuu radan pituussuuntaista veto- ja jarrukuormaa. EN 1991-2 antaa taulukon 2 mukaiset ominaisarvot veto- ja jarrukuormille. Taulukossa esitetty L_{ab} on veto- ja jarrukuormien vaikutuspituus tarkasteltavalla rakenneosalla.

Taulukko 2. Veto- ja jarrukuormien ominaisarvot.

Vetokuorma:	$Q_{lak} = 33 \text{ [kN/m]} L_{a,b} \text{ [m]} \leq 1\ 000 \text{ [kN]}$ kuormakaavioiden 71, SW/0, SW/2 ja HSLM yhteydessä
Jarrukuorma:	$Q_{ljk} = 20 \text{ [kN/m]} L_{a,b} \text{ [m]} \leq 6\ 000 \text{ [kN]}$ kuormakaavioiden 71, SW/0 ja HSLM yhteydessä

Kuitenkin radoilla, jotka välittävät erikoisliikennettä, vaakasuuntaisina veto- ja jarrukuormina voidaan käyttää 25 % akselien pystykuormien summasta. Tällöinkin veto-kuorman enimmäisarvo on 1000 kN ja jarrukuorman 6000 kN.

Käytettäessä kuormakaavioita 71 ja SW/0, veto- ja jarrukuormat tulee kertoa kertoimella α ratalinjoilla, joilla kulkeva liikenne eroaa normaalista raideliikenteestä. Kerroimena α käytetään jotain seuraavista arvoista:

0,75 – 0,83 – 0,91 – 1,00 – 1,10 – 1,21 – 1,33 – 1,46 (SFS-EN 1991-2)

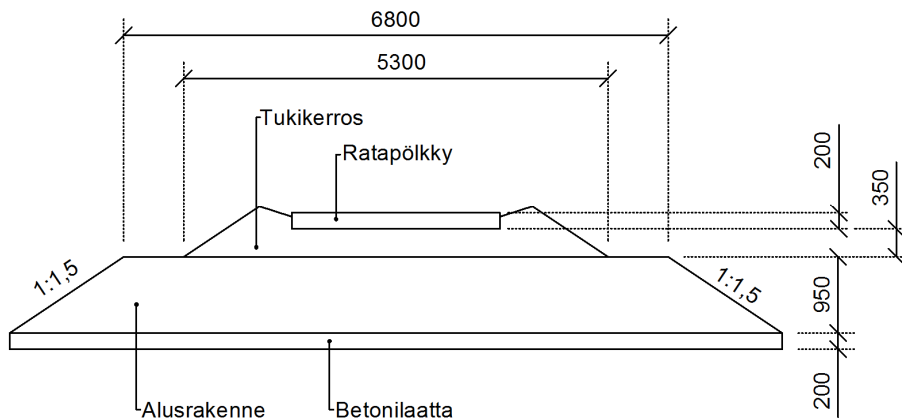
Kerroin α saa arvon 1,00 kun suurin sallittu akselipaino on 22,5 tn, eli mitoituskuormakaavion akselikuorma on 250 kN ja nauhakuorma 80 kN/m (Liikennevirasto 2017, s. 22).

Oletuksena silloilla osa veto- ja jarrukuormista kulkeutuu penkereeseen sillan ulkopuolelle. Kuormien suuruus riippuu sillan rakenteesta, kiskotuksesta ja junakaluston ominaisuuksista. (Liikennevirasto 2017, s. 30.) Veto- ja jarrukuormista johtuville siirtymille on määritetty yläraja-arvot julkaisussa SFS-EN 1991-2 (s. 89). Sen mukaan esimerkiksi jatkuvakiskoraiteella, jossa ei ole kiskonliikuntalaitteita tai vain toisessa päässä kansirakennetta on kiskonliikuntalaite, siirtymä saa olla enintään 5 mm. Myös pystysuuntaisten kuormien aiheuttamalle siirtymälle annetaan omat raja-arvonsa.

3 Mallinnuksen lähtötiedot

3.1 Rakennekerrokset

Radan rakennekerroksiksi mallinnettiin aluksi tukikerros sekä alusrakenne. Alusrakenteessa ei eroteltu välikerrosta ja eristyskerrosta, vaan molemmat mallinnettiin yhtenä kerroksena. Tukikerroksen paksuudeksi asetettiin aluksi 550 mm, mutta laskelmissa haluttiin saada kiskot irti tukikerroksesta, jotta niiden välinen kitka ei vaikuttaisi laskentaan. Tästä syystä tukikerroksen yläpintaa laskettiin 50 mm ja kerroksen lopulliseksi paksuudeksi jäi 500 mm. Alusrakenteen paksuus on laskelmissa 950 mm, 2950 mm tai 4450 mm. Kuvassa 1 on esitettyä radan poikkileikkaus 950 mm paksulla alusrakenteella.



Kuva 1. Mallinnetun radan poikkileikkaus.

Radan poikkileikkauksen mitat tehtiin Liikenneviraston ohjeessa 6/2016 esitetyn normaalipoikkileikkauksen mukaan.

Materiaalimallina käytettiin Mohr-Coulomb -mallia. Pohjavesi mallinnettiin rakennekerrosten alapinnan syvyydelle. Parametrien valinnassa hyödynnettiin Liikenneviraston julkaisussa ”Junan jarrukuorman välittyminen pengerialaalle” (Nemlander 2015) esitetyt parametrit tukikerrokselle. Nemlander on laskenut HS-mallilla:

Rakenne	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ [kN/m ²]	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [kN/m ²]	c_{ref} [kN/m ²]	ϕ' [°]	ψ [°]
Tukikerros	17.6	17.6	250000	200000	500000	20	45	15

Hooken lain mukaan suhde kimmokertoimen E , leikkausmoduulin G ja tangenti-moduulin E_{oed} välillä voidaan esittää yhtälöillä (Plaxis 2016, s. 18)

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

ja

$$E_{\text{oed}} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 - 2\nu)(1 - \nu)}$$

Poissonin luku ν laskettiin lepopainekertoimen K_0 avulla kaavalla

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0}$$

jossa

$$K_0 = 1 - \sin \varphi$$

Käytännössä ödometrimoduulista laskettiin MC-mallia varten moduuli E' . Muut parametrit voidaan kopioida suoraan HS-mallista. Alusrakenteen jäykkyyden suhteen oli ensin ajatuksena puolittaa tukikerroksen ödometrimoduuli, mutta päädyttiin kuitenkin käyttämään hieman jäykempää arvoa 125 000 kN/m². Taulukossa 3 on esitetty laskennan ensimmäisessä vaiheessa käytetyt parametrit rakennekerroksille.

Taulukko 3. Malleissa käytetyt parametrit radan rakennekerroksille.

	Drainage type	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E' [kN/m]	ν'	C'_{ef} [kN/m ²]	φ' [°]	ψ [°]
Tuki-kerros	Drained	17,6	17,6	120 000	0,23	20	45	15
Alus-rakenne	Drained	19,2	19,2	108 000	0,23	10	45	15

3.2 Laatta

Rakennekerrosten alle mallinnettiin 200 mm paksu betoninen laatta. Materiaalimallina käytettiin lineaarielastista mallia, jonka parametrit on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Betonille syötetyt parametrit Plaxis 3D -ohjelmassa.

	Drainage type	γ_{unsat} [kN/m ³]	[kN/m ²]	
Betoni	Non-porous	25	30 000 000	0,2

Laatta mallinnettiin jäykkänä elementtinä (rigid body). Tällaista elementtiä voidaan käyttää, kun rakenteen sisäisiä voimia ei tarvitse tarkastella, mutta halutaan että jännitykset maan ja elementin välillä mallintuvat oikein. Jäykkään elementtiin ei tule muodonmuutoksia, mutta se voi liikkua annettujen reunaehtojuen puitteissa.

Elementille annettiin referenssipiste, jonka sijainti oli esimerkiksi 1,5 m penkereen tapauksessa $x_{\text{ref}} = 0$, $y_{\text{ref}} = 0$, $z_{\text{ref}} = -1,5$. Elementille määriteltiin lisäksi vapausasteet pyörähdykselle (rotation) ja/tai siirtymälle (displacement) erikseen jokaiselle akselille referenssipisteen suhteen, sekä siinä vaikuttavat ulkoiset voimat (force, moment).

Laattaan vaikuttavat ulkoiset voimat määriteltiin jo mallin geometriassa, joten jäykälle elementille määritettiin arvot vain siirtymälle ja pyörähdykselle, jotka molemmat saivat arvon 0 tehdyissä laskelmissa, koska laatan liikettä haluttiin rajoittaa.

3.3 Raide

Raiteesta mallinnettiin ratapölkkyt ja ratakiskot. Ratapölkkyjen materiaaliksi mallinnettiin betoni, jossa käytettiin samoja parametreja kuin paalulaatan betonissa. Pölkkyjen pituus oli 2 600 mm, leveys 300 mm ja korkeus 200 mm. Pölkkyjen etäisyys toisistaan oli 610 mm.

Ratakiskot mallinnettiin palkkielementteinä (beam) taulukossa 5 esitetyillä parametreilla. Kiskoina käytettiin 60 E1 -kiskoja. Tällaisen kiskon massa on 60,34 kg/m, joten tilavuuspainoksi saatiin $0,6034 \text{ kN/m} / 0,007686 \text{ m}^3 \approx 78,5 \text{ kN/m}^3$. (Ratahallintokeskus 2002)

Taulukko 5. Kiskon parametrit.

	A [m ²]	γ [kN/m ³]	E [kN/m ²]	I ₃ [m ⁴]	I ₂ [m ⁴]
Kisko	0,007686	78,5	$207 \cdot 10^6$	$0,03055 \cdot 10^3$	$5,12 \cdot 10^{-6}$

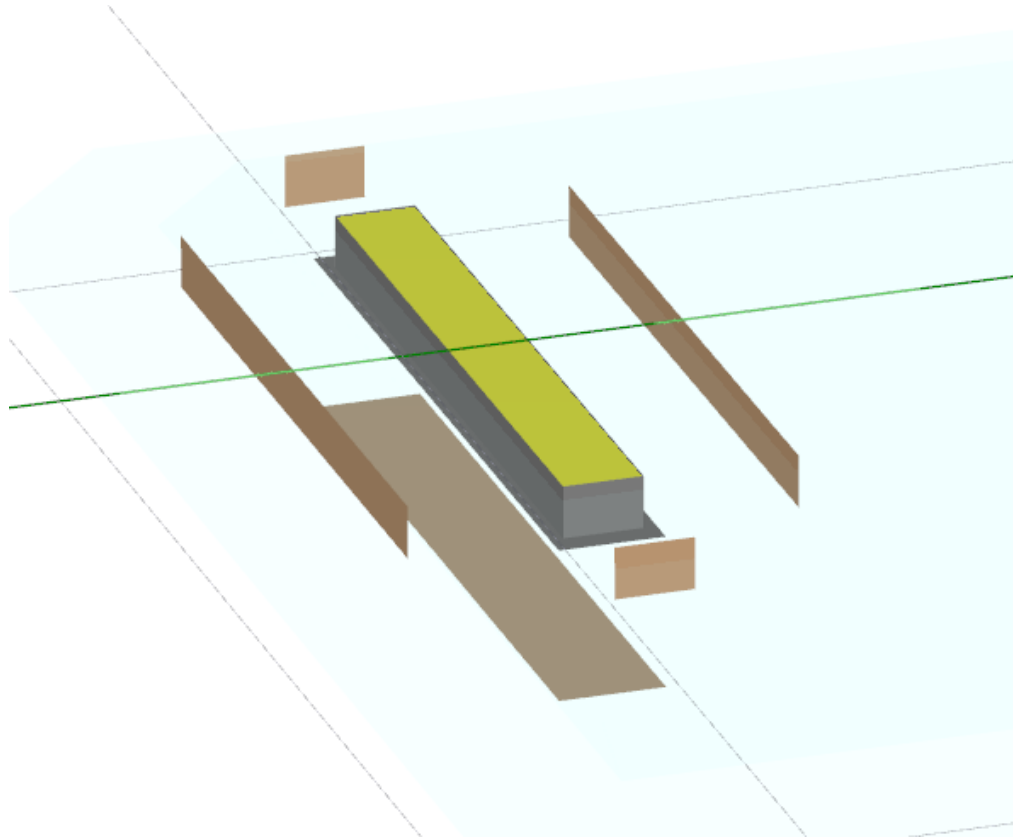
Raideleveytenä käytettiin mittaa 1524 mm. Kisko mallinnettiin hieman irti mallin reunoista, jotta mallin reunaehdot eivät suoraan vaikuttaneet kiskoon. Kiskoa kokeiltiin mallintaa myös laattaelementtinä (plate), mutta päädyttiin palkkiin, koska näin kiskolle oli mahdollista käyttää suoraan kiskovalmistajan parametreja kiskolle.

3.4 Rajapinnat

Rajapintaelementit (interfaces) ovat laattamaisia elementtejä, joita voidaan lisätä maakerroksen ja rakenteen tai kahden maakerroksen väliin, jotta niiden välistä vuorovaikutusta voidaan mallintaa. Lisäksi rajapinnoista voidaan tutkia niihin vaikuttavia voimia.

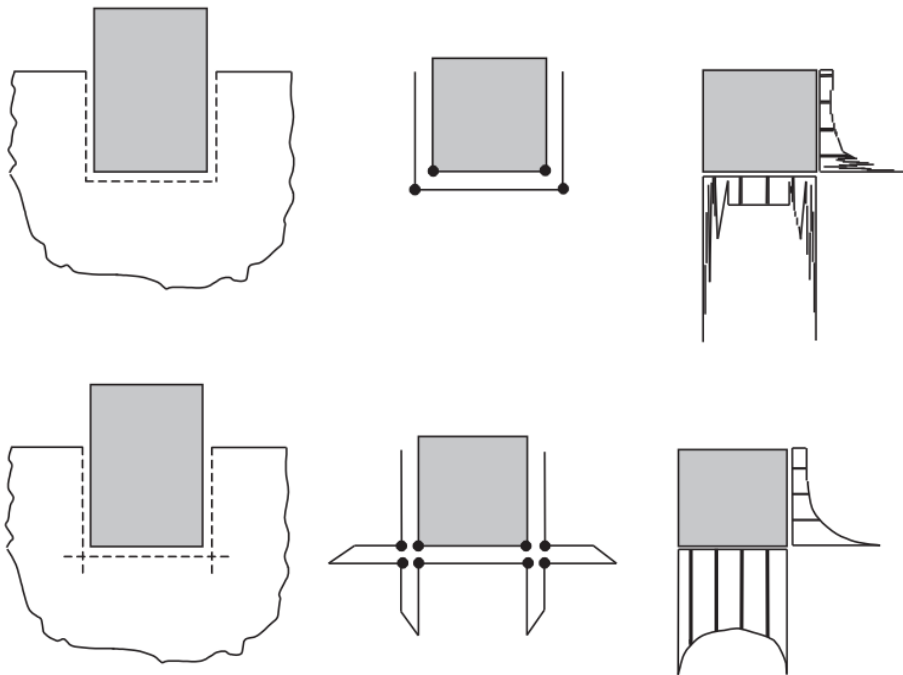
Rajapinnalle määritetään lujuusvähennyskerroin R_{inter} väliltä 0,01...1, joka vaikuttaa kitkakertoimeen. Rajapinnalle voidaan erikseen luoda materiaaliparametrit tai voidaan käyttää viereisen maakerroksen parametreja. Oletusarvoisesti ohjelma käyttää viereisen maan parametreja, ja maakerroksilla on oletuksena $R_{\text{inter}}=1$, jolloin kaikki maan kestävyys on käytettävissä rajapinnassa.

Pölkkyjen sivuille ja alapuolelle mallinnettiin rajapinnat, jotta ratapölkkyt eivät ole jäykästi kiinni tukikerroksessa. Kuvassa 2 on mallinnettuna keltaisella ratapölkky ja harmaalla rajapintaelementit. Ruskeat ”heijastukset” rajapinnoista ilmaisevat kumman puolen materiaalista ohjelma ottaa parametrit, jos niitä ei itse muuta. Tässä tapauksessa ohjelma käyttää pölkkyä ympäröivän tukikerroksen R_{inter} -arvoa.



Kuva 2. Mallinnettu ratapölkky ja sen rajapintaelementit.

Pölkyn alapuolinen rajapinta mallinnettiin hieman pölkyn sivujen ohi, jotta rajapintojen nurkkapisteet eivät kerää epärealistisen suuria jännityksiä. Jos rajapintojen kulmat ovat samassa pisteessä, ei kulma pääse liikkumaan kuten muu rajapinta ja sinne kerääntyy ylimääräisiä jännityksiä. Kuvassa 3 on havainnollistettu tätä rajapintojen piirrettä.

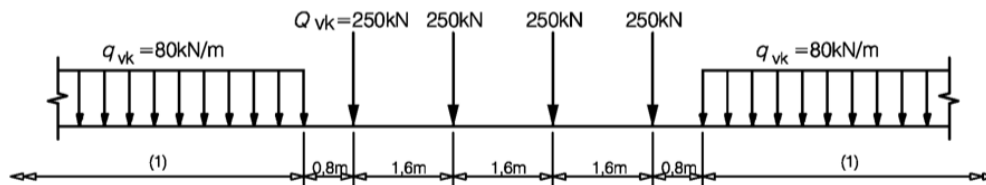


Kuva 3. Ylemmässä kolmen kuvan sarjassa on esitetty kulmapiste, joka aiheuttaa huonolaatuisia jännityskuvaajia. Alemmassa kuvasarjassa on esitetty joustava kulmapiste, joka tuottaa parempilaatuisia jännityskuvaajia (Plaxis 2012, s. 82)

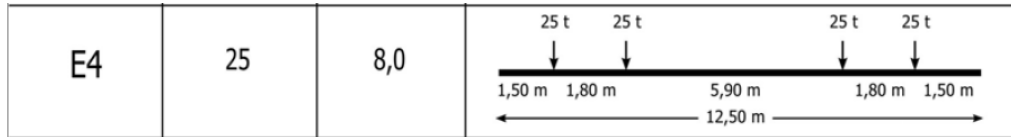
Lisäksi betonilaatan ja alusrakennekerroksen väliin mallinnettiin rajapintaelementti, jotta voitiin tarkastella laatan yläpinnassa vaikuttavia voimia. Tämän rajapinnan arvo oli jokaisessa laskelmassa $R_{inter}=0,67$, jota voidaan pitää hyvänä oletusarvona, kun tarkkaa tietoa ei ole saatavilla (Plaxis 2012, s. 164).

3.5 Kuorma

Junakuorman mallinnuksessa käytettiin kolmea eri kuormitustapausta. Kuormakaavioina käytettiin SFS-EN 1991-2 mukaista kuormakaaviota LM71 ilman nauhakuormaa ja nauhakuorman kanssa sekä SFS-EN-15528 standardin mukaista kaaviota E4. Kuvassa 4 on esitetty kuormakaavio LM71 ja kuvassa 5 kuormakaavio E4.

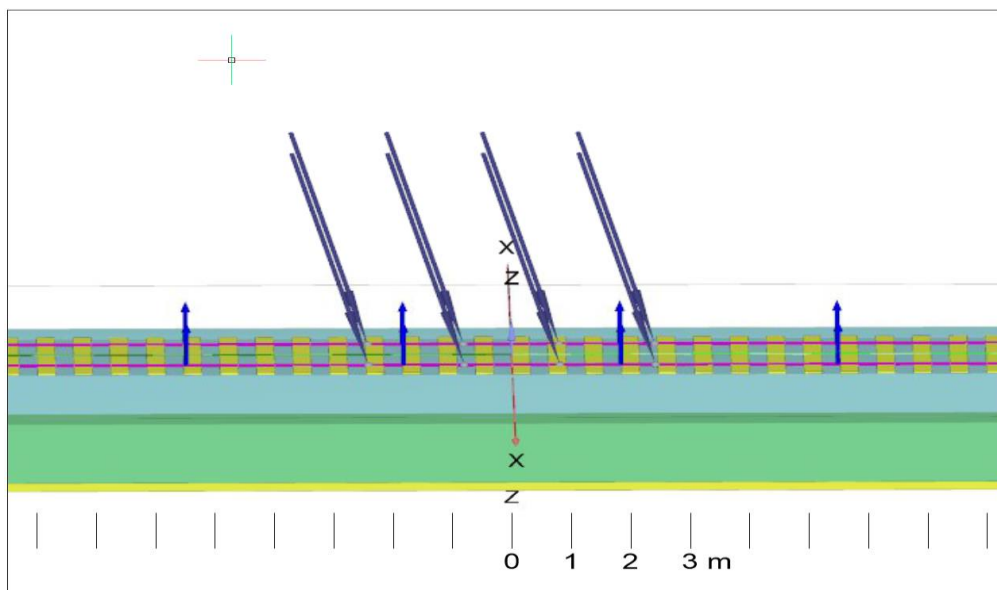


Kuva 4. Kuormakaavio LM71 (SFS-EN 1991-2).

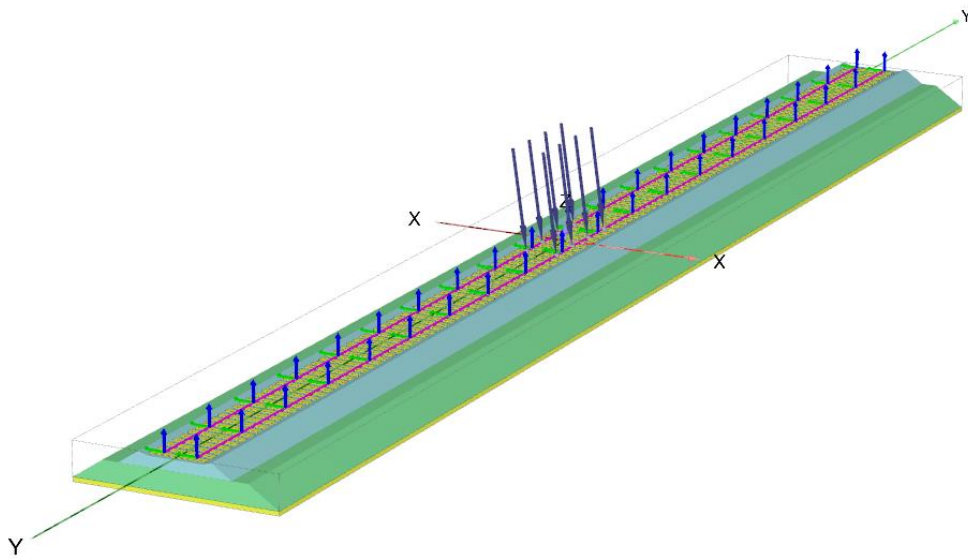


Kuva 5. Standardin EN-15528 mukainen kuormakaavio E4. (Liikennevirasto 2016, s. 28)

Akselikuormana käytettiin 250 kN. Kuormat mallinnettiin pistekuormina, jolloin jokaisen pisteen kohdalla kuormana oli 125 kN. Tarkastelussa oli myös junan jarrutusvaihe. Tällöin oletetaan, että kiskoon kohdistuu vaakasuuntainen kuorma, joka on 25 % pystykuormasta. Toiseksi kuormaksi laitettiin siis jokaiseen pisteeseen 31,25 kN vaakakuorma kiskoja suuntaisesti. Yhden pistekuorman resultantiksi tuli tällöin 128,8 kN. Ohjelmaan mallinnettu pistekuormamalli on esitetty kuvissa 6 ja 7.



Kuva 6. Mallinnettu pistekuorma kuormakaaviolla LM71 ilman nauhakuormaa.



Kuva 7. *Plaxis 3D-ohjelmalla tehty 70-metrinen malli radasta 1,5 m ratapenke-
rellä.*

Nauhakuorman suuruutena käytettiin 80 kN/m, eli molemmille kiskoille tuli 40 kN/m suuruinen kuorma. Myös nauhakuormalle mallinnettiin vaakasuuntainen komponentti, jonka suuruus oli 10 kN/m. Nauhakuorma tehtiin malliin 2 mm paksuna pintakuor-
mana, jolloin koko kuorma siirtyy kiskolle (surface load).

4 Laskenta

4.1 Osio 1 - Ensimmäinen laskenta

Radasta tehtiin ensimmäiseksi 44 m, 70 m ja 124 m pitkät mallit 1,5 m pengerkorkeudella.

Kuorma mallinnettiin kuormakaavion LM71 mukaisesti **ilman nauhakuormaa** (katso kuvat 4, 6 ja 7).

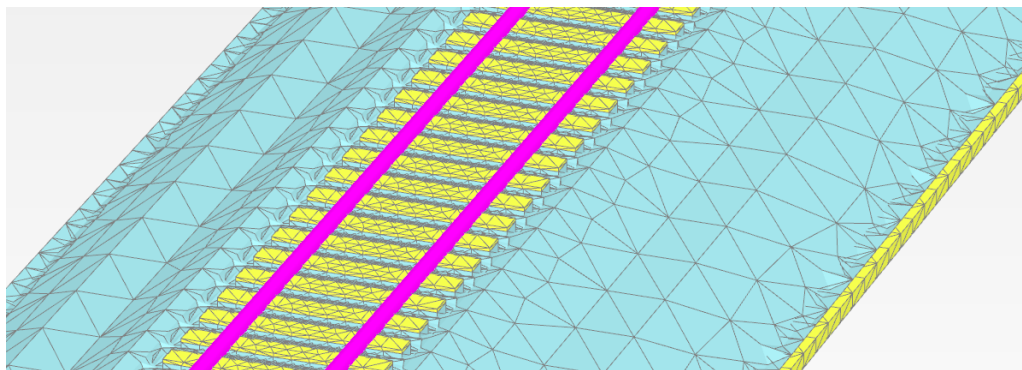
Jokaiselle näistä tapauksista laskettiin tulokset kolmella eri rajapintojen arvolla, niin että ratapölkkyjen ympärillä olevia rajapintojen arvoina käytettiin:

- $R_{inter}=1$ (jäykkä)
- $R_{inter}=0,5$
- $R_{inter}=0,5$ pölkyn sivulla olevilla rajapinnoilla ja $R_{inter}=0,9$ pölkyn alla olevassa rajapinnassa.

Jokainen erillinen laskenta oli laskentaohjelmassa vaiheistettu. Ensin ratkaistaan tasapaino, kun mallissa on rakennekerrokset sekä betonilaatta niiden alla. Seuraavaksi malliin siirtymät palautettiin, ja malliin lisättiin ratakiskot ja -pölkyt sekä rajapintaelementit, minkä jälkeen laskenta suoritettiin uudestaan. Lopuksi lisättiin kuorma ja laskenta suoritettiin viimeisen kerran. Tämä tehtiin jokaiselle erilliselle kuormitustapaukselle.

4.1.1 Laskentaverkko

Laskentaverkolle määriteltiin tiheys, eli montako elementtiä ohjelma luo mallinnettuun geometriaan. Tiettyyn rajaan asti tiheämpi verkko antoi tarkemmat laskentatulokset. Toisaalta, laskenta kesti kauemmin tiheämmällä verkolla. Yleensä kannattaa tehdä tiheämpi laskentaverkko niille alueille, joilla tapahtuu suurimmat muodonmuutokset ja harventaa verkkoa esimerkiksi mallin reuna-alueilla. Kuvassa 8 on esitetty osa laskentaverkosta.



Kuva 8. Laskentaverkko (mesh), jossa rakenne-elementit on tehty tiheämmällä verkolla ja maakerrokset karkeammalla.

Laskentaverkon tiheys määritellään kahdella tavalla: valitsemalla koko mallissa käytettävä yleinen verkkoelementtien jako (element distribution) ja tihentämällä tai harventamalla mallin eri osia paikallisesti määrittämällä niille karkeusarvot (coarseness factor). Verkkoelementtien jako valitaan viidestä vaihtoehdosta, joita on hyvin hienosta hyvin karkeaan. Tässä työssä käytettiin keskitiheää jakoa ja mallin eri osia hienonnettiin asteittain, kunnes ohjelma ei saanut enää luotua tiheämpää laskentaverkkoa.

Ratarakenteissa ja tukikerroksessa käytettiin tiheintä verkkoa, alusrakenteessa hieman harvempaa ja betonilaatassa vielä hieman harvempaa. Laskennan edetessä havaittiin, että laskentaverkon suurin mahdollinen tiheys riippui radan pituudesta, joten eri laskentatapauksilla oli erilaiset laskentaverkot. Taulukossa 6 on karkeusarvot (coarseness factor) eripituusille malleille radasta.

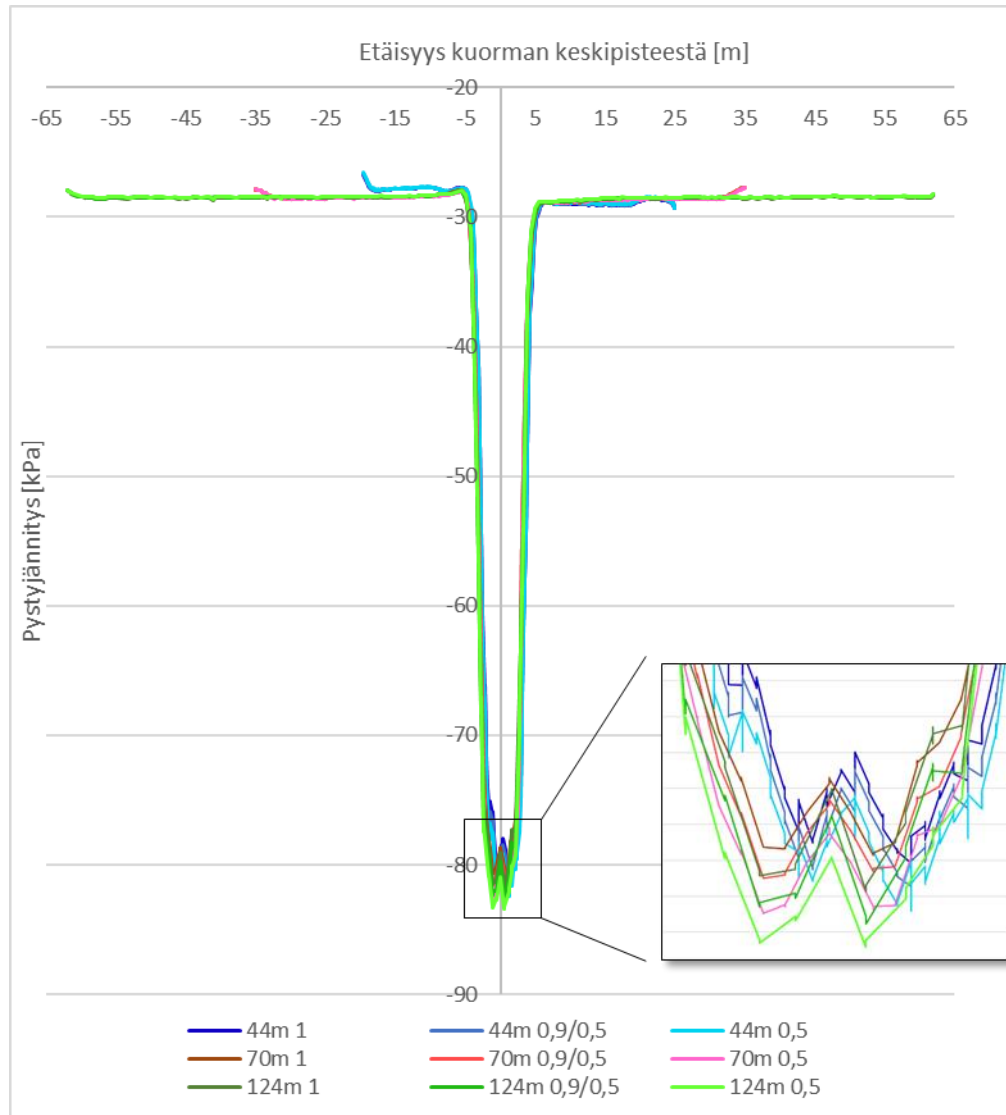
Taulukko 6. Mallissa käytetyt karkeuden arvot laskentaverkolle.

Ratamallin pituus	Betonilaatta	Alusrkenne	Tukikerros	Rataölkyt ja -kiskot
124 m	0,25	0,125	0,05	0,05
70 m	0,3536	0,35	0,07071	0,07071
44 m	0,25	0,125	0,05	0,05

4.1.2 Ensimmäisen laskennan tulos

Tehdyistä laskelmista tarkasteltiin pysty- ja vaakajännitystä laatan pinnalla sekä kiskon siirtymää radan suunnassa. Kuvaajissa kuorma sijaitsi symmetrisesti nolla-akselin molemmin puolin (ks. kuva 7).

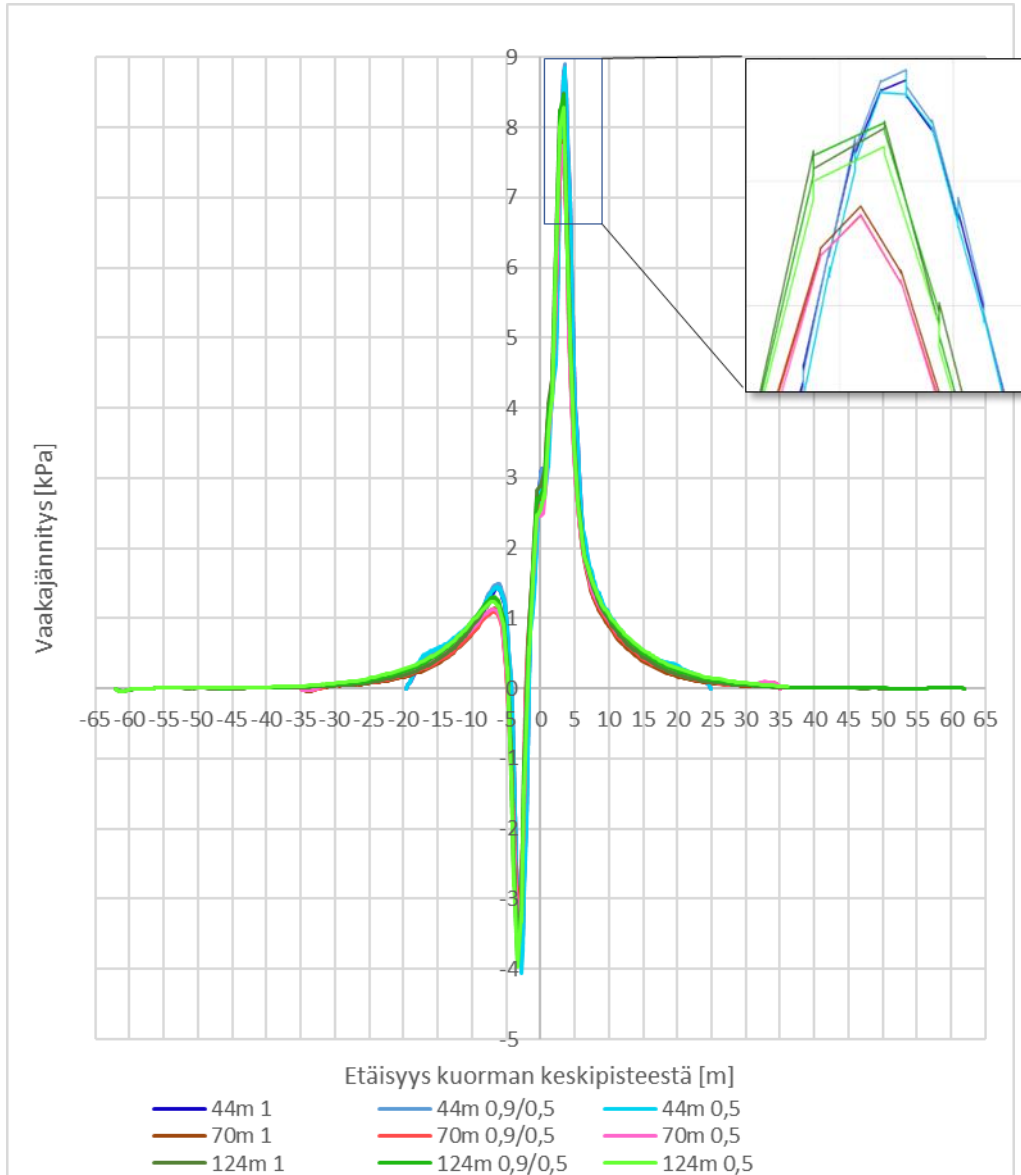
Eri mallien tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan, jos pitkän mallin päätyreunavaikutusta ei oteta huomioon. Kuvassa 9 on esitetty pystysuuntaisen jännityksen suuruus laatan pinnalla eri kohdissa mallinnettua rataa. Huippuarvot on esitetty lähempää, jotta tulokset erottuvat toisistaan.



Kuva 9. Pystyjännitys laatan pinnalla eri rajapintojen arvoilla ja mallin pituuksilla. Mallin pituuden perässä oleva luku kertoo rajapintaelementin R_{inter} arvon. Tapauksessa 0,9/0,5 on pölkyn sivuilla arvo 0,5 ja pölkyn alla 0,9.

Kuvaajasta nähdään, että pystysuuntaiset jännitykset ovat hieman suurempia pidemmällä mallilla laskettuna. Pienempi kitka pölkyn ja maan välillä johtaa myös laskennassa hieman isompaan pystyjännitykseen laatan pinnassa. On myös nähtävissä, että 44 m radan huippuarvot ovat hieman enemmän sivussa kuorman keskipisteestä. Tarkka sijainti riippuu siitä, miten elementtiverkko ja kuorma sijoittuvat suhteessa toisiinsa. Koska Plaxis 3D luo elementtiverkon itse, elementtien solmupisteet laatan pinnassa voivat sijaita hieman sivussa suhteessa kuorman kiskon pinnassa. Eroavuudet ovat niin pieniä, että ne voi olettaa johtuvan eri elementtiverkkojen tiheyksistä. Mallin pituus ei oleellisesti vaikuta pystyjännitykseen laatan pinnassa. Kitka pölkyn ja maan välillä ei oleellisesti vaikuta pystyjännitykseen laatan pinnassa.

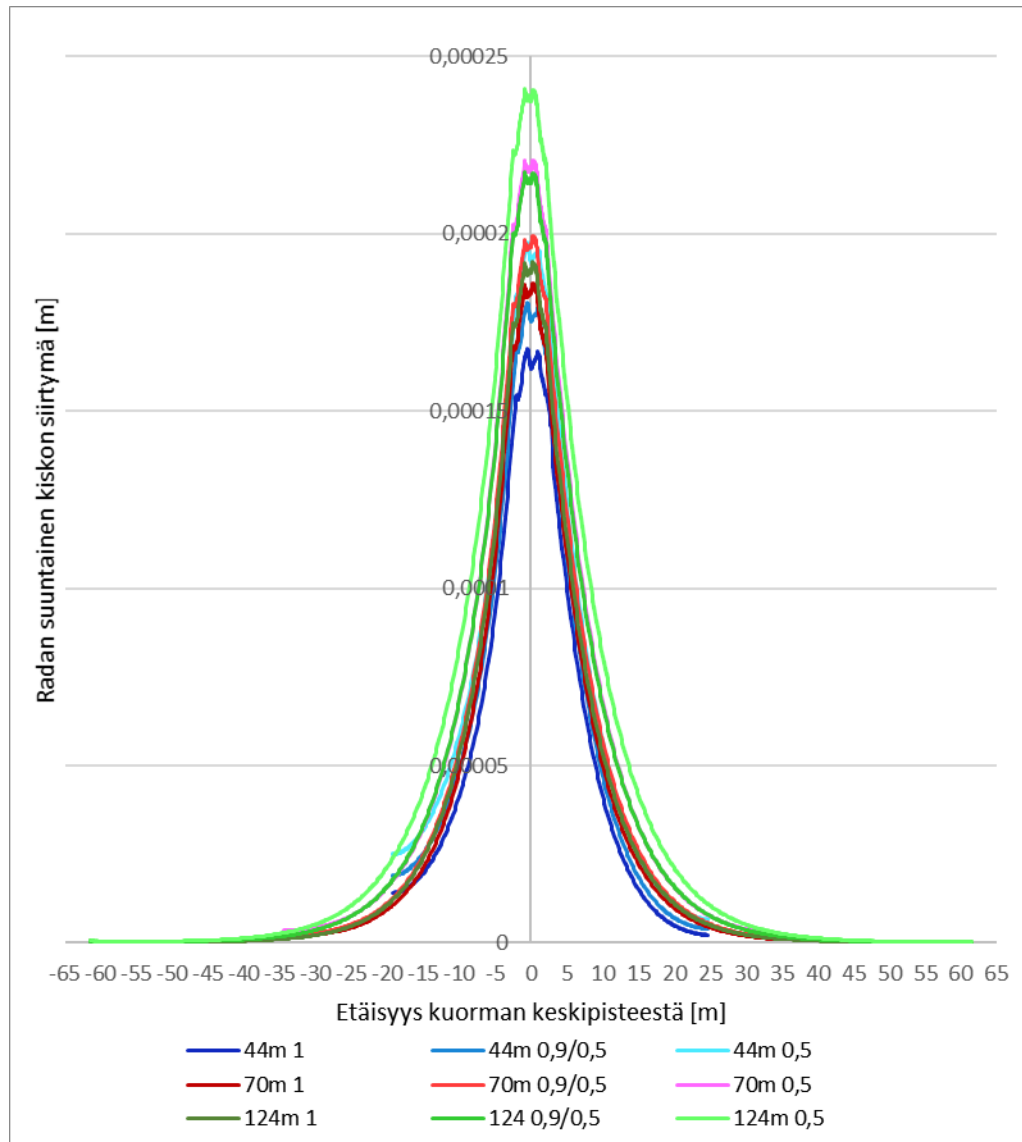
Lisäksi tarkasteltiin laatan yläpintaan syntyneitä kokonaisvaakajännityksiä. Kuvassa 10 on esitetty syntyneet kokonaisvaakajännitykset betonilaatan yläpinnalla eri etäisyyksillä kuorman keskipisteestä.



Kuva 10. Vaakajännitys betonilaatan pinnalla eri rajapintojen arvoilla ja radan pituuksilla. Mallin pituuden perässä oleva luku kertoo rajapintaelementin R_{inter} arvon ratapölkkyjen ympärillä. Tapauksessa 0,9/0,5 on pölkyn sivulla arvo 0,5 ja pölkyn alla 0,9.

Betonilaatalle syntyvien vaakajännitysten erot ovat pieniä sekä eri ratapituuksilla, että eri kitkan arvoilla tarkasteltaessa. Erot vaakajännityksessä laatan pinnassa eri pituisilla malleilla ovat pienet mutta suhteellisesti suurempia kuin pystyjännityksessä. Voidaan todeta että, mallin reuna vaikuttaa enemmän vaakajännitykseen kuin pystyjännitykseen laatan pinnassa.

Kuvassa 11 on esitetty ratakiskon siirtymä kiskon pituussuunnassa. Kuorman läheisyydessä kisko siirtyi eniten ja arvot pienenevät lähelle nollaa mallin reunoilla. Huippuarvo siirtymälle kuorman kohdalla saatiin 124 metrisellä mallilla ja 0,5 kitkalla ja se on noin 0,25 mm. Mallinnetun radan pituus vaikutti suhteessa paljon siihen, miten suuria siirtymiä kiskossa esiintyy.



Kuva 11. Kiskon siirtymä kiskon pituussuunnassa eri rajapintojen arvoilla ja radan pituuksilla. Mallin pituuden perässä oleva luku kertoo rajapintaelementin R_{inter} arvon. Tapauksessa 0,9/0,5 on pölkyn sivuilla arvo 0,5 ja pölkyn alla 0,9.

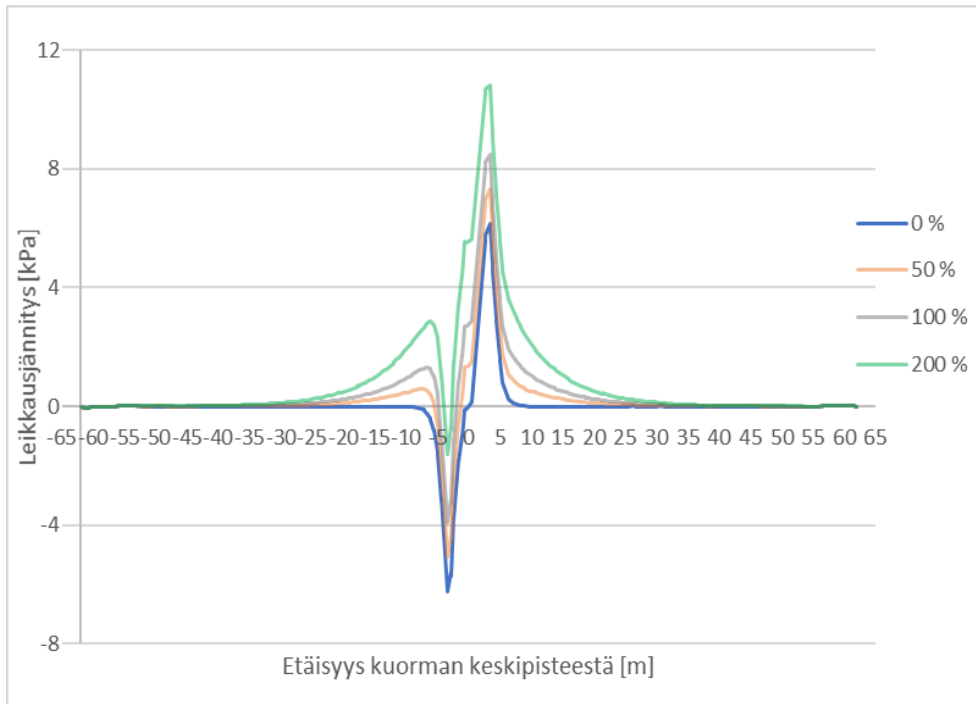
Tärkeätä on huomata, että mallin koon vaikutus laatan pinnan jännityksiin on huomattavasti pienempi kuin sen vaikutus siirtymiin. Vaikka lyhyen mallin reunat selvästi vaikuttavat laskettuihin siirtymiin ja jännityksiin, on mallin koolla huomattavasti pienempi vaikutus jännitysten tarkastelussa kuin siirtymien tarkastelussa.

4.1.3 Kuorman vaakakomponentti

Kuorman vaakakomponentin aiheuttamaa leikkausjännitystä tutkittiin niin, että mallin laskenta tehtiin pelkän pystysuuntaisen kuorman kanssa sekä eri suuruisilla vaakakomponenteilla. Leikkausjännitystä tarkasteltiin laatan pinnalla radan pituussuunnassa.

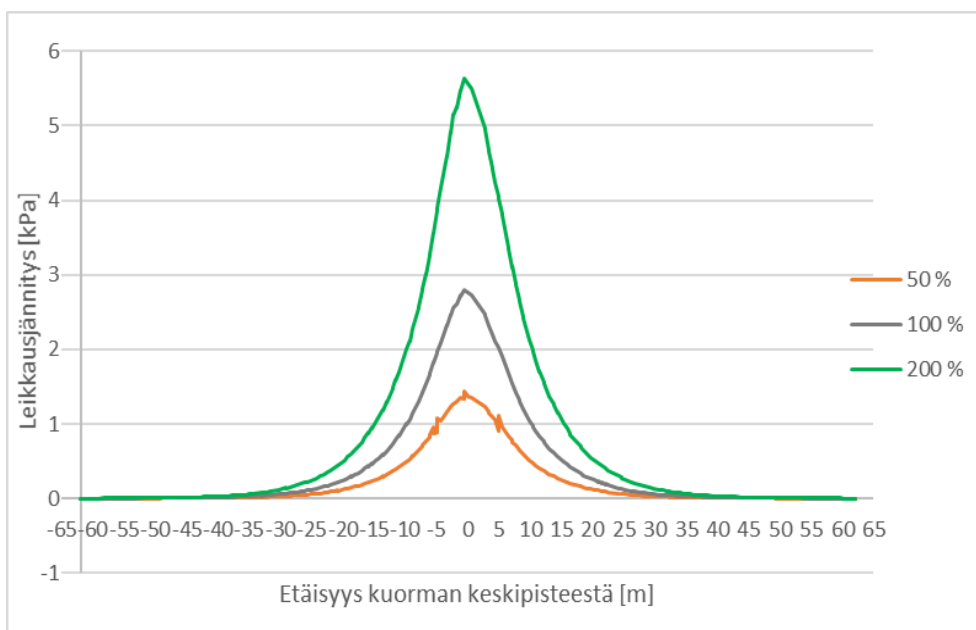
Kuormana oli LM71 ilman nauhakuormia (katso kuvat 4, 6 ja 7).

Kuvassa 12 on esitetty tulokset, jotka on laskettu pysty- ja vaakakuormalla. Kuvaajassa 0 % tapaus on se, että vaakakuormaa ei ole lainkaan ja 100 % tapauksessa vaakakuorma on 31,25 kN / kuormapiste (25 % pystykuormasta).



Kuva 12. Leikkausjännitys laatan pinnalla eri suuruisilla vaakakuormilla (LM71 ilman nauhakuormia). Kuva on pituusleikkaus laatan keskilinjalla. Sininen viiva kuvaa pelkän pystykuorman aiheuttamaa leikkausjännitystä laatan pinnassa.

Kuvassa 13 on esitetty pelkän vaakakomponentin aiheuttama jännitys laatan pinnalla. Kuvaaja saatiin vähentämällä vaak- ja pystykuormat sisältävistä laskentatuloksista pelkät pystysuuntaiset kuormat sisältävän laskennan tulokset.



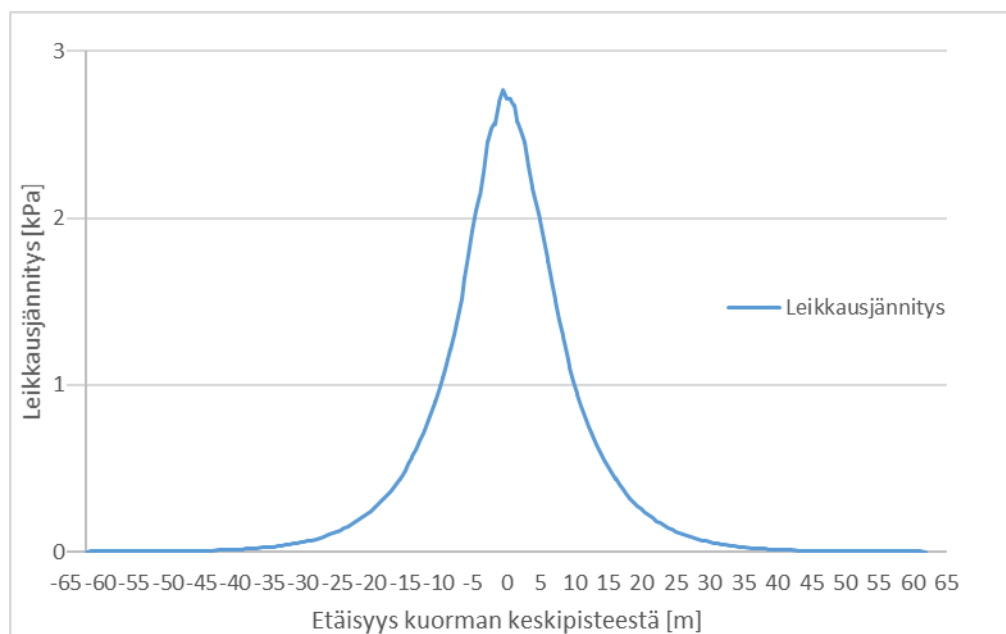
Kuva 13. Vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pituussuunnassa kuormalla LM71 ilman nauhakuormia. Kuva on pituusleikkaus laatan keskilinjalla.

Kuvista 12 ja 13 nähdään, että pystysuuntainen kuorma aiheuttaa vaakasuuntaista jännitystä laatan pinnassa. Vaakasuuntaisesta kuormasta aiheutuva jännityslisä huippuarvossa on pieni, noin 35 %, mutta vaakajännitystä syntyy pidemmällä matkalla laatan pituussuunnassa. LM71 akseliryhmän vaikutus on noin 30 m molempiin suuntiin kuorman keskipisteestä silloin kun vaakakuorma oletetaan olevan 25 % pystykuormasta.

4.1.4 Resultantin tarkistuslaskelmat

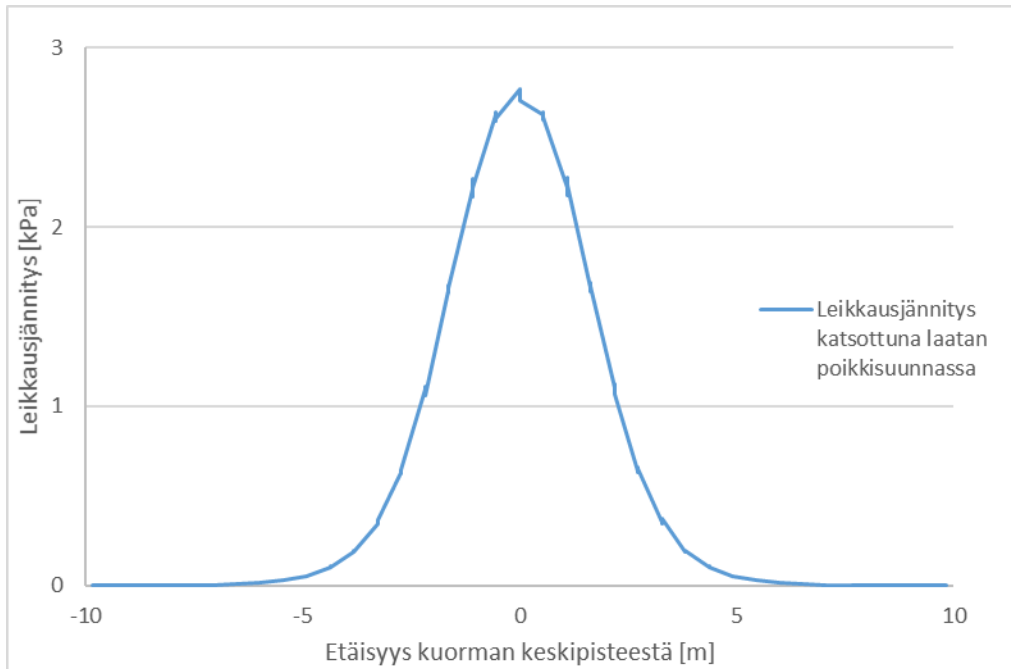
Laskentatulokset tarkastettiin laskemalla vaakakomponentin aiheuttama kokonaisleikkausjännitys laatan pinnalla. Kaiken vaakakuormituksen pitäisi välittyä laatalle, jolloin tulos olisi $8 \cdot 31,25 \text{ kN} = 250 \text{ kN}$. Tulokseksi saatiin kuitenkin vain noin 215 kN, eli vain 86 % vaakakuormasta välittyi laatan pinnalle.

Vaakakuormitusta tarkasteltiin vielä leveämmällä mallilla, jotta varmistuttiin siitä, että mallin reunat eivät vaikuta tuloksiin ja että jännitys pienenee nolnaan ennen mallin reunaa. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty näiden laskentojen tulokset radan pituus- ja poikkisuunnassa.



Kuva 14. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama pituussuuntainen leikkausjännitys tarkasteltuna laatan pituussuunnassa. Kuvassa on esitetty pituusleikkaus laatan keskilinjalla.

Kuvassa 14 nähdään, että leikkausjännitys laatan pinnassa saavuttaa nolla-arvon noin 45 m kuormasta. Kuvassa 15 nähdään, että laatan poikkisuunnassa pituussuuntainen vaakajännitys laatan pinnalla saavuttaa nolla-arvon ennen mallin reunaa noin 7 m kuorman keskipisteestä.



Kuva 15. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama pituussuuntainen leikkausjännitys tarkasteltuna laatan poikkisuunnassa. Kuvassa on esitetty poikkileikkaus laatan keskikohdalla kuorman keskellä.

Tulosten perusteella ongelma ei johdu mallin reuna-alueista tai liian kapeasta mallista, sillä jännitys pienenee molemmissa suunnissa nolaksi ennen laskentamallin rajaa. Vaakakuorman aiheuttaman kokonaisleikkausjännityksen tulokseksi saatiin noin 215 kPa, joka vastaa alkuperäisen laskennan tulosta. Yllä esitetyt kuvaajat tehtiin kuormakaavion LM71 pelkkien akselikuormien laskentatuloksista 1,5 m penkereellä (katso kuvat 4,6 ja 7).

Leikkausjännityksen ”häviön” vuoksi tarkasteltiin myös laatan pinnassa vaikuttavaa kuormasta aiheutuvaa pystyjännitystä. Kuorman pystykomponentit ovat yhteensä $8 \cdot 125 \text{ kN} = 1000 \text{ kN}$, joten niiden aiheuttaman pystyjännityksen laatan pinnalla pitäisi olla 1000 kN. Taulukossa 7 on esitetty tarkastelun tulos.

Taulukko 7. Kuormituksen aiheuttama kokonaispystyjännitys laatan pinnalla.

1,5 m pengerkuorma 4 x 250 kN	
Puristusjännitys	1070 kN
Vetojännitys	28 kPa
Erotus	1042 kN

Pystyresultantin arvo on pystykuormaan nähden noin 42 kN liian suuri. Aiemmin esitetty leikkausjännityksen vaakaresultantti on noin 45 kN liian pieni. Kuitenkin malli pysyy hyvin paikallaan eikä liiku. Tätä ilmiötä ei tutkittu enempää, vaan mallia päätettiin muuttaa, jotta ilmiöstä päästäisiin eroon.

4.2 Osio 1 - Toinen laskenta

Laskentamalliin tehtiin muutoksia ensimmäisen laskentavaiheen tulosten perusteella.

Tehtyjä muutoksia olivat (tärkeät muutokset lihavoituna):

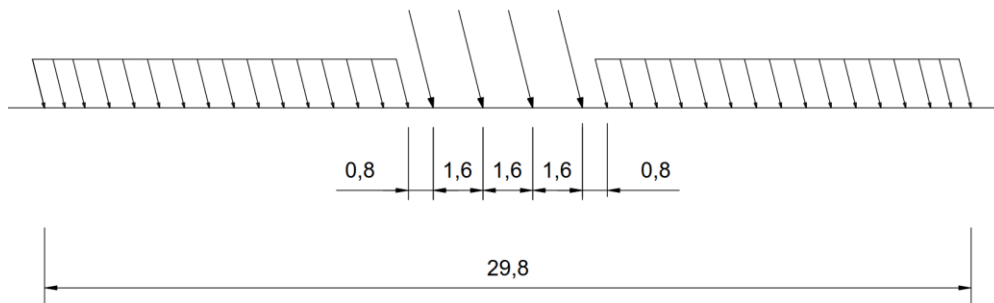
- Esilaskentavaiheessa maanpaine ratkaistiin lepopainekertoimen sijaan gravity loading-menetelmällä
- Pistekuormien määrä kolminkertaistettiin pelkästään pistekuormia sisältävillä kuormakaavioilla
- Nauhakuormien pituutta lyhennettiin
- Mallin kokoa muutettiin, niin että mallin pituus oli 104 m ja **leveys 20 m**
- **Rigid body-elementin sijaan mallinnettiin pelkkä pinta (surface), jonka liike estettiin sekä pysty- että vaakasuunnassa**
- **Alusrakennekerros mallinnettiin jatkumaan vaakasuorana mallin reunoille saakka**
- Lisättiin yksi laskentavaihe, jossa lasketaan leikkausjännitys laatan pinnalla, kun kuormaksi on mallinnettu pelkästään pystysuuntaista kuormaa

Pelkästään pystykuorman sisältävä laskentavaihe lisättiin, jotta saatiin laskettua kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys kokonaisleikkausjännityksestä.

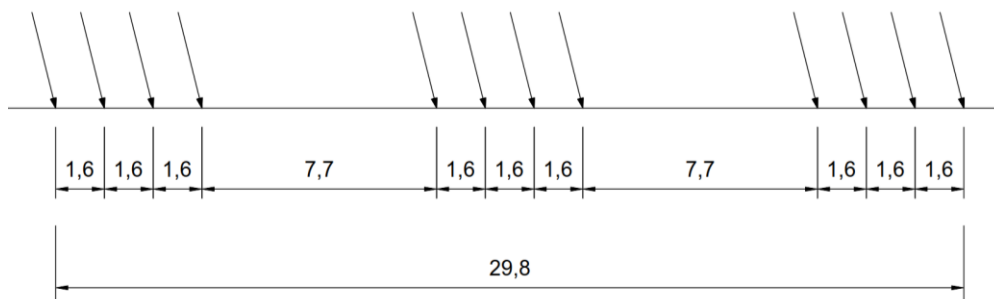
Tällä uudella mallilla leikkausjännityksen tulisi olla $3 * 250 \text{ kPa} = 750 \text{ kPa}$ kuormien lisäyksen vuoksi. Esimerkiksi 1,5 m penkereellä ja kuormakaaviolla LM71 ilman nauhakuormia saatiin laskennassa kokonaisleikkausjännitykseksi 741 kPa, eli 98,8 % tavoitearvosta.

Pistekuormien lisäyksessä käytettiin samoja kuormakaavioita kuin aiemmissakin laskelmissa. Kuormakaavioissa ei kuitenkaan lue mille etäisyydelle seuraavat akselikuormat asetetaan, joten pelkät akselikuormat sisältävästä LM71 kuormakaaviosta tehtiin kaksi eri vaihtoehtoa. Ensimmäisessä kuormien etäisyydeksi saatiin 4,65 m ja toisessa 7,7 m. Nämä etäisyyden määräytyivät kahdella eri tavalla. Lyhyempään etäisyyteen päädyttiin interpoloimalla niin, että jännitysvaikutus oli sama kuin LM71 kuormakaavion mukaisella kuormalla. Pidempään väliin päädyttiin laskemalla väli niin, että metrikohtainen kuorma (80 kN/m) oli sama kuin LM71 kuormakaavion mukaisella kuormalla.

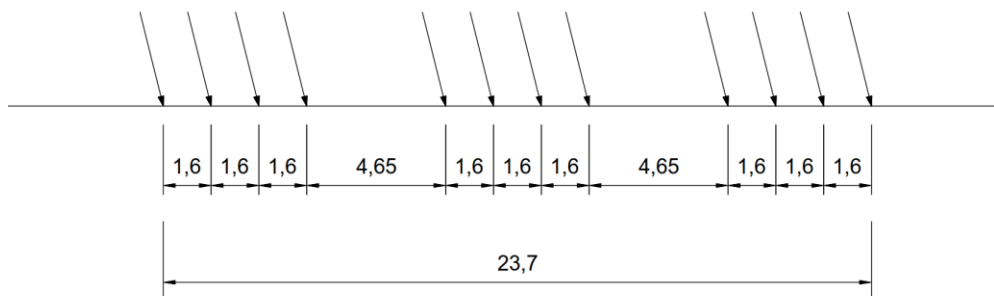
Kuvissa 16...19 on esitetty kuormien sijoittelu radalla. Ilmoitetut metrikohtaiset arvot on laskettu oletuksella, että kuormat jatkuvat samanlaisina äärettömän pitkinä. Eroituksena LM71, jossa akselikuormat eivät toistu, ainoastaan viivakuorma jatkuu.



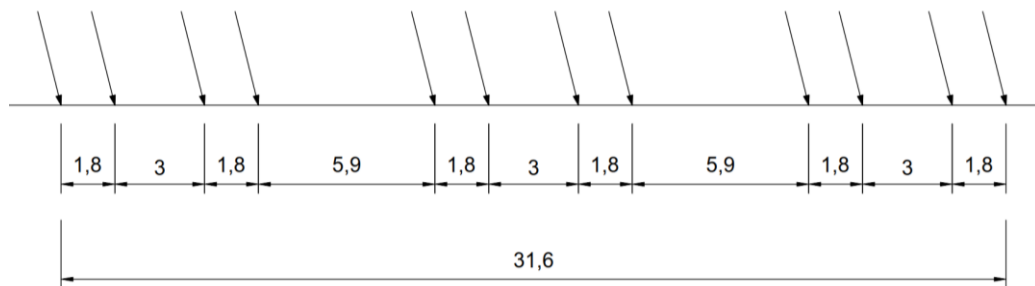
Kuva 16. Kuormakaavion LM71 mukaisesti mallinnettujen kuormien etäisyydet. Kaavion resultantti: pystykuorma: 2872; vaakakuorma: 718 kN. Jatkuvana kuormana pystykuorma 80 kN/m ja vaakakuorma 20 kN/m.



Kuva 17. Kuormakaavion LM71 mukaisesti mallinnettujen kuormien etäisyydet pelkillä akselikuormilla. Akseliryhmien etäisyys toisistaan kuormakaavion E4 mukaisesti (jäljempänä **LM71 E4**). Kaavion resultantti: pystykuorma: 3000; vaakakuorma: 750 kN. Jatkuvana kuormana pystykuorma 80 kN/m ja vaakakuorma 20 kN/m.

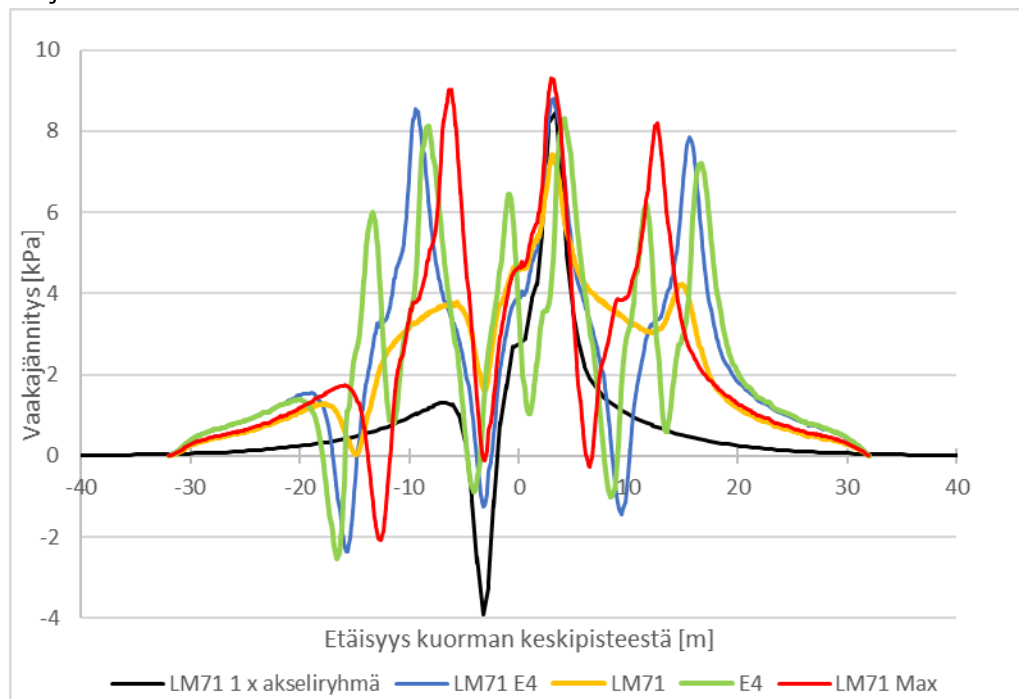


Kuva 18. Kuormakaavion LM71 mukaisesti mallinnettujen kuormien etäisyydet pelkillä akselikuormilla. Akseliryhmien etäisyys toisistaan sovitettu niin, että jännityksen maksimi vastaa kuormituskaaviota LM71 (jatkossa tästä käytetään nimitystä **LM71 Max**). Kaavion resultantti: pystykuorma: 3000; vaakakuorma: 750 kN. Jatkuvana kuormana pystykuorma 105.8 kN/m ja vaakakuorma 26,5 kN/m.



Kuva 19. Kuormakaavion E4 mukaisesti mallinnettujen kuormien etäisyydet. Kaavion resultantti: pystykuorma: 3000; vaakakuorma: 750 kN. Jatkuvana kuormana pystykuorma 80 kN/m ja vaakakuorma 20 kN/m.

Kuvassa 20 on esitetty kuormakaavioiden mukaisesti mallinnettujen kuormien aiheuttama pituussuuntainen leikkausjännitys 1,5 m syvyydessä olevan laatan pinnalla. Ensimmäisen laskennan (yksi akseliryhmä) mukainen leikkausjännitys on esitetty kuvaajassa mustalla värillä.



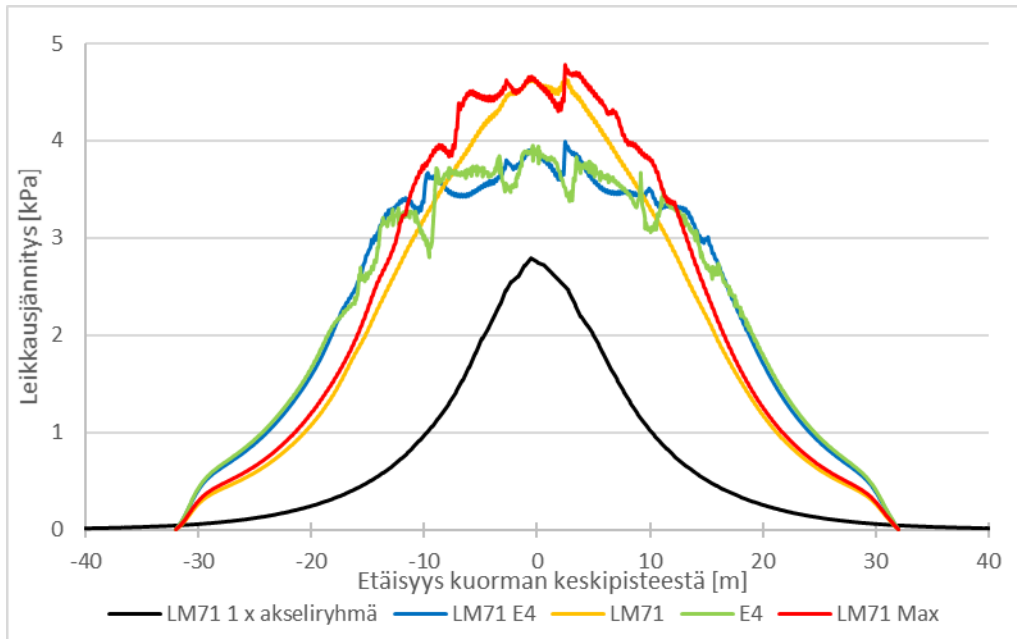
Kuva 20. Laatan pituussuuntaisen leikkausjännityksen kokonaisarvo. Pituusleikkaus laatan keskilinjalla. Laatta on 1,5 m syvyydessä.

Kuvasta 20 nähdään, että viereiset akselit vaikuttavat toisiinsa. Pystykuorman aiheuttama negatiivinen vaakasuuntainen jännitys akselin takana summautuu edellisen akselin edessä olevan positiivisen vaakajännityksen kanssa. Tämä näkyy sillä, että kolmesta kuormasta aiheutuu kolme negatiivista minimiarvoa, joista vasemmanpuoleisin (jonka takana ei ole kuormaa) on arvoltaan pienempi kuin muut. Viereiset akseliryhmät ovat kuitenkin sen verran kaukana toisistaan, että vaikutus vaakajännityksen kokonaisarvon huippuarvoihin on pieni.

LM71 (keltainen väri) kuormakaaviossa viivakuorma nostaa jatkuvana kuormana vaakajännityksen koko matkalla positiiviselle puolelle.

Kuvassa 21 on esitetty pelkän vaakakomponentin aiheuttama pituussuuntainen leikkausjännitys laatan pinnalla. Ensimmäisen laskennan (yksi akseliryhmä) mukainen leikkausjännitys on esitetty kuvaajassa mustalla värillä.

Kuvasta nähdään selvästi, että LM71 MAX kaavion mukainen kuorma on kalibroitu vastaamaan LM71 kaavion mukaista kuormaa. E4 ja LM71 akseliryhmällä oleva kuormakaavio, jossa ryhmien etäisyys vastaa E4 kaaviota (80 kN/m pystykuorma ja 20 kN/m vaakakuorma) aikaansaavat saman vaikutuksen laatan pinnassa. Ero johtuu siitä, että sama kokonaiskuorma on jaettu eri pitkälle matkalle eri kuorma kaavioissa.



Kuva 21. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pituussuunnassa 1,5 m syvyydessä. (Kuvassa vielä 66 m pitkä malli, jota käytettiin laskentojen välivaiheessa).

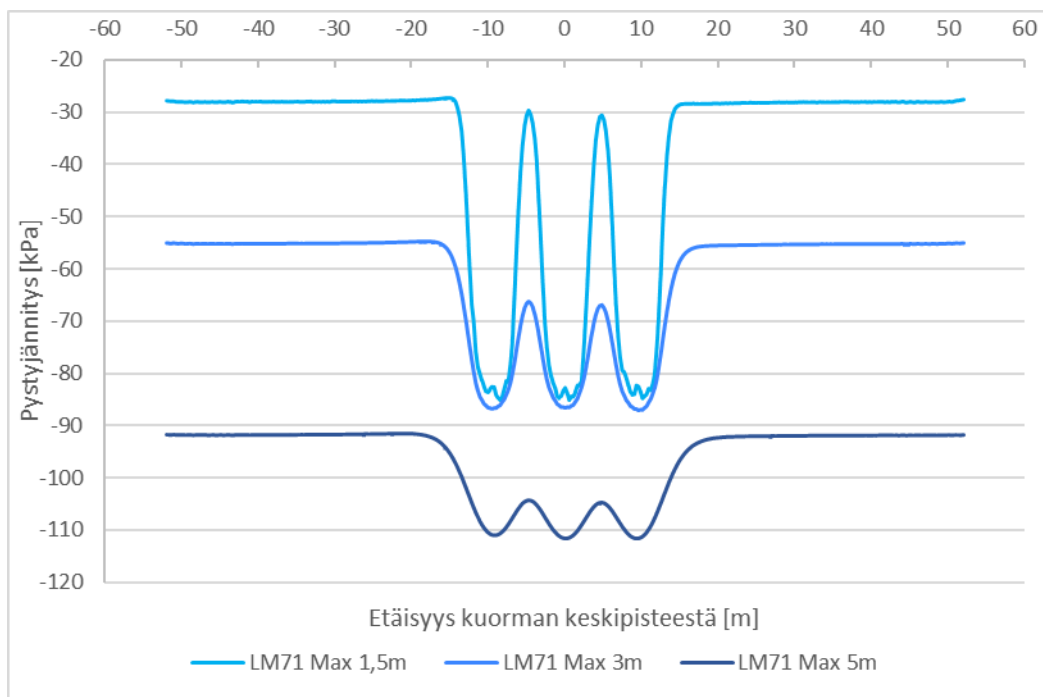
4.2.1 Toisen laskennan tulokset

Tässä kappaleessa on esitetty laskentojen tuloksia eri korkuisilla ratapenkereillä ja eri kuormitusvaihtoehdoilla.

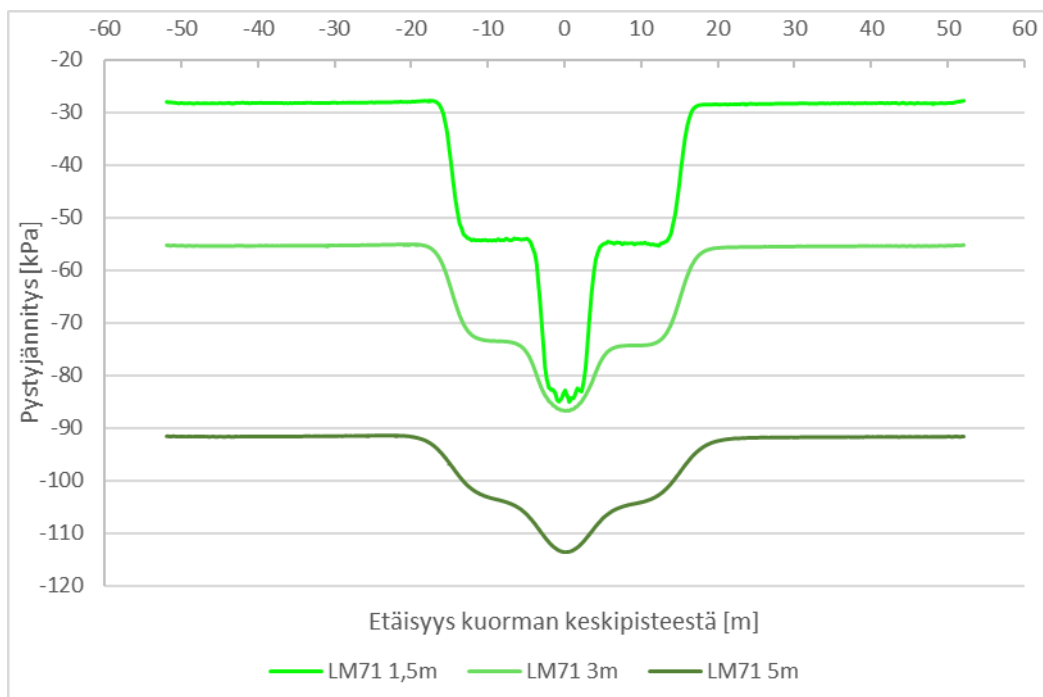
Alla esitetyt kuvat 22...33 ovat kaikki pituusleikkauksia laatan keskilinjaa pitkin. Kuvassa 34 on esitetty poikkileikkaus laatan keskikohdalla kuorman alla. Kuvalla 34 halutaan esittää minkä muotoisena vaakakuorman aiheuttama pituussuuntainen leikkausjännitys laatan pinnalla pienenee, kun siirytään lähemmäs laatan reunoja. Huipparvon kohdalla kuorman alla muutos on jyrkintä. Kauempana kuormasta muutos laatan poikkisuunnassa on loivempaa.

Kuvista 22...27 nähdään, miten pystyjännitys laatan pinnalla vaihtelee eri pengerkorkeuksilla ja kuormakaavioilla. Korkeammalla penkereellä maan painon aiheuttama jännitys on suurempaa kuin pienemmällä penkereillä ja kuorman aiheuttama jännityksen kasvu on pienempää. Kuormakaavion E4 pidempi väli pistekuormien välissä aiheuttaa pienempiä maksimijännityksiä kuin muilla kuormakaavioilla ja sen vaikutus ulottuu pidemmälle laatan pituussuunnassa. LM71 MAX ja LM71 kaavioissa akseliryhmät ovat identtiset, joten vaikutus laatan pinnassa akseliryhmän alla on sama. Koska resultantit myös ovat samat pitää viivakuorman vaikutus akseliryhmien välissä

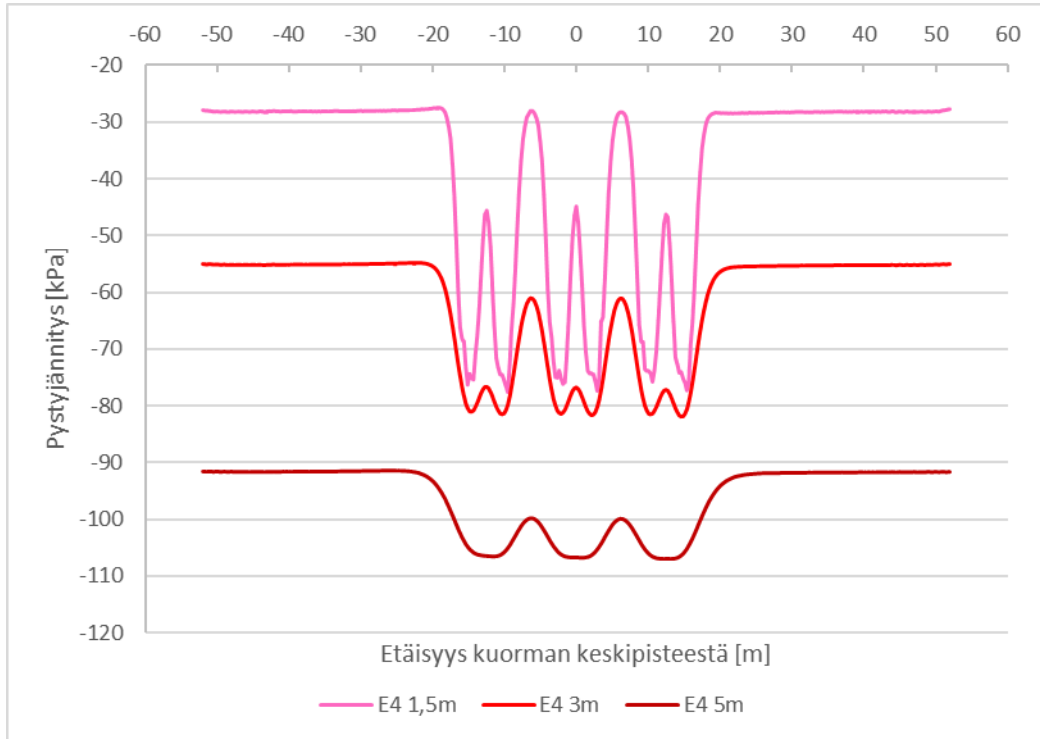
sekä viivakuorman pituus vastata akseliryhmien aiheuttamia huippuja. Tämä näkyy selvästi kuvissa 25 ja 26. LM71 kuormakaavion viivakuormat alkavat niin lähellä akseliryhmää, että viiden metrin syvyydellä ne nostavat huippuarvoa akseliryhmän alla. Tämä ei ole realistista. 3 m voidaan alustavasti pitää raja-arvona jonka syvemmällä LM71 kuormakaavio ei enää sovellu kuvaamaan junan aiheuttamaa pystyjännitystä laatan pinnassa.



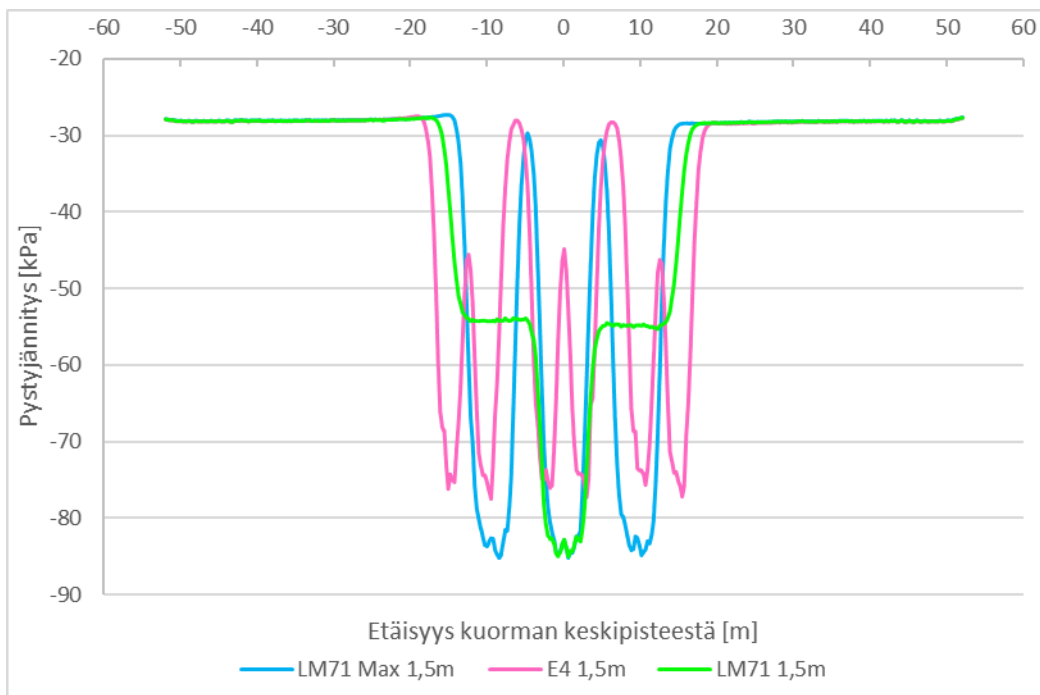
Kuva 22. Pystyjännitys laatan pinnalla eri pengerkorkeuksilla kuormakaaviolla **LM71 Max** pelkkien akseliryhmien kanssa.



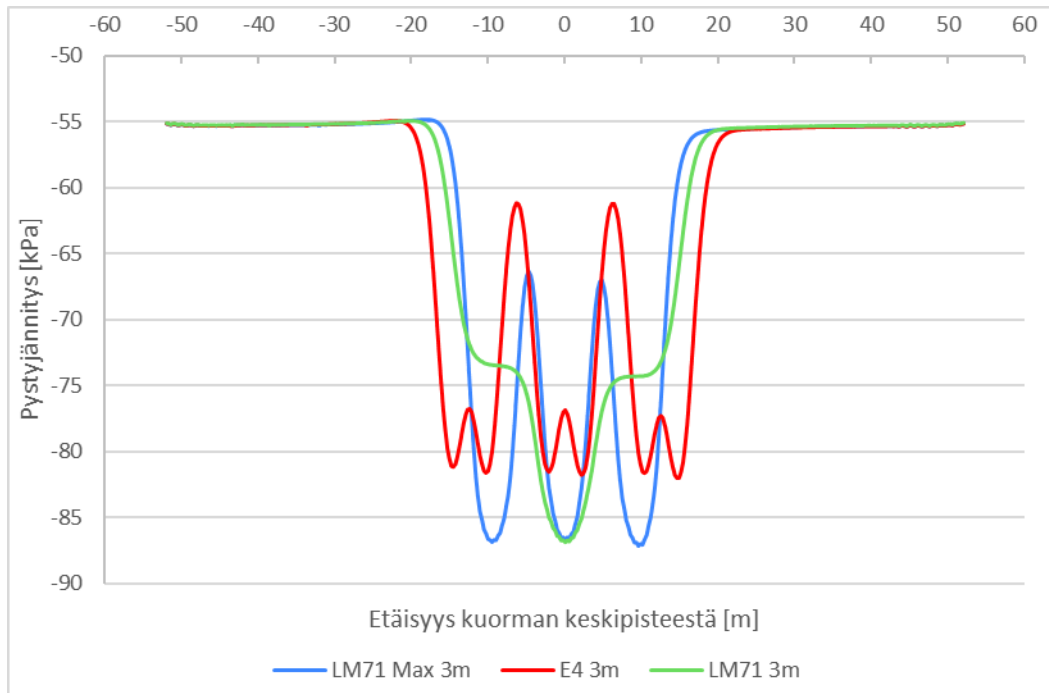
Kuva 23. Pystyjännitys laatan pinnalla eri pengerkorkeuksilla kuormakaaviolla **LM71** nauhakuormien kanssa.



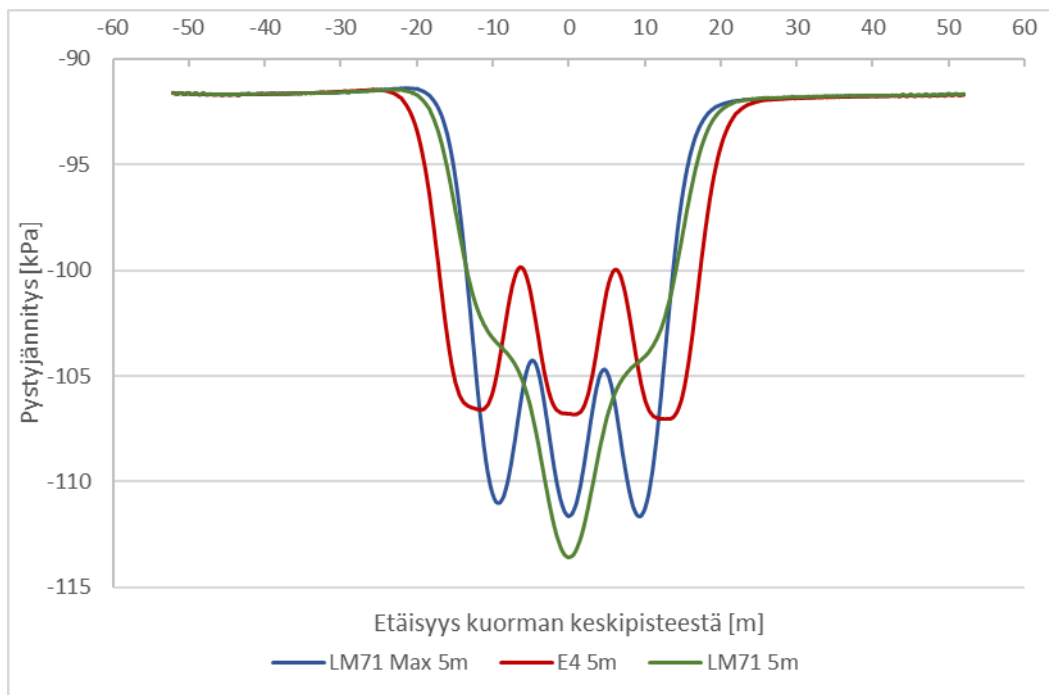
Kuva 24. Pystyjännitys laatan pinnalla eri pengerkorkeuksilla standardin EN-15528 kuormakaaviolla **E4**.



Kuva 25. Pystyjännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla 1,5 m pengerkorkeudella.



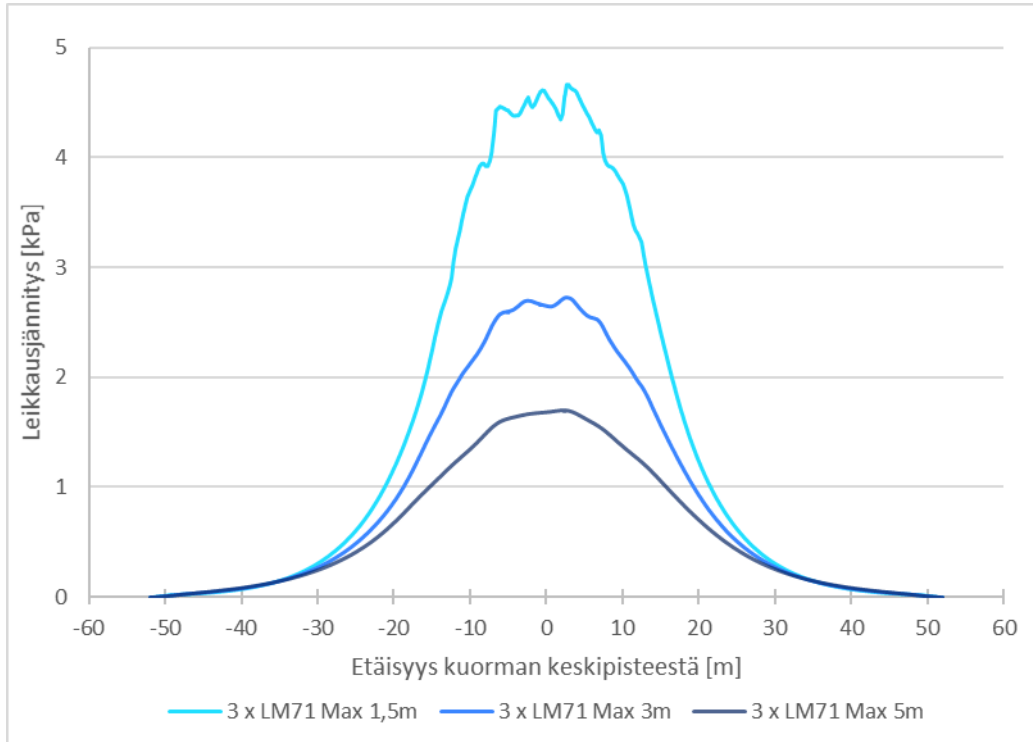
Kuva 26. Pystyjännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla 3 m pengerkorkeudella.



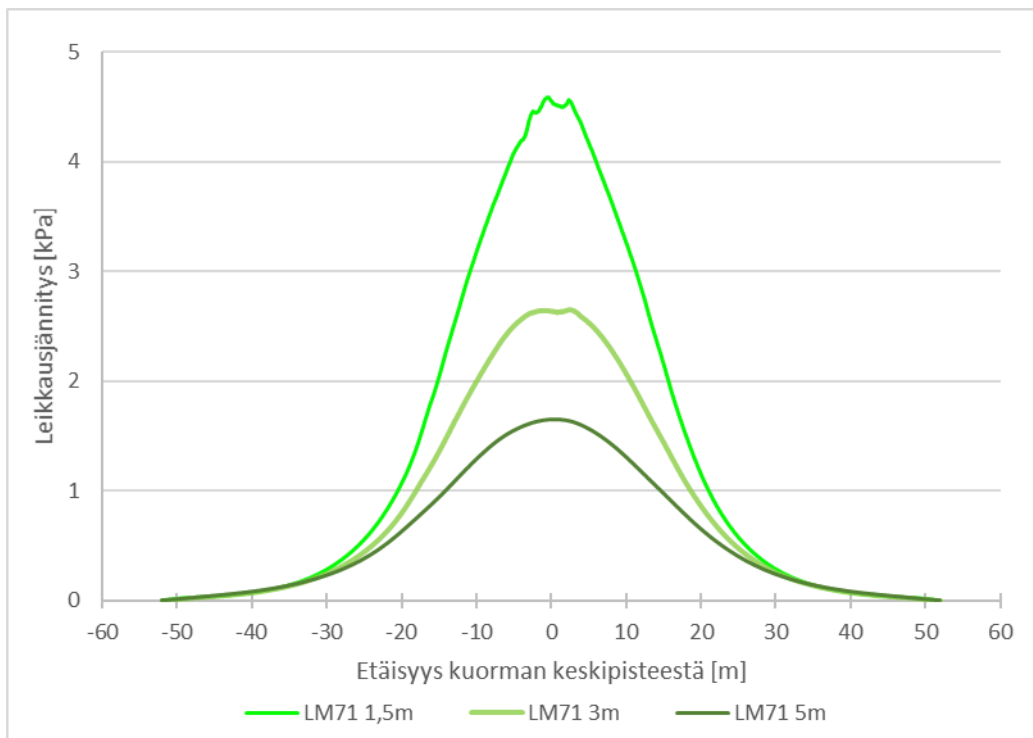
Kuva 27. Pystyjännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla 5 m pengerkorkeudella.

Kuvissa 28...33 on esitetty kuorman vaakakomponentin aiheuttaman pituussuuntaisen leikkausjännityksen suuruudet laatan pinnalla eri kuormakaavioilla ja pengerkorkeuksilla. Kuvista käy selvästi ilmi, että mallinnetun kuorman kokonaispituus vaikuttaa oleellisesti kuorman vaakakomponentin aiheuttamaan pituussuuntaiseen leikkausjännityksen huippuarvoon laatan pinnassa. E4 on hieman pidempi kuin LM71 ja LM71 MAX.

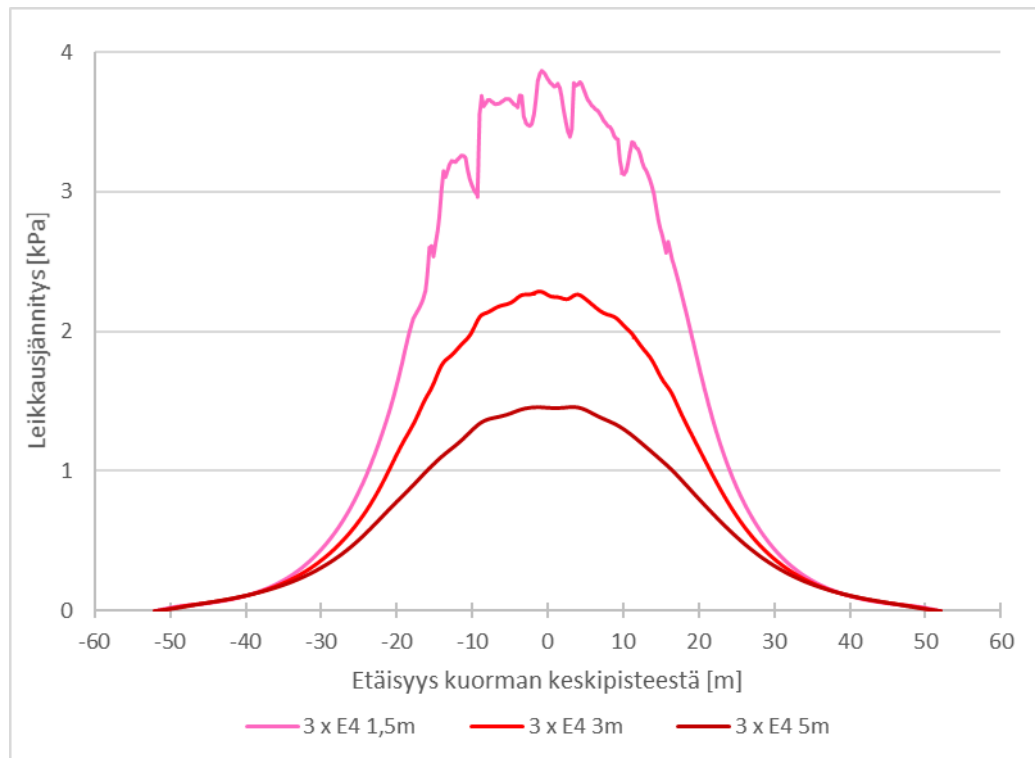
Resultantti on kaikissa tapauksissa sama. Pituussuuntainen vaikutus on lähestulkoon saman pituinen eri pengerkorkeuksilla. Leikkausjännityksen huippuarvo kuitenkin pienenee, kun laatta on korkeamman penkereen alla. Tämä selittyy tarkastelemalla kuvaa 34. Korkealla penkereellä pituussuuntainen vaakakuorma jakautuu leveämmälle laatan alueelle ja 5 m syvyydessä laatan (lue mallin) reunalla on jo huomattavan suuri pituussuuntainen leikkausjännityksen arvo.



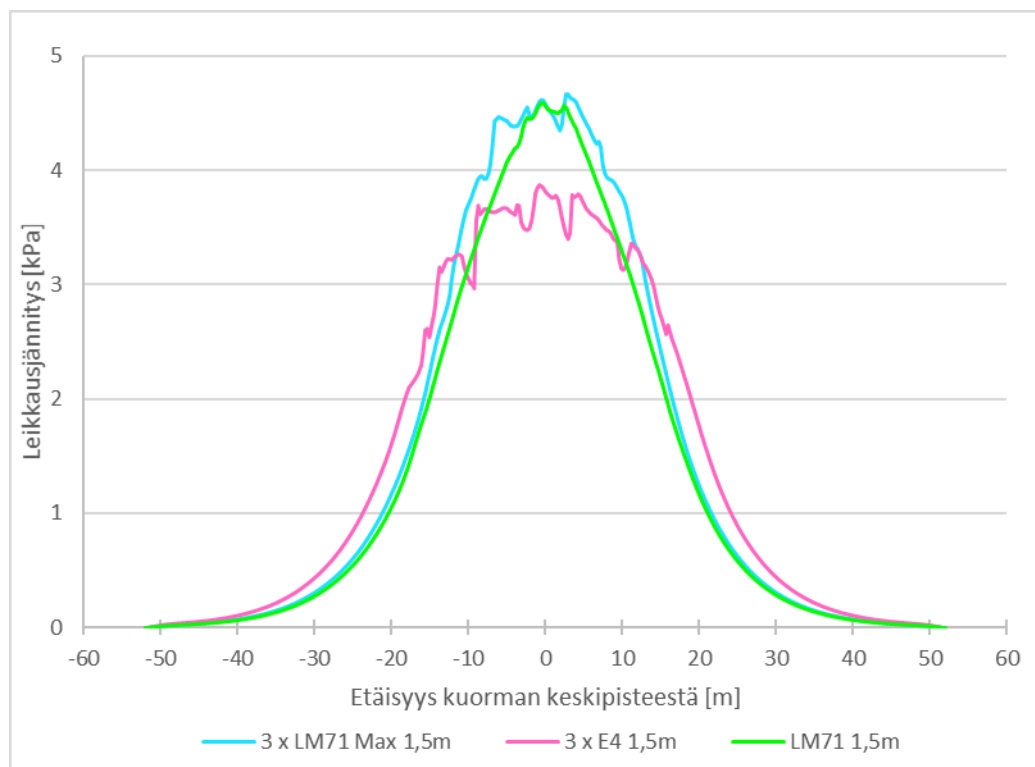
Kuva 28. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla eri pengerkorkeuksilla kuormakaaviolla **LM71 Max**.



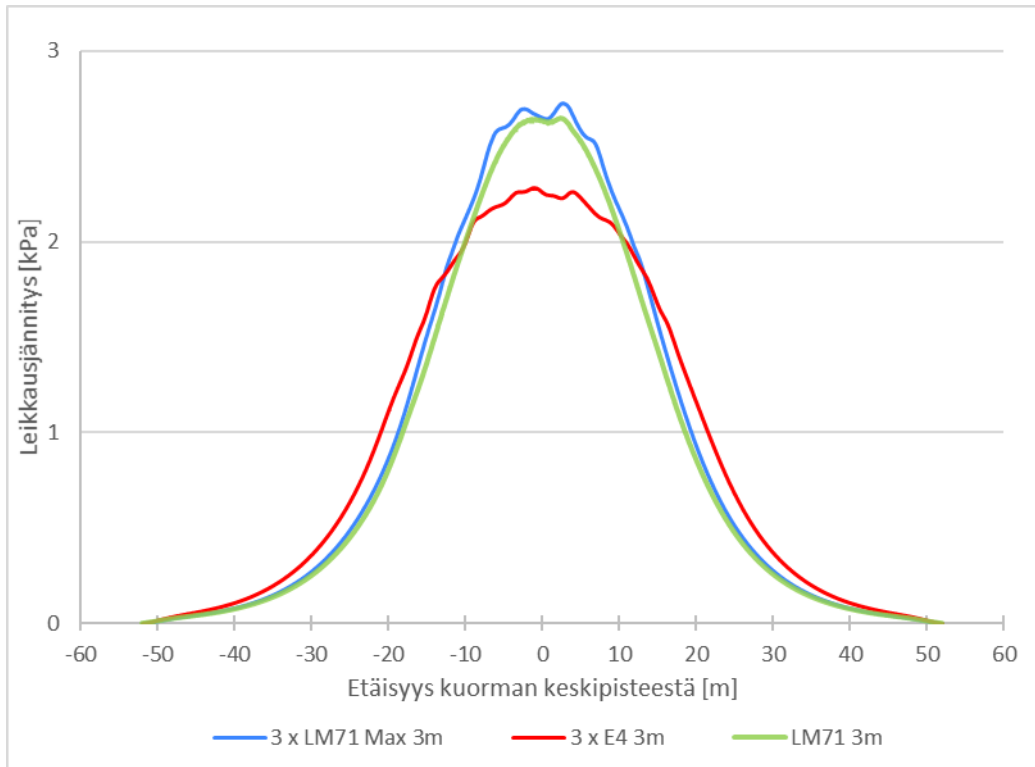
Kuva 29. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla eri pengerkorkeuksilla kuormakaaviolla **LM71** (nauhakuormien kanssa).



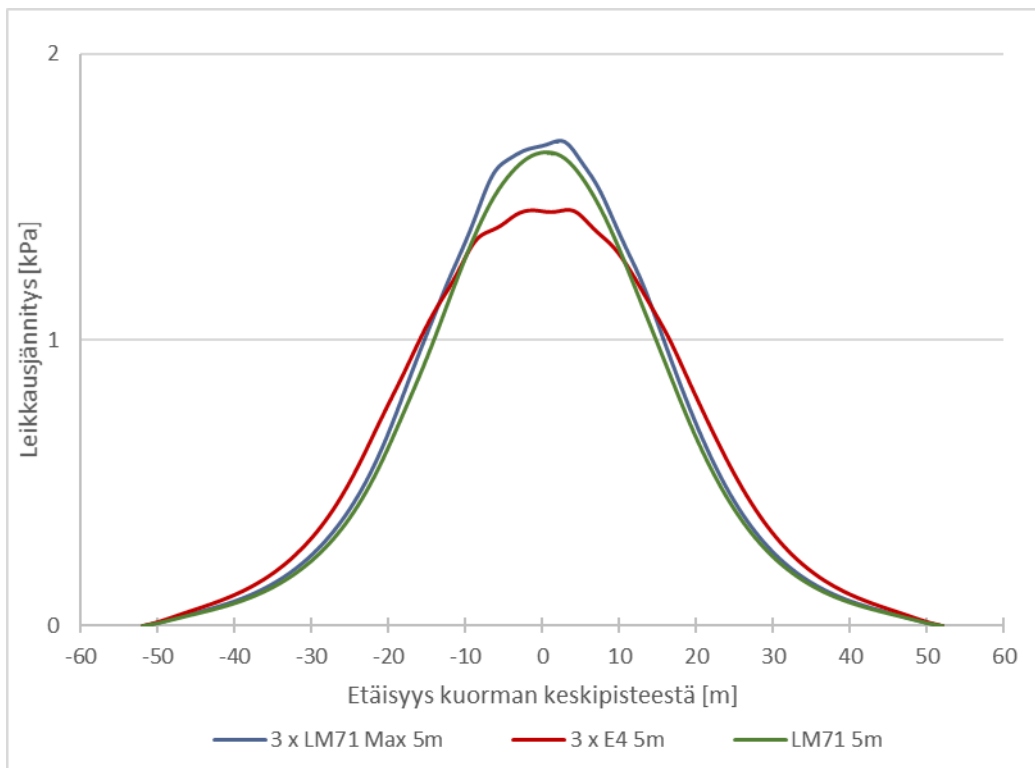
Kuva 30. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla eri pengerkorkeuksilla kuormakaaviolla **E4**.



Kuva 31. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla 1,5 m pengerkorkeudella.

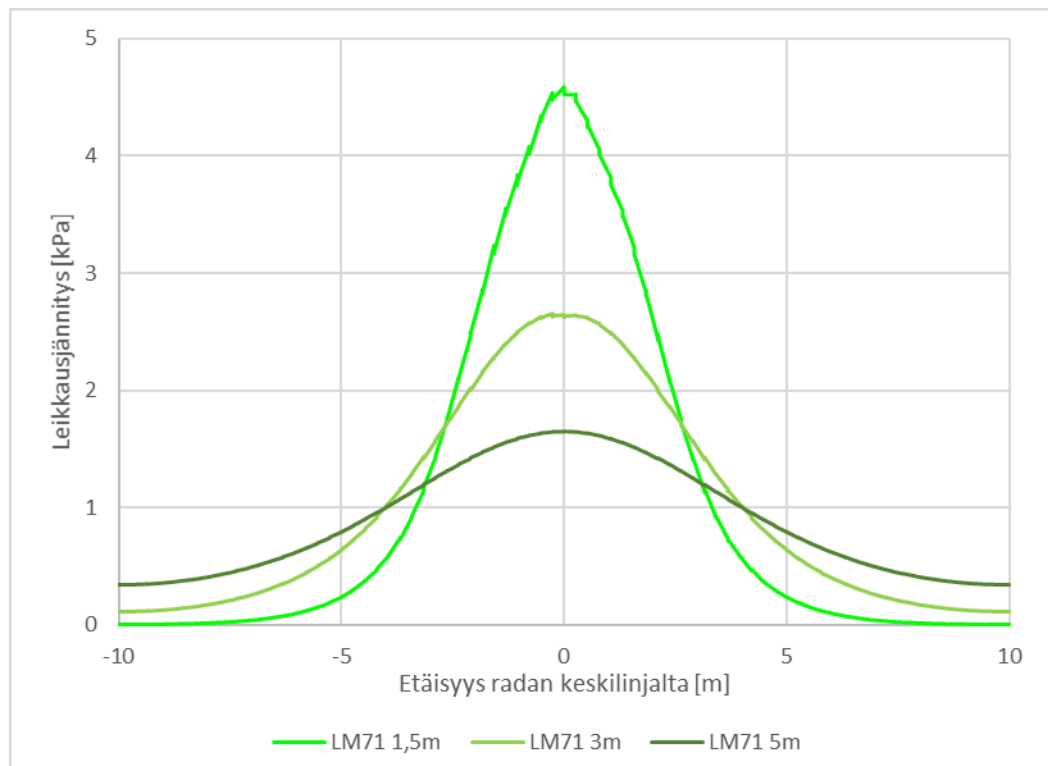


Kuva 32. Leikkausjännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla 3 m pengerkorkeudella.



Kuva 33. Leikkausjännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla 5 m pengerkorkeudella.

Kuvassa 34 radan pituussuuntainen leikkausjännitys laatan pinnassa on esitettyä radan poikkisuunnasta katsottuna. Laskentamallin kuormakaaviona oli LM71 nauha-kuormien kanssa



Kuva 34. Pituussuuntainen leikkausjännitys laatan pinnalla katsottuna radan poikkisuunnassa.

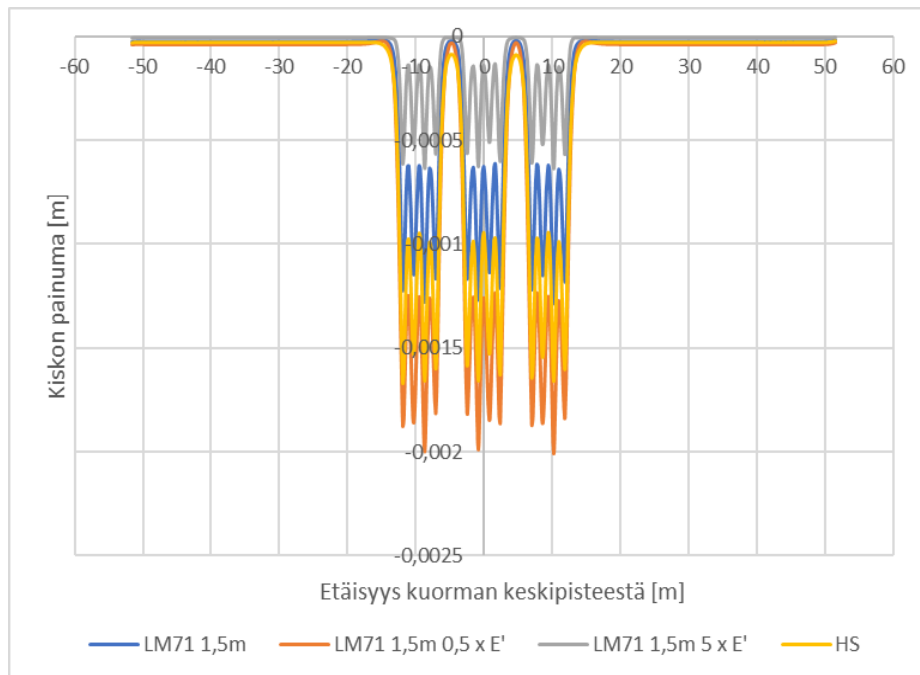
4.2.2 Maan jäykkyyden vaikutus tuloksiin

Maan jäykkyyden vaikutusta laskentatuloksiin tutkittiin mallilla, jossa laatta on 1,5 m syvyydessä. Kuormana on kuvan 18 mukainen kuormakaavio **LM71 Max**. Vertailulaskeumat tehtiin puolittamalla jäykköysarvot sekä viisinkertaistamalla maan jäykköysarvot. Vertailun vuoksi laskettiin myös HS-mallilla yksi kuormituskerta.

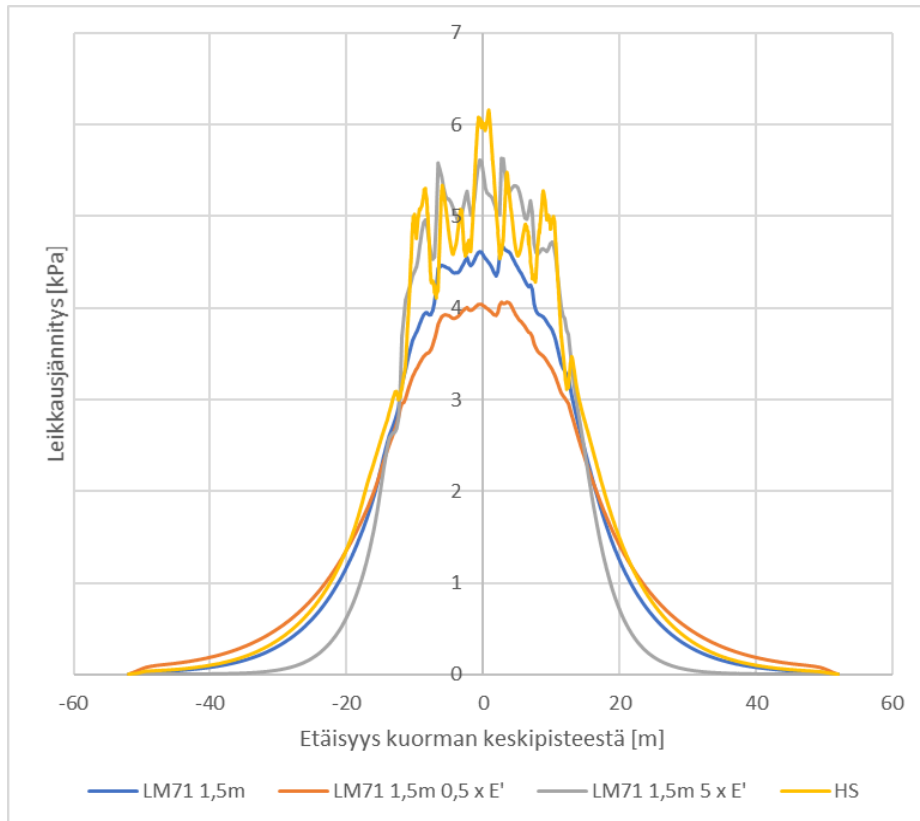
Taulukko 8. Vertailussa käytetyt jäykkyysarvot.

	Kimmoparametri	Tukikerros [kN/m ²]	Väli- ja eristyskerros [kN/m ²]
Alkuperäiset jäykkyysarvot	E'	173 500	108 400
	G	70 720	44 200
	E _{oed}	200000	125000
Puolitetut jäykkyysarvot	0,5*E'	86 750	54 200
	0,5*G	35 360	22 100
	0,5*E _{oed}	100000	62500
Viisinkertaiset jäykkyysarvot	5*E'	867 500	542 000
	5*G	353 600	221 000
	5*E _{oed}	1 000 000	625 000
Vertailuarvot HS-malli	E ₅₀	250 000	150 000
	E _{oed}	200 000	130 000
	E _{ur}	500 000	450 000

Kuvissa 35 ja 36 on esitetty MC-malliin syötettyjen eri jäykkyysarvojen ja HS-mallin vaikutukset kiskon painumaan ja leikkausjännitykseen laatan pinnassa.



Kuva 35. Kiskon pystysuuntainen siirtymä metreissä (LM71 Max).



Kuva 36. Pituussuuntainen leikkausjännitys laatan pinnalla. Leikkaus keskellä laat-
taa (LM71 Max).

Tuloksista nähdään, että suurin leikkausjännityksen arvo saadaan HS-mallilla, kun taas pienin arvo saadaan puolitetuilla MC-mallin jäykkyyksiarvoilla. Tulosten perusteella päätettiin tarkastella maan jäykkyyksiparametreja tarkemmin seuraavassa vaiheessa.

4.3 Osio 1 - Kolmas laskenta

Kolmatta laskentaa varten mallin parametreja tarkennettiin ja kuormakaavion LM71 nauhakuorman pituutta muutettiin. Tavoitteena oli löytää maksimiarvot kokonaisjäykkyydelle, joten radan rakennekerrosten parametrit valittiin siten, että ne olisivat mahdollisimman jäykkien materiaalien mukaisia.

Välikerroksen soralle oletettiin parametrit, jotka on esitetty taulukossa 9 Haredning soil -mallina. Tukikerroksen HS-mallin parametreina käytettiin Liikenneviraston ohjeessa 28/2017 (Kalliainen & Kolisoja, s. 16) esitettyjä parametreja.

Taulukko 9. Radan rakennekerrosten parametrit HS-mallilla.

	E_{50} (MPa)	E_{oed} (MPa)	E_{ur} (MPa)	m	c	ϕ'	ψ	K_o	ν_{ur}
Väli- ja eristyskerros, sora	200	190	400	0,5	10	42	5	0,347	0,3
Tukikerros	275	230	550	0,5	20	45	10	0,3	0,2

Taulukossa 10 on esitettyä Hardening soil -materiaaliparametrit käännettynä Mohr Coulomb -mallin parametreiksi. Hardening soil -parametrit muunnettiin ensin sopivaksi Mohr Coulomb -mallille ja sen jälkeen arvot sovitettiin vielä murskeelle käyttämällä 30 % korkeampia arvoja. Laskennoissa käytettiin väli- ja eristyskerroksen materiaalina murskettä.

Taulukko 10. Radan rakennekerrosten parametrit Mohr Coulomb -mallilla.

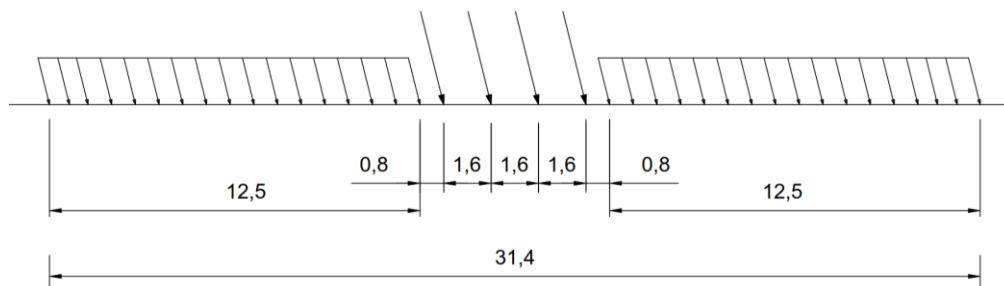
	E (MPa)	G (MPa)	E _{oed} (MPa)	v _{nu}
Väli-eristyskerros, sora	230	88,5	309,6	0,3
Väli-eristyskerros, murske	299	115	402,5	0,3
Tukikerros	340	130,8	457,7	0,3

Parametrien muunnos HS-mallista Mohr Coulomb -malliin tehtiin Plaxiksen avulla. Maakerroksille syötettiin ensin HS-mallin mukaiset parametrit, jonka jälkeen materiaalimalliksi valittiin Mohr Coulomb. Plaxis kääntää tällöin automaattisesti arvot Mohr Coulomb -mallin parametreiksi, mutta Poissonin luvun (v_{nu}) arvoksi tulee nolla. Poissonin luvun arvoksi muutettiin 0,3 ja E_{oed} arvo pidettiin samana, jolloin parametrien E ja G arvot muuttuivat vastaaviksi.

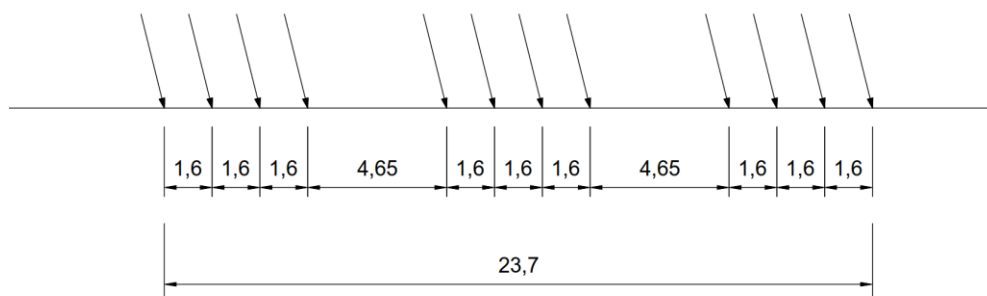
Nauhakuormaa pidennettiin laskentamallissa niin, että yhden nauhakuorman kokonaisvaikutus oli sama kuin yhden akseliryhmän, eli pystysuunnassa 1000 kN ja vaakasuunnassa 250 kN. Yhden nauhakuorman pituudeksi tuli tällöin 12,5 m.

4.3.1 Kolmannen laskennan kuormakaaviot

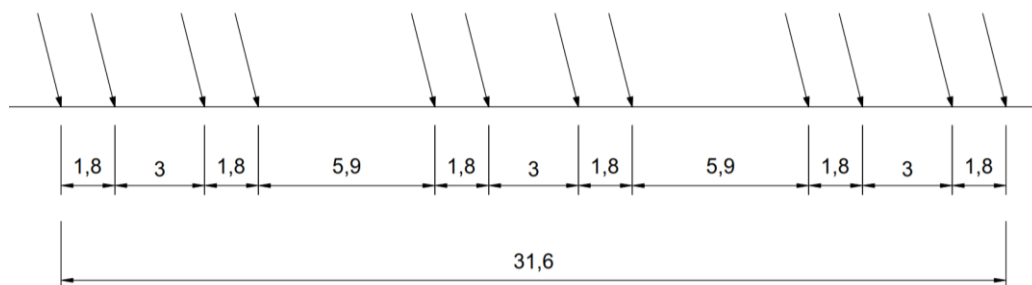
Laskennassa käytetyt kuormakaaviot ovat LM71, LM71 MAX ja E4, jotka on esitetty kuvissa 37 ... 39. Kuvateksteissä esitetyt metrikohtaiset arvot on laskettu olettamalla, että kuormat jatkuvat äärettömän pitkänä.



Kuva 37. Kuormakaavion LM71 mukaisesti mallinnetut kuormat kolmannessa laskentavaiheessa (pystykuorma 3000 kN/lähenee 80 kN/m äärettömän pitkänä, vaakakuorma 750 kN / lähenee 20 kN/m äärettömän pitkänä).



Kuva 38. Kuormakaavion LM71 MAX mukaisesti mallinnetut kuormat kolmannessa laskentavaiheessa (pystykuorma 3000 kN / 105,8 kN/m, vaakakuorma 750 kN / 26,5 kN/m). HUOM. Metrikuormia laskettaessa on kuorman pituuteen lisättävä 4,65 m jotta saavutetaan sama jako pistekuormien välillä.



Kuva 39. Kuormakaavion E4 mukaisesti mallinnetut kuormat kolmannessa laskentavaiheessa (pystykuorma 3000 kN/80 kN/m, vaakakuorma 750 kN/20 kN/m). HUOM. Metrikuormia laskettaessa on kuorman pituuteen lisättävä 5,9 m jotta saavutetaan sama jako pistekuormien välillä.

4.3.2 Kolmannen laskennan tulokset

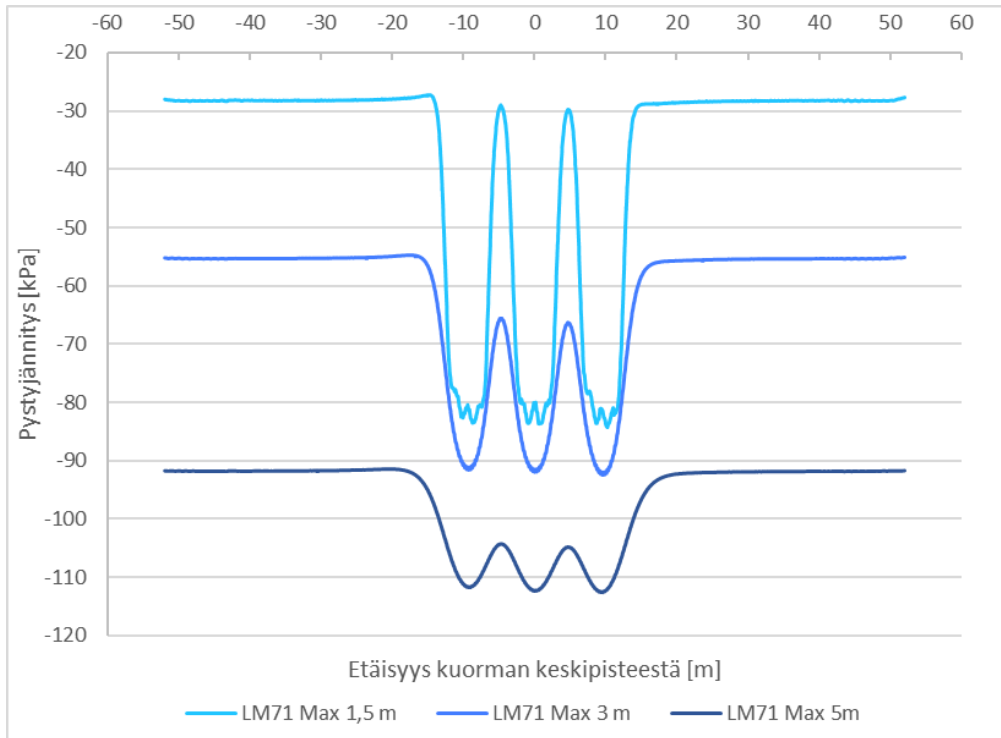
Alla esitetyt kuvaat 40...51 ovat kaikki pituusleikkauksia laatan keskilinjaa pitkin. Kuvassa 34 on esitetty poikkileikkaus laatan keskikohdalla kuorman alla. Kuvalla 34 halutaan esittää periaate minkä muotoisena vaakakuorman aiheuttama pituussuuntainen leikkausjännitys laatan pinnalla pienenee, kun siirrytään lähemmäs laatan reunoja. Huippuarvon kohdalla kuorman alla muutos on jyrkintä. Kauempana kuormasta muutos laatan poikkisuunnassa on loivempaa.

Kuvista 40...45 nähdään, miten pystyjännitys laatan pinnalla vaihtelee eri pengerkorkeuksilla ja kuormakaavioilla. Korkeammalla penkereellä maan painon aiheuttama jännitys on suurempaa kuin pienemmillä penkereillä ja kuorman aiheuttama jännityksen kasvu on pienempää.

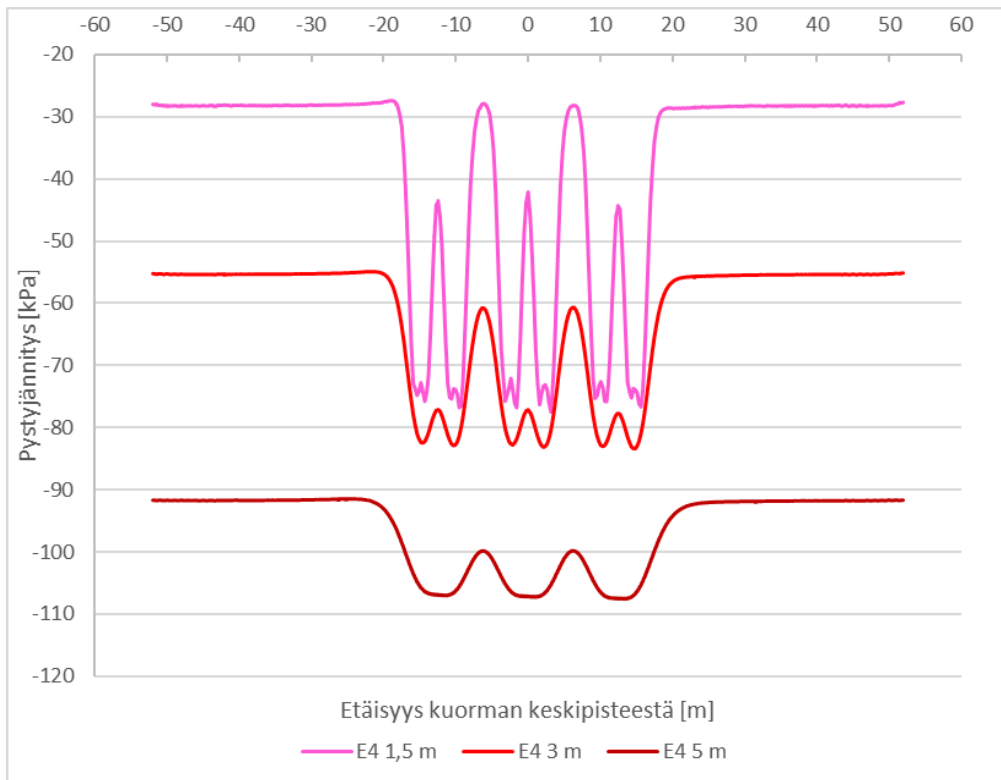
Kuormakaavion E4 pidempi väli pistekuormien välissä aiheuttaa pienempiä maksimijännityksiä kuin muilla kuormakaavioilla ja sen vaikutus ulottuu pidemmälle laatan pituussuunnassa.

LM71 MAX ja LM71 kaavioissa akseliryhmät ovat identtiset, joten vaikutus laatan pinnassa akseliryhmän alla on sama. Koska resultantit myös ovat samat pitää viivakuorman vaikutus akseliryhmien välissä sekä viivakuorman pituus vastata akseliryhmien aiheuttamia huippuja. Tämä näkyy selvästi kuvassa 43. LM71 kuormakaavion viivakuormat alkavat niin lähellä akseliryhmää, että kolmen ja viiden metrin syvyydellä ne

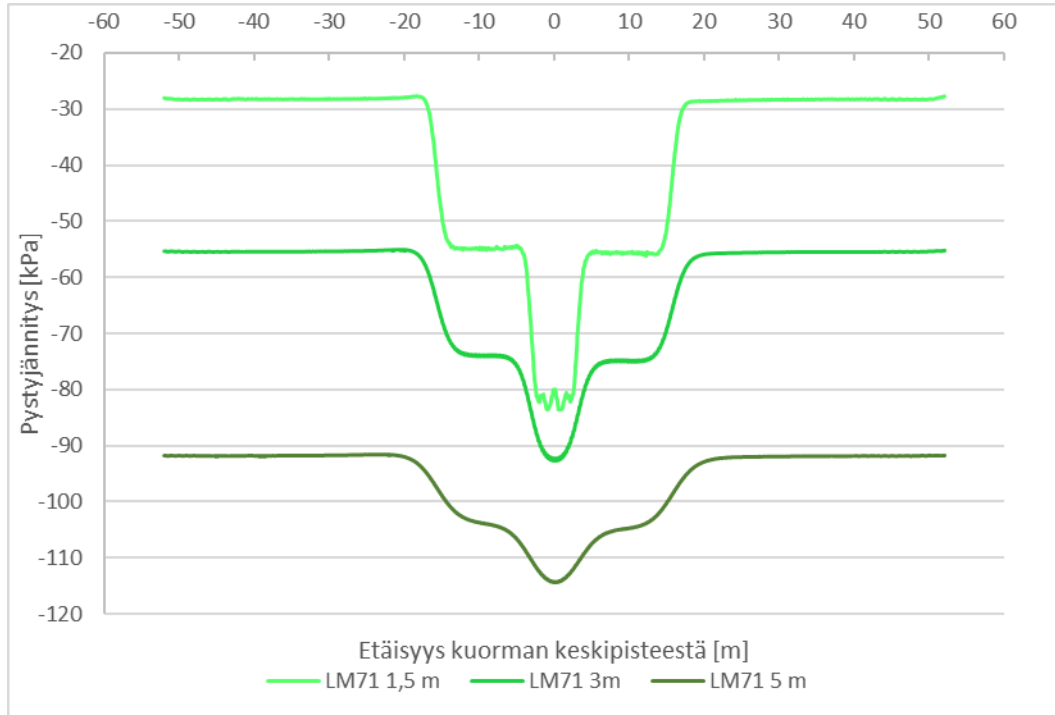
nostavat huippuarvoa akseliryhmän alla. Näiden laskentatulosten perusteella voidaan todeta, että LM71 kuormakaavio soveltuu käytettäväksi ainoastaan alle 1,5 m penkereillä, kun lasketaan junan aiheuttamaa pystyjännitystä laatan pinnassa.



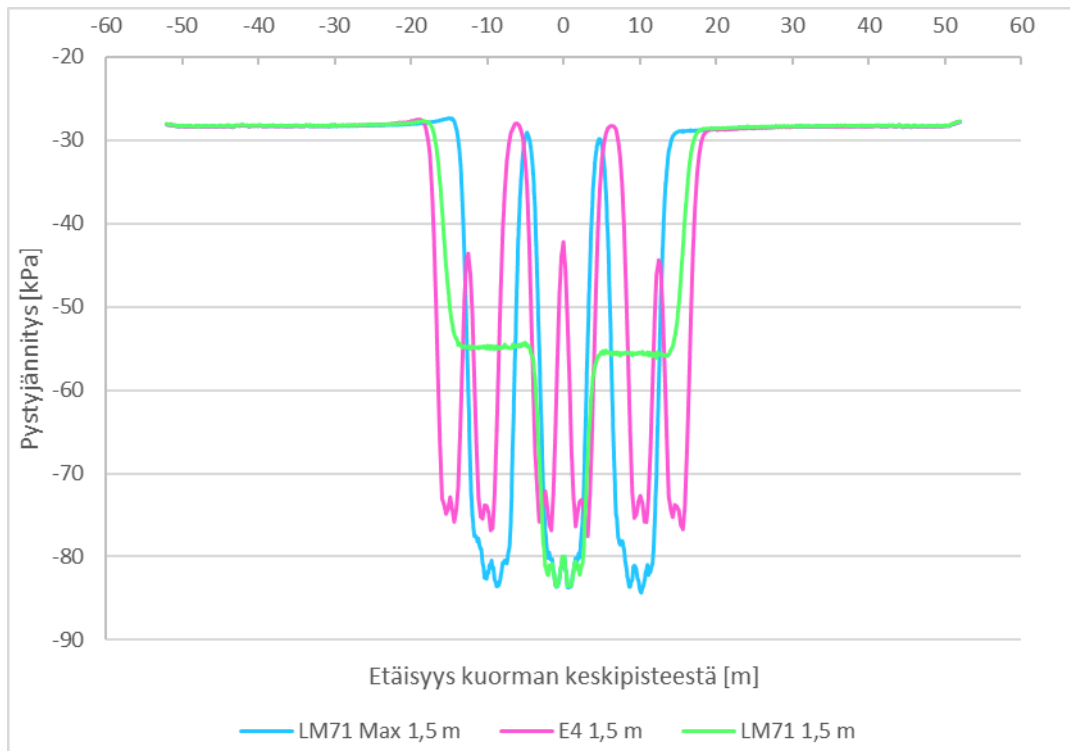
Kuva 40. Pystysuuntainenjännitys laatan pinnalla kuormakaaviolla **LM71 Max** eri pengerkorkeuksilla.



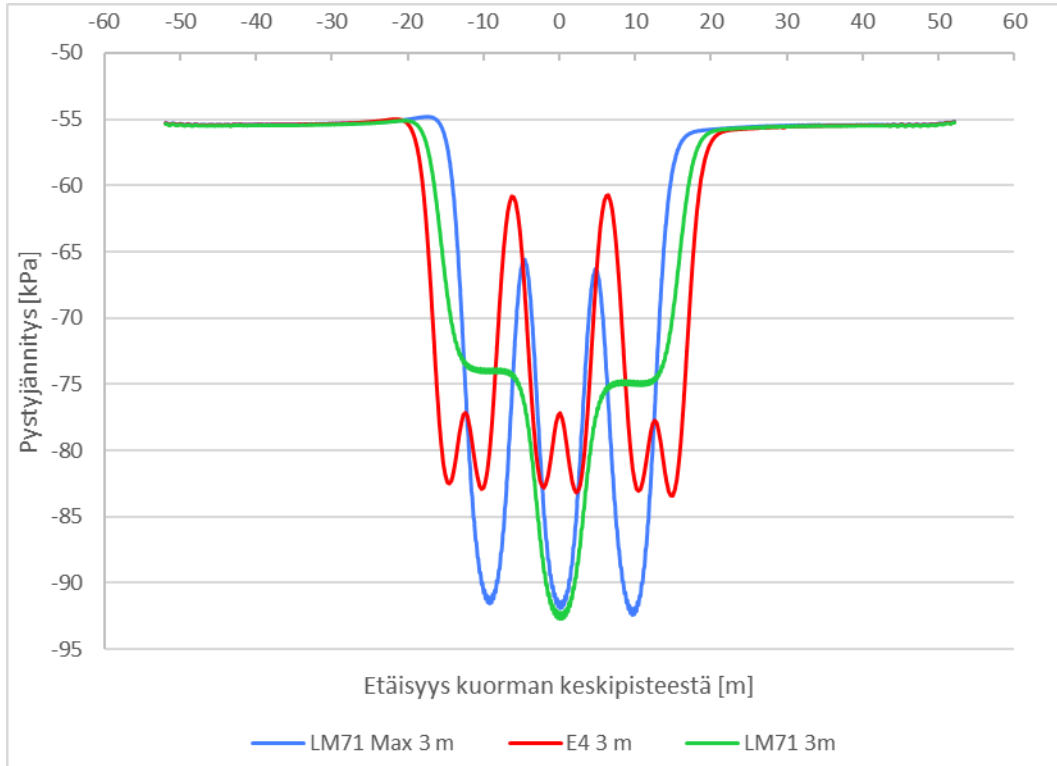
Kuva 41. Pystysuuntainenjännitys laatan pinnalla kuormakaaviolla **E4** eri pengerkorkeuksilla.



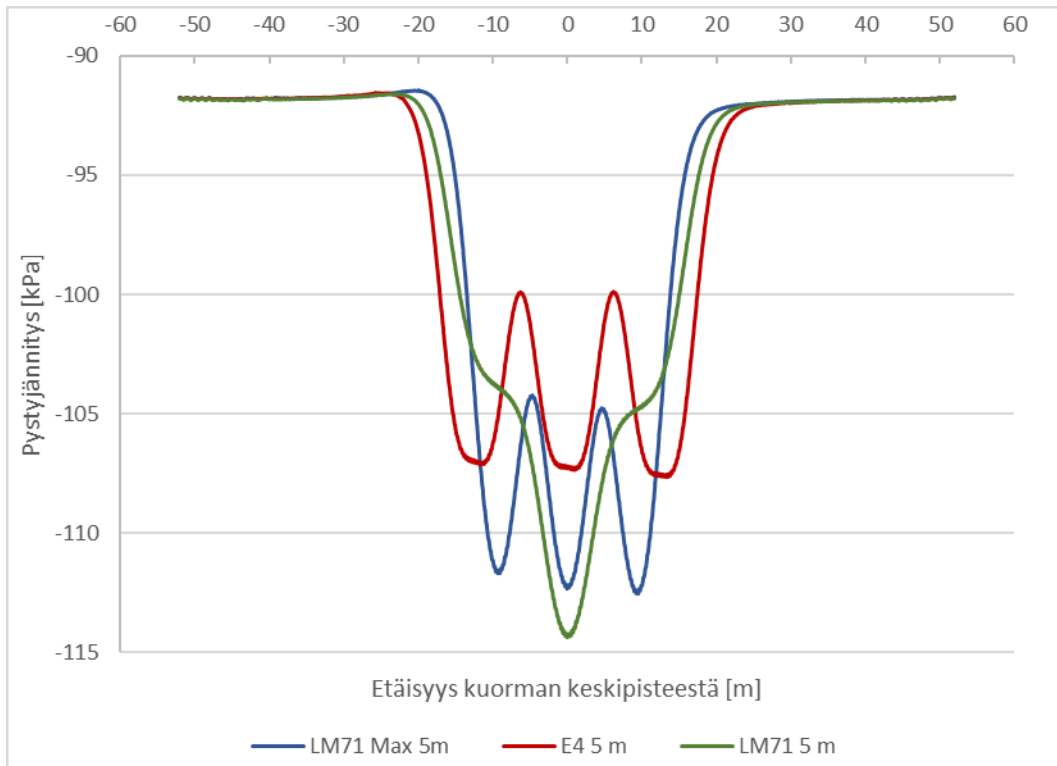
Kuva 42. Pystysuuntainen jännitys laatan pinnalla kuormakaaviolla **LM71** nauha-kuormien kanssa eri pengerkorkeuksilla.



Kuva 43. Pystysuuntainen jännitys laatan pinnalla eri kuormakaaviolla 1,5 m pengerkorkeudella.



Kuva 44. Pystysuuntainen jännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla 3 m penkerkorkeudella.

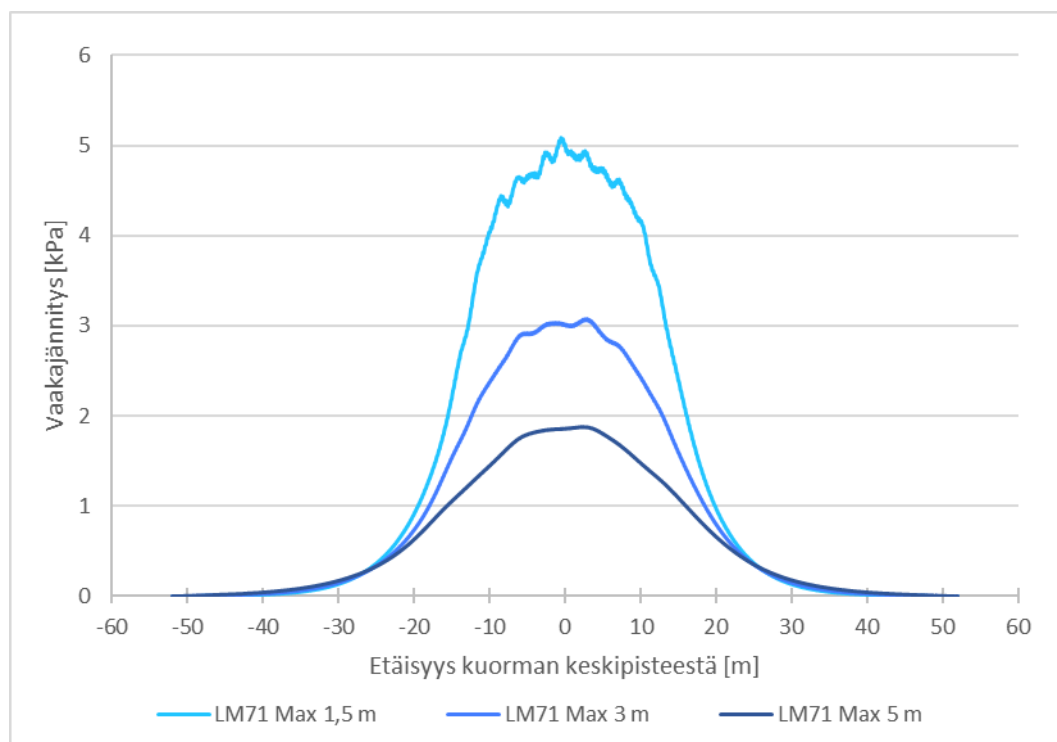


Kuva 45. Pystysuuntainen jännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla 5 m penkerkorkeudella.

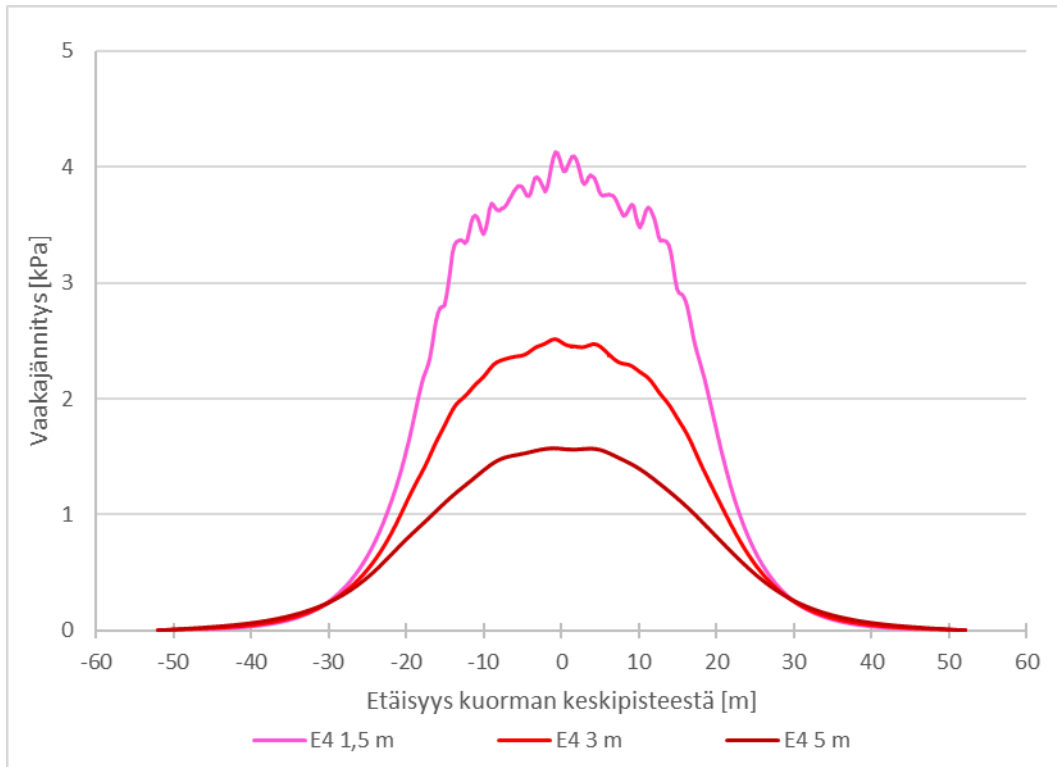
Kuvissa 46 ... 51 nähdään leikkauskuvaajat vaakajännityksestä laatan pituussuunnassa keskellä laattaa. Kuvissa 46...48 on esitetty sama data kuin kuvissa 49...51. Kuvissa 46...48 data on ryhmitetty kuorman mukaisesti ja kuvissa 49...51 pengerkorkeuden mukaisesti.

Kuvista käy selvästi ilmi, että mallinnetun kuorman kokonaispituus vaikuttaa oleellisesti kuorman vaakakomponentin aiheuttamaan pituussuuntaiseen leikkausjännityksen huippuarvoon. E4 on hieman pidempi kuin LM71 ja LM71 MAX.

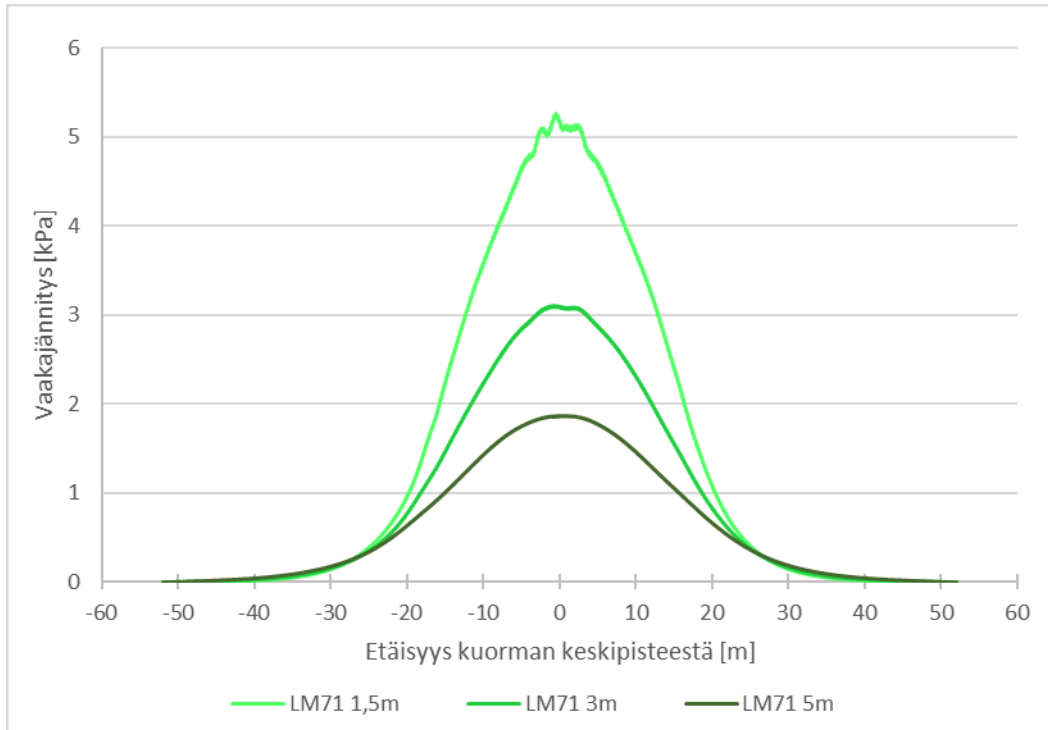
Resultantti on kaikissa tapauksissa sama. Pituussuuntainen vaikutus on lähestulkoon saman pituinen eri pengerkorkeuksilla. Leikkausjännityksen huippuarvo kuitenkin pienenee, kun laatta on korkeamman penkereen alla. Tämä selittyy sillä, että vaakakuorman vaikutus leviää leveämmälle laatan alueelle korkeammalla penkerellä.



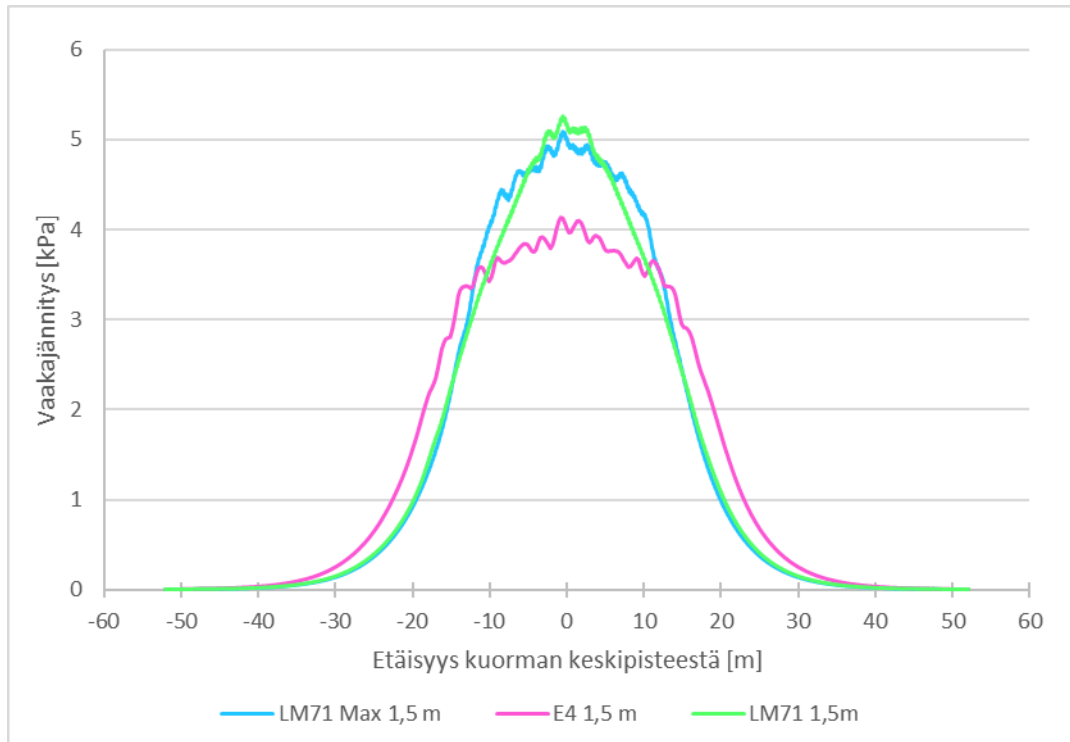
Kuva 46. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla kuormakaaviolla **LM71 Max** ja eri pengerkorkeuksilla.



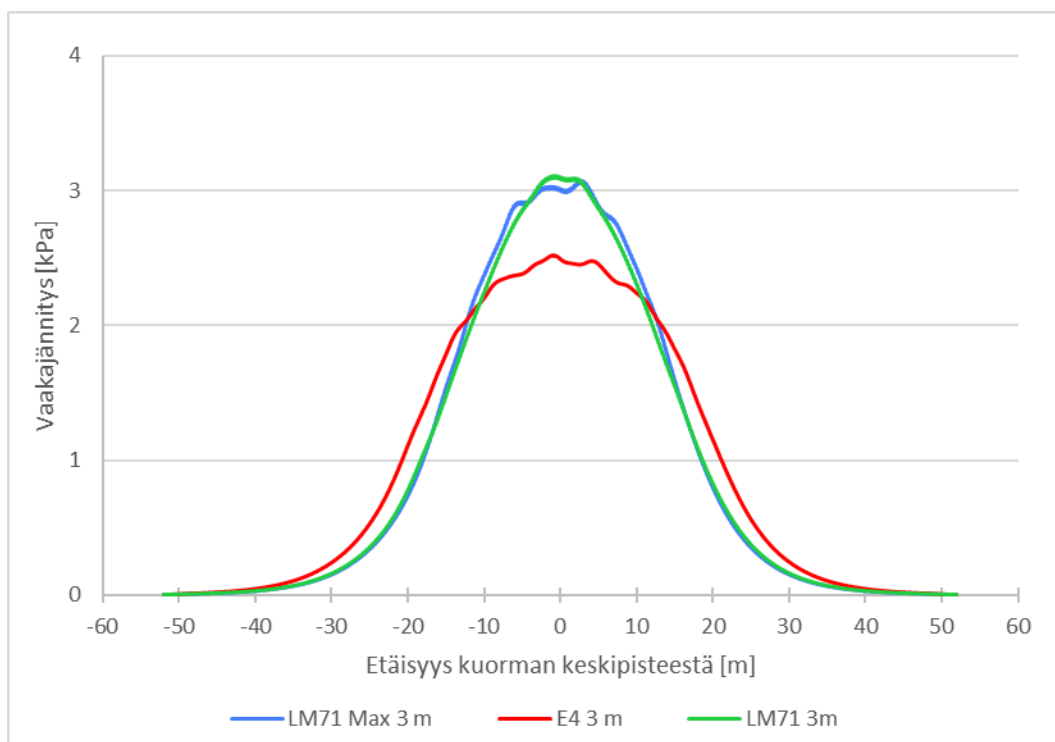
Kuva 47. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla kuormakaaviolla **E4** ja eri pengerkorkeuksilla.



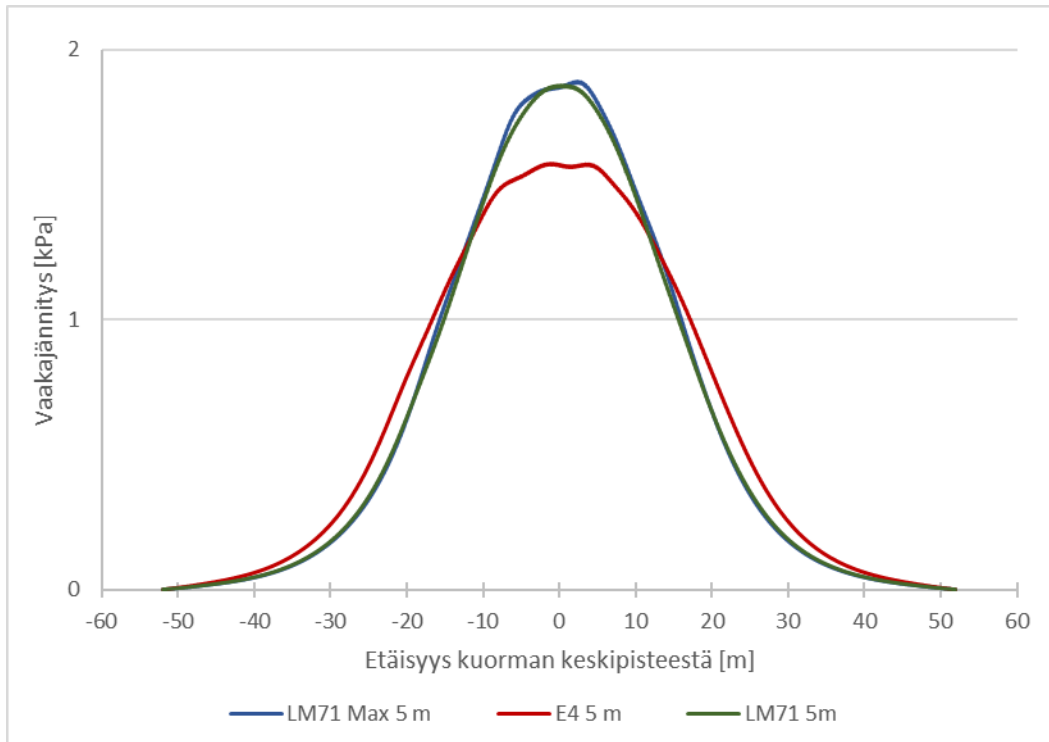
Kuva 48. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla kuormakaaviolla **LM71** nauhakuorman kanssa ja eri pengerkorkeuksilla.



Kuva 49. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla pengerkorkeudella 1,5 m.



Kuva 50. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla pengerkorkeudella 3 m.

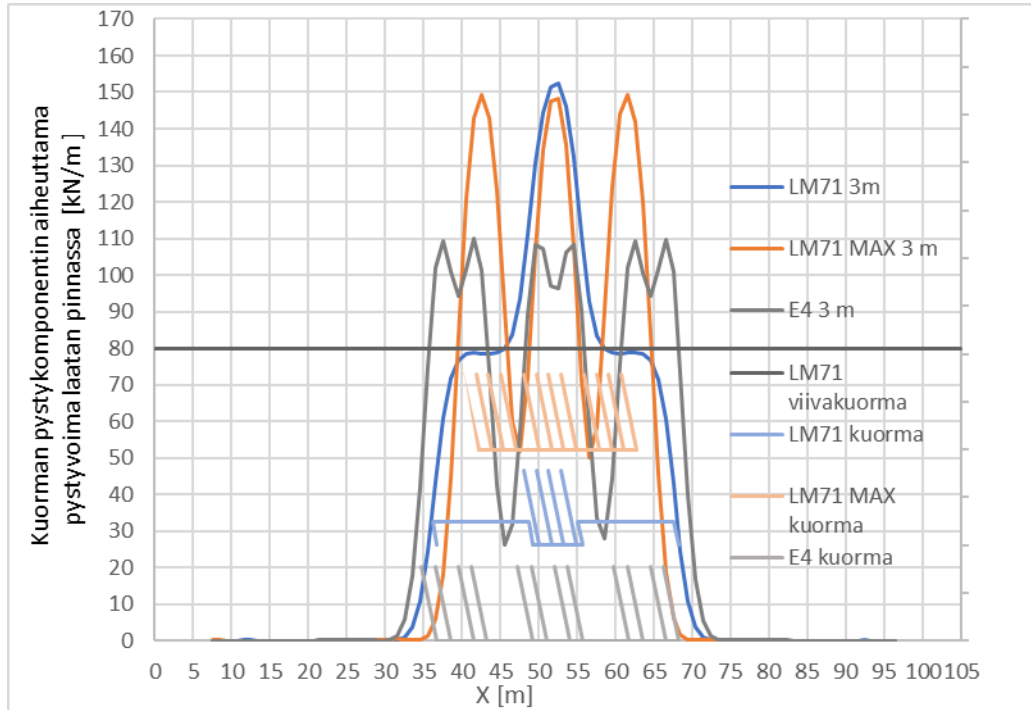


Kuva 51. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla eri kuormakaavioilla pengerkorkeudella 5 m.

Normaalijännityskuvaajat eivät juurikaan eroa edellisen laskennan (2) kuvaajista. Leikkausjännitys sen sijaan keskittyy lähemmäs kuormaa, jolloin huippuarvo myös kasvaa.

Tuloksia tarkasteltiin myös summaamalla jännitys laatan poikkisuunnassa metrin pituisissa kaistoissa, jolloin saatiin laskettua kuorman aiheuttama vaakavoima laatan pinnassa metriä kohden. Erot tarkastelluissa kuvaajissa eri pengerkorkeuksien välillä pienenivät, kun jännitys laatan poikkisuunnassa summattiin yhteen pituussuunnassa metrikohtaiseksi kuormaksi.

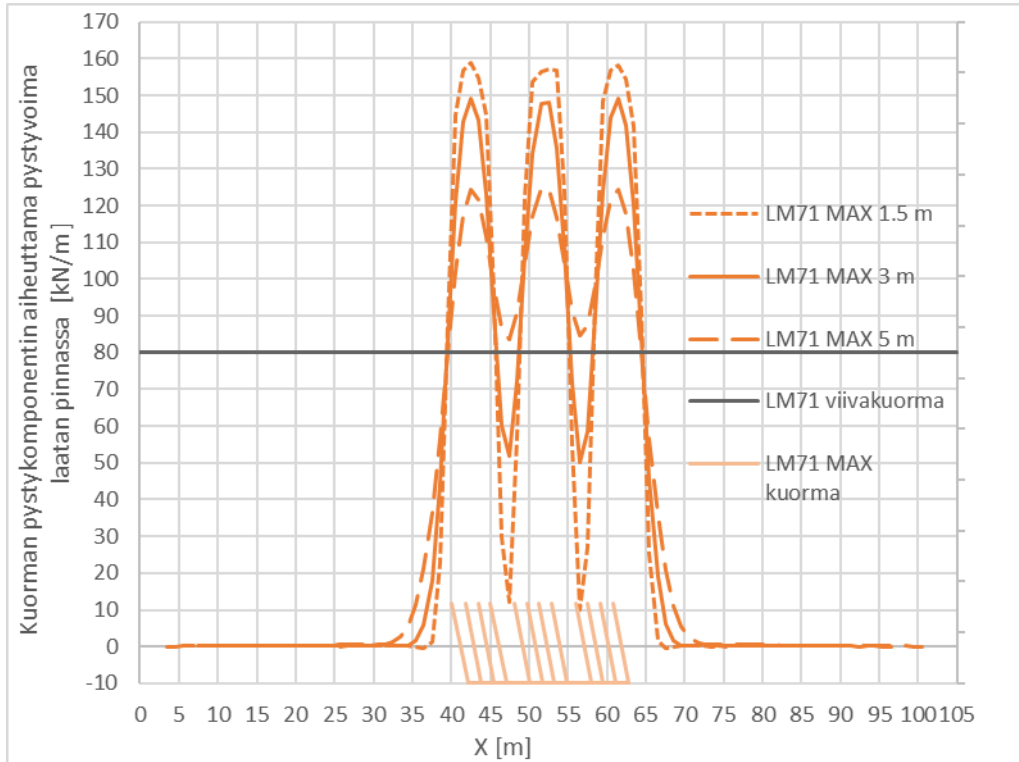
Kuvassa 52 on esitetty eri kuormakaavioiden aiheuttama pystykuorma kolmen metrin syvyydessä olevaan laattaan. Vertailun vuoksi kuvaan 52 on lisätty metrikohtainen pystykuorma 80 kN/m ja kuvaan 53 on lisätty EN 1991-2 mukaiset junan veto ja jarrukuormat. Vetokuorma on rajattu arvoon 1000 kN. Kun vetokuorman metriarvo on 33 kN/m, vaikutuspituus rataan on 30,3 m. Jarrukuorma on rajattu arvoon 6000 kN. Kun jarrukuorman metriarvo on 20 kN/m, vaikutuspituus rataan on 300 m. Mallin pituus on 104 m joten 20 kN/m arvo näkyy viivana koko kuvaajan läpi.



Kuva 52. Eri kuormakaavioiden mukaisten kuormien pystykomponenttien aiheuttama pystyvoima laatan pinnalla. Mallinnettujen kuormien geometria on esitetty; LM71 kuorma, LM71 MAX kuorma ja E4 kuorma. Katso myös kuvat 37, 38 ja 39.

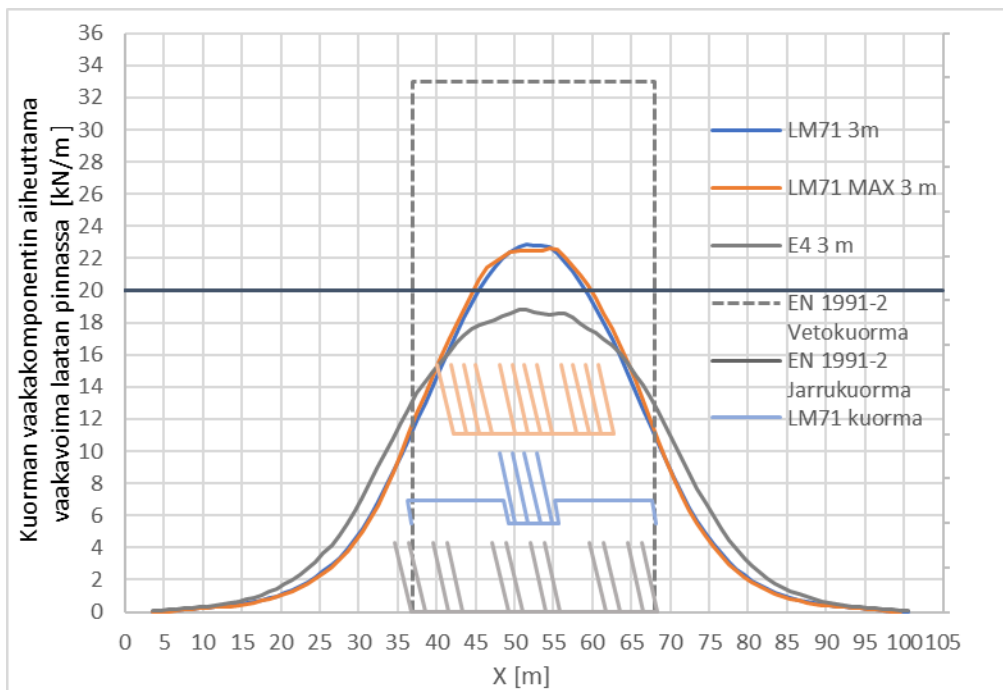
Kuvassa 53 on esitetty kuormakaavion LM 71 MAX aiheuttama pystykuorma puolen- toista, kolmen ja viiden metrin syvyydessä olevaan laattaan. Vertailun vuoksi kuvaa- jiin on myös lisätty LM71 mukainen junan pystysuuntainen viivakuorma (80 kN/m). Kuvasta nähdään, että E4 kuormakaavion pidempi akseliväli aikaansaa pienemmän pystykuorman huippuarvon. Lm71 kuormakaavion viivakuormat nostavat akseliryh- män aiheuttamaa pystykuorman huippuarvoa verrattuna kuormakaavioon LM71 MAX. Kuvasta nähdään, että huippuarvot akseliryhmien alla ovat sekä LM71 että E4 kuor- makaavioilla huomattavasti suuremmat kuin 80 kN/m. Kuvassa 53 on esitetty LM71 MAX kuormakaavion vastaavat tulokset eri pengerkorkeuksilla. Kuvasta nähdään, että 1,5 m syvyydellä akseliryhmien aiheuttama pystykuorma on jo lähes kaksinkertainen verrattuna arvoon 80 kN/m. Lm71 MAX on kalibroitu vastaamaan LM71 kuormakaavio- ta. Kuitenkin, kuten kuvasta 53 nähdään, jatkuvana kuormana LM71 MAX aiheuttaa suuremman kuorman kuin 80 kN/m. Kuvassa 53 viiden metrin syvyydessä pystyjänni- tyksen minimiarvo akseliryhmien välillä on jo noussut yli 80 kN/m. LM71 MAX vastaa- kin 105.8 kN/m kuormaa jatkuvana kuormana. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että LM71 MAX voidaan käyttää ainoastaan kolmen akseliryhmän pituisena kuormana, jos halutaan aikaansaada LM71 kuormaa vastaava vaikutus penkereillä, joiden paksuus on korkeintaan 1,5 m (koska syvemällä LM71 viivakuormat vaikuttavat pystykuor- maa nostavasti akseliryhmän alla).

Kuvassa 54 on esitetty eri kuormakaavioiden aiheuttama vaakavoima kolmen metrin syvyydessä olevaan laattaan. Kuvasta nähdään, että LM71 ja LM71 Max kuorma- kaavioilla laattaan kohdistuva voima metriä kohden on yli 20 kN/m.



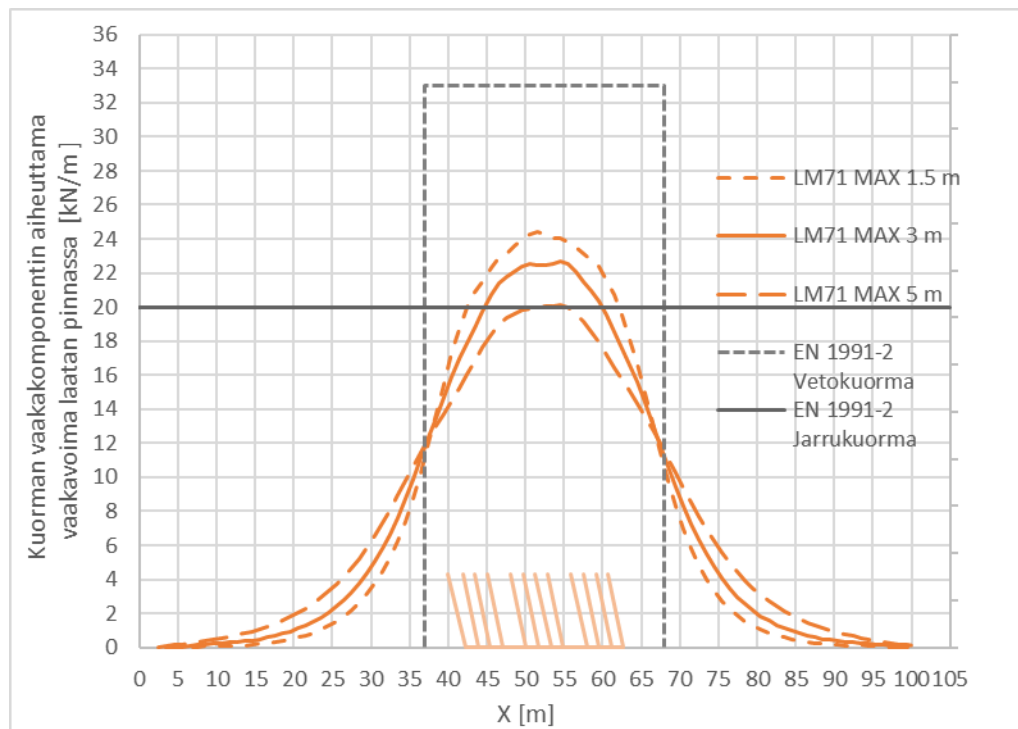
Kuva 53. Kuormakaavion LM71 Max mukaisten kuormien vaakakomponenttien aiheuttama vaakavoima laatan pinnalla. Kuorman geometria on esitettyä kuvaajassa. Katso myös kuva 38.

Tämä tarkoittaa, että viivakuormat ovat liian lähellä akseliryhmää sillä oletuksella, että jarruttavan junan aiheuttama vaakakuorma on 25 % pystykuormasta ja koska LM71 Max on kalibroitu vastaamaan LM71 kuormituskaaviota ovat myös LM71 Max akseliryhmät liian lähellä toisiaan. Jatkuvana kuormana LM71 Max olisi 26,5 kN/m.



Kuva 54. Eri kuormakaavioiden mukaisten kuormien vaakakomponenttien aiheuttama vaakavoima laatan pinnalla. Mallinnettujen kuormien geometria on esitetty; LM71 kuorma, LM71 MAX kuorma ja E4 kuorma.

Kuvassa 55 on esitetty kuormakaavion LM 71 MAX aiheuttama vaakavoima puolen- toista, kolmen ja viiden metrin syvyydessä olevaan laattaan.



Kuva 55. Kuormakaavion LM71 Max mukaisten kuormien vaakakomponenttien aiheuttama vaakavoima laatan pinnalla. Kuorman geometria on esitettyä kuvaajassa. Katso myös kuva 38. **HUOM! Rajallinen kuorma aiheuttaa jännitysjakautuman, joka jakautuu eri pengerkorkeuksilla eri pituuksille. Jatkuva samankokoinen kuorma johtaa samaan vaakakuormaan eri pengerkorkeuksilla.**

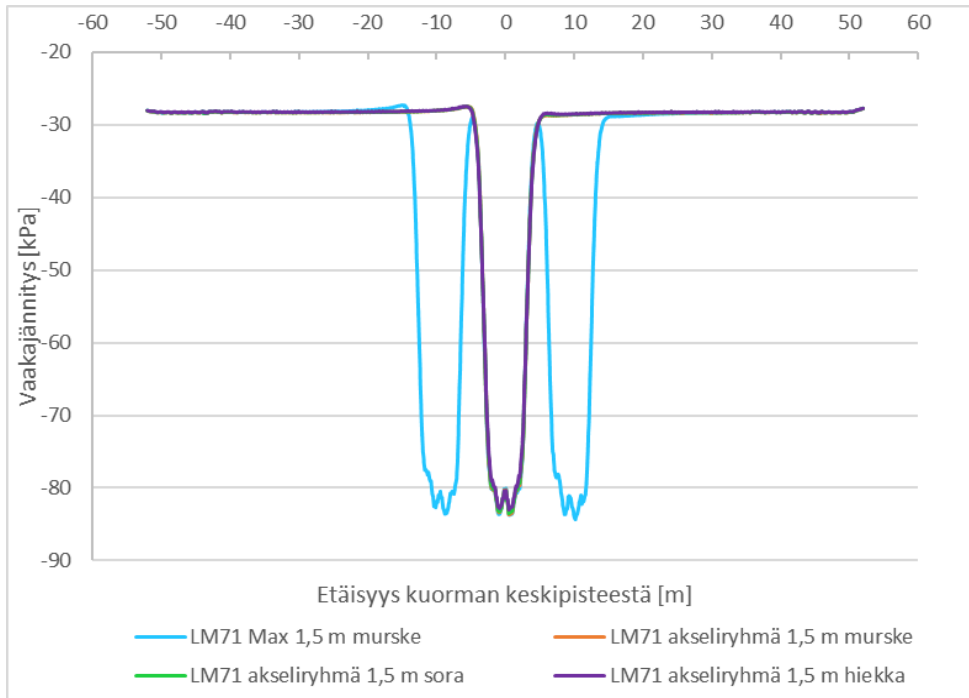
4.3.3 Herkkyystarkastelu

Herkkyystarkastelussa mallinnettiin väli- ja eristyskerros hiekkana sekä sorana. Tuki- kerroksen parametreina käytettiin samoja kuin kolmannessa laskennassa. Taulukossa 11 on esitetty tarkastelussa käytetyt parametrit hiekalle ja soralle.

Taulukko 11. Herkkyystarkastelussa käytetyt materiaaliparametrit.

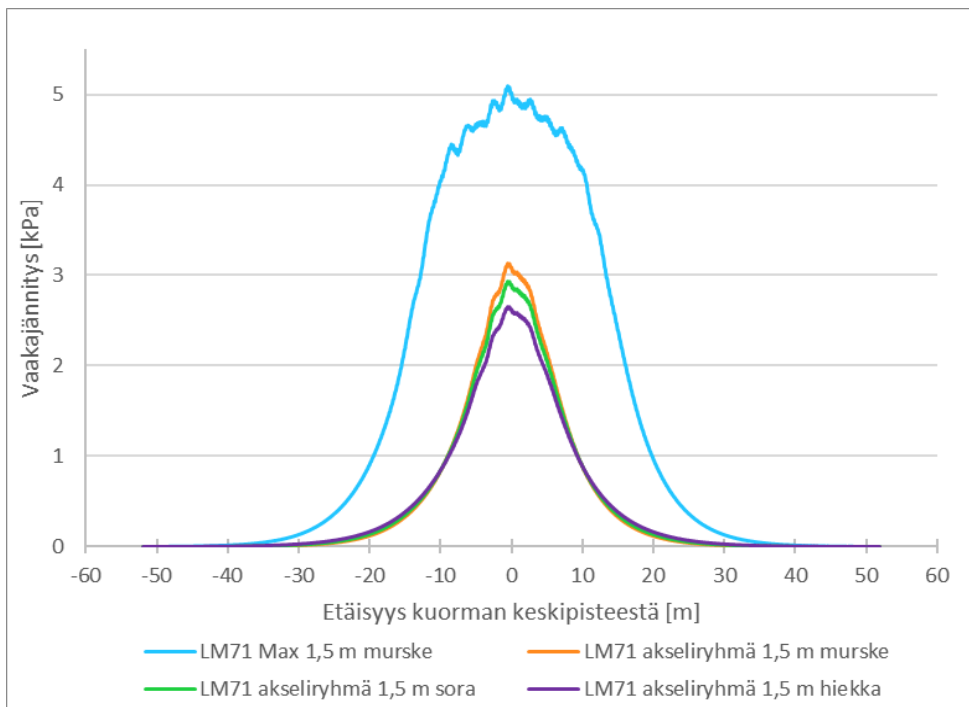
	E (MPa)	G (MPa)	E _{oed} (MPa)	v _{nu}
Väli- ja eristyskerros, sora	230	88,5	309,6	0,3
Väli- ja eristyskerros, hiekka	160	61,5	215,4	0,3

Herkkyystarkastelun laskennat tehtiin niin, että kuormaksi oli mallinnettu yksi LM71 akseliryhmä. Kuvissa 56 ja 57 on esitetty tulokset laatan pinnalla herkkyystarkastelun mukaisilla parametreilla sekä vertailun vuoksi LM71 Max kuormalla väli- ja eristyskerroksen ollessa mursketta.



Kuva 56. Normaalijännitys laatan pinnalla.

Kuvaajan perusteella väli- ja eristyskerroksen materiaali ei juurikaan vaikuta laatan pinnalle välittyvään normaalivoimaan. Myöskään akseliryhmien määrä ei vaikuta kuvaajan muotoon.

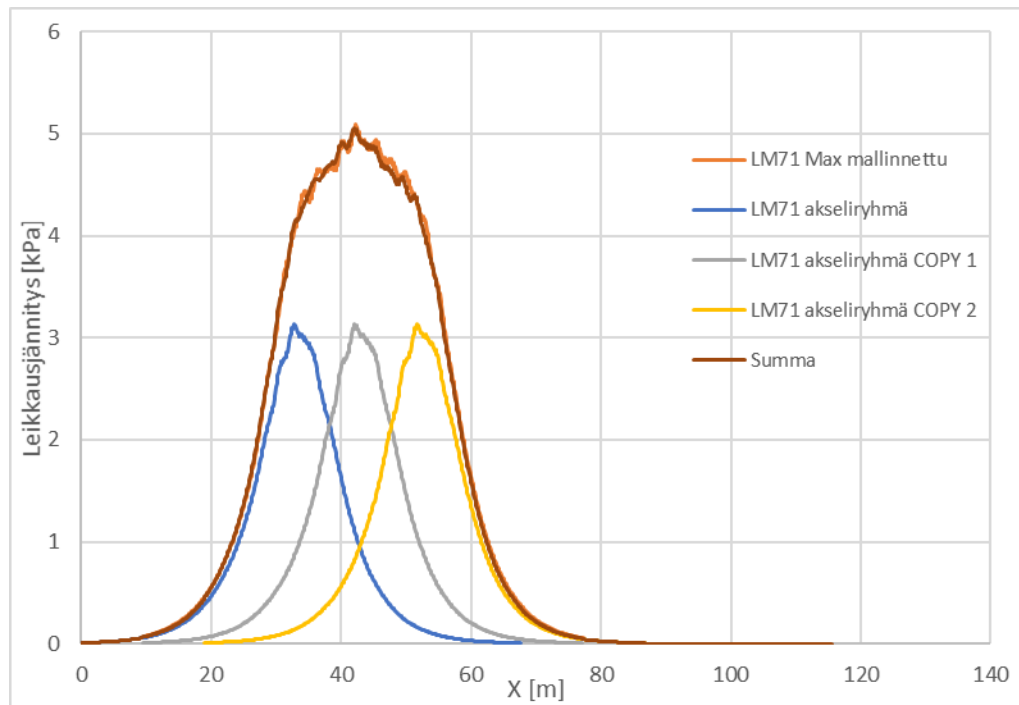


Kuva 57. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla.

Väli- ja eristyskerroksen materiaali vaikuttaa enemmän leikkausjännitykseen, kuten kuvaajasta voi havaita. Leikkausjännitys kasvaa kerrosmateriaalin jäykkyyden kasvaessa. Maksimiarvo soralla on noin 10 % isompi hiekalla ja maksimiarvo murskeella noin 18 % isompi kuin hiekalla, kun kuormitustapaus on LM71.

4.3.4 Superpositioperiaate

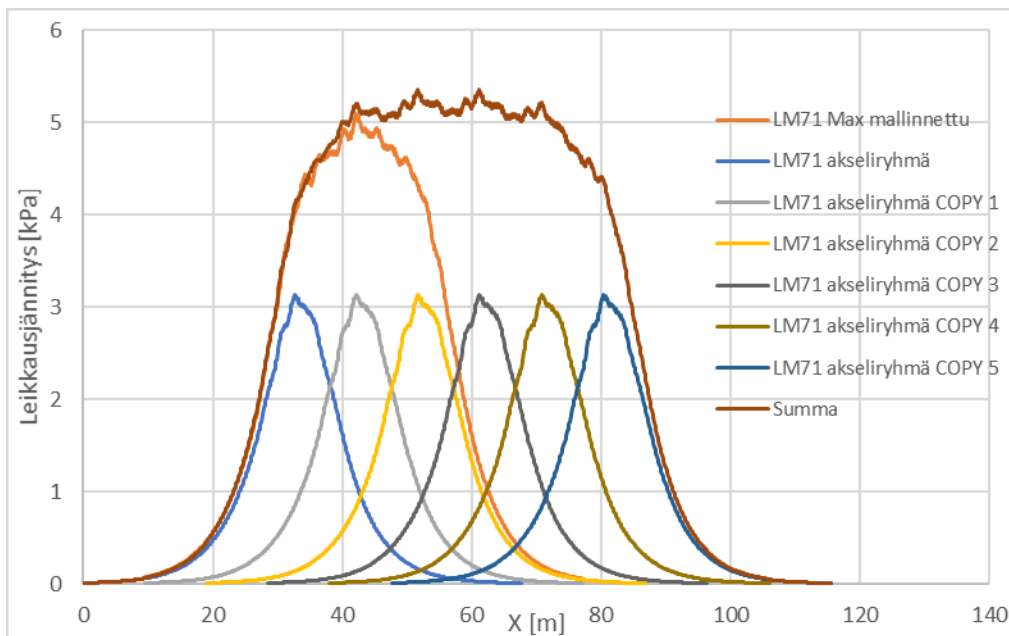
Yhden LM71 akseliryhmän leikkausjännitys kopioitiin LM71 Max -kuormakaavion mukaisesti 9,5 m toisistaan ja summattiin yhteen. Näin saatiin kuvaajassa 58 näkyvä punainen summakäyrä. Vertailuna on käytetty vastaavaa mallinnettua LM71 Max leikkausjännityskäyrää.



Kuva 58. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla mallinnettu kolmella akseliryhmällä (oranssi) ja kolmen yksittäisen akseliryhmän summa (ruskea).

Kuvaajasta nähdään, että summaamalla yksittäisen akseliryhmän leikkausjännitys laatan pinnassa päädytään samaan tulokseen kuin mallintamalla useita akseliryhmiä.

Kuvassa 59 on esitetty viiden LM71 akseliryhmän yhteisvaikutus superpositioperiaatteen avulla.

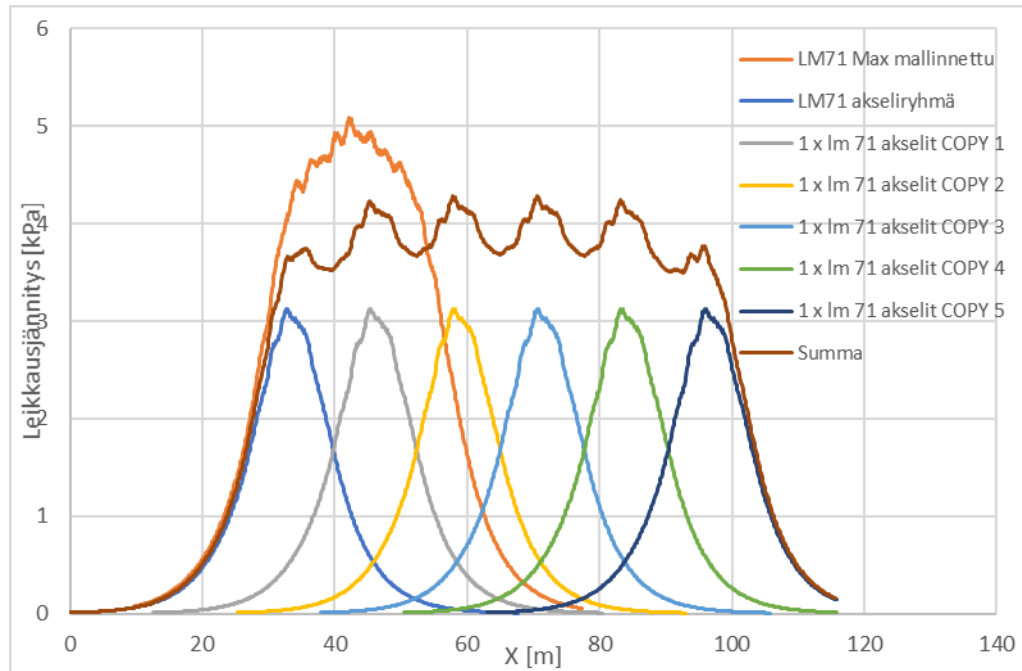


Kuva 59. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla mallinnettu kolmella akseliryhmällä (oranssi) ja kuuden yksittäisen akseliryhmän summa (ruskea).

Kuvaajan perusteella voidaan todeta, että jännityshuippu kasvaa noin 5%, kun tarkastellaan viiden akseliryhmän yhteisvaikutusta. Jatkuva LM71 MAX mukainen kuorma ei siis vastaa enää LM71 kuormituskaaviota.

Ainoastaan kolmen akseliryhmän kuormituskaavio (LM71 MAX) vastaa LM71 kuormituskaaviota. Tämä on odotettua, sillä kuormakaavion LM71 MAX akseliryhmien etäisyys toisistaan on **sovitettu niin**, että **vaikutus** rakenteeseen kohdistuviin **jännityksiin** olisi sama kuin kuormituskaaviolla LM71.

Sovittamalla LM71 akseliryhmien etäisyys LM71 kuormakaavion metrikuormaan (80kN/m) saadaan kuormakaavio LM71 E4. Tällöin akseliryhmien keskeltä keskelle etäisyys on 12.5 m ja saadaan kuvaajan 60 mukainen tulos.



Kuva 60. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnalla mallinnettu kuormakaaviolla LM71 MAX (oranssi) ja kuuden yksittäisen akseliryhmän summa (ruskea) LM71 E4 mukaisella geometrialla.

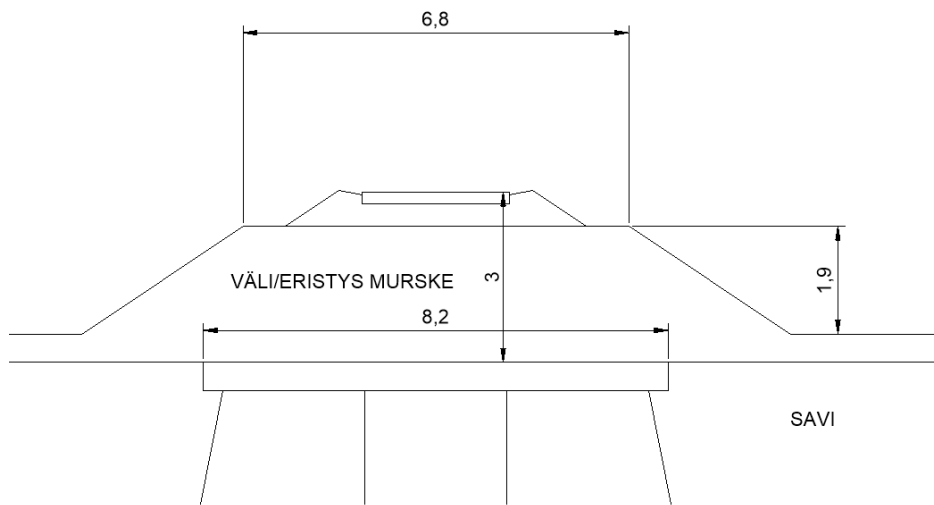
Kuvaajassa esitetty LM71 E4 kuormituksen mukainen jännityshuippu on noin 15 % pienempi kuin LM71 MAX kuormituskaaviolla laskettu.

4.4 Osio 2 - Neljäs laskenta

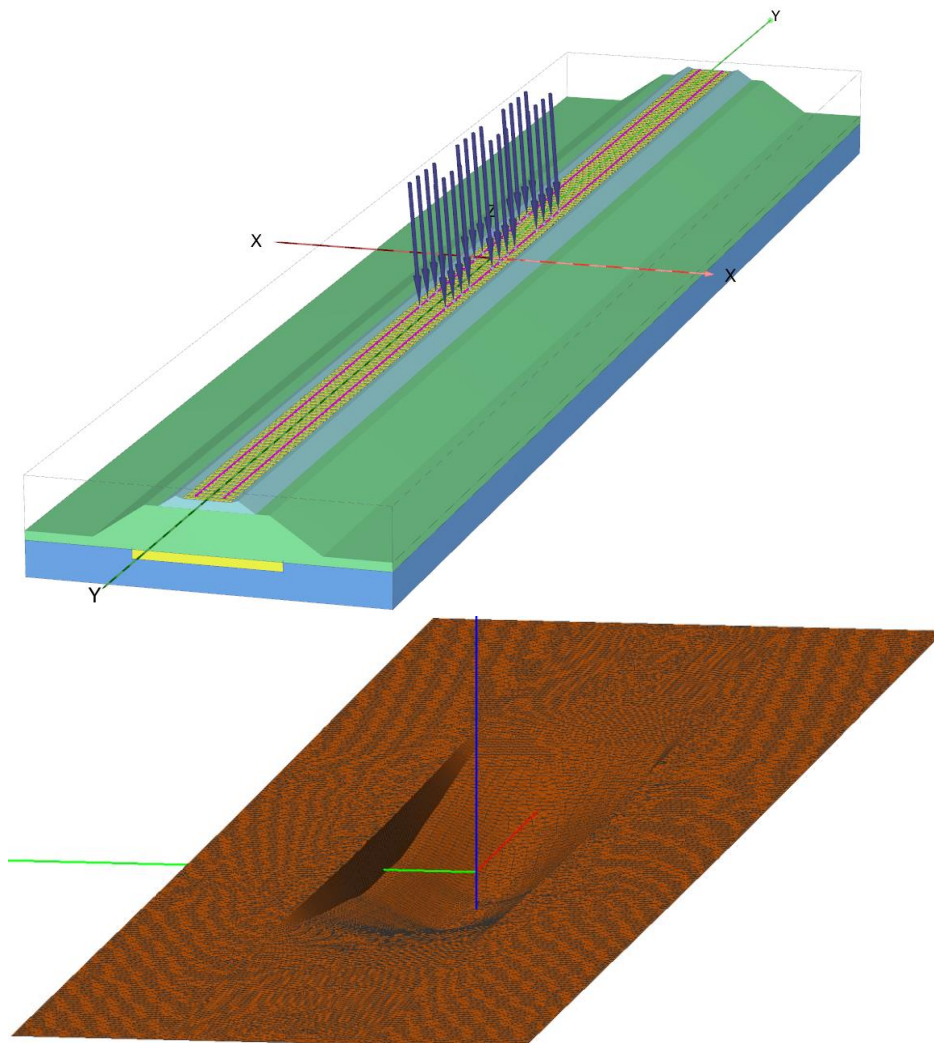
Neljännessä laskennassa tarkasteltiin kolmea erilaista tapausta. Ensimmäisessä tapauksessa paalulaatan leveyttä rajattiin mallin leveyssuunnassa ja tarkasteltiin, miten laatan pinnan leikkausjännitys eroaa edellisen laskennan tuloksista. Toisessa tapauksessa malliin lisättiin siirtymätön seinä mallin poikki, jonka etäisyyttä kuormasta vaihdeltiin. Tuloksista tarkasteltiin seinään kohdistuvaa normaalivoimaa. Kolmannessa tapauksessa mallista poistettiin kaikki rakenteet ja tarkasteltiin maassa vallitsevaa pystysuuntaista jännitystä ja verrattiin tätä laatan pintaan kohdistuvaan jännitykseen.

4.4.1 Laskenta poikkisuunnasta rajatulla laatan geometrialla

Laskentaan mallinnettiin paalulaatta kuvan 61 mittojen mukaisesti. Ote Plaxis-mallista on esitetty kuvassa 62. Laatan alla olevia paaluja ei ole mallinnettu, vaan laatta on lukittu alapinnastaan pystysuunnassa paikalleen.



Kuva 61. Neljännen laskentavaiheen mallin geometria.



Kuva 62. Ylempänä Plaxis 3D malli laskennassa neljä (kuormana LM 71 MAX). Alempana kuorman vaakakomponentin aiheuttama pituussuuntainen leikkausjännitys laatan yläpinnan tasossa kolmiulotteisena tulostuksena. Nähdään, että laatta jäykkänä rakenteena kerää kuorman, laatan reunan jälkeen jännitys tippuu välittömästi.

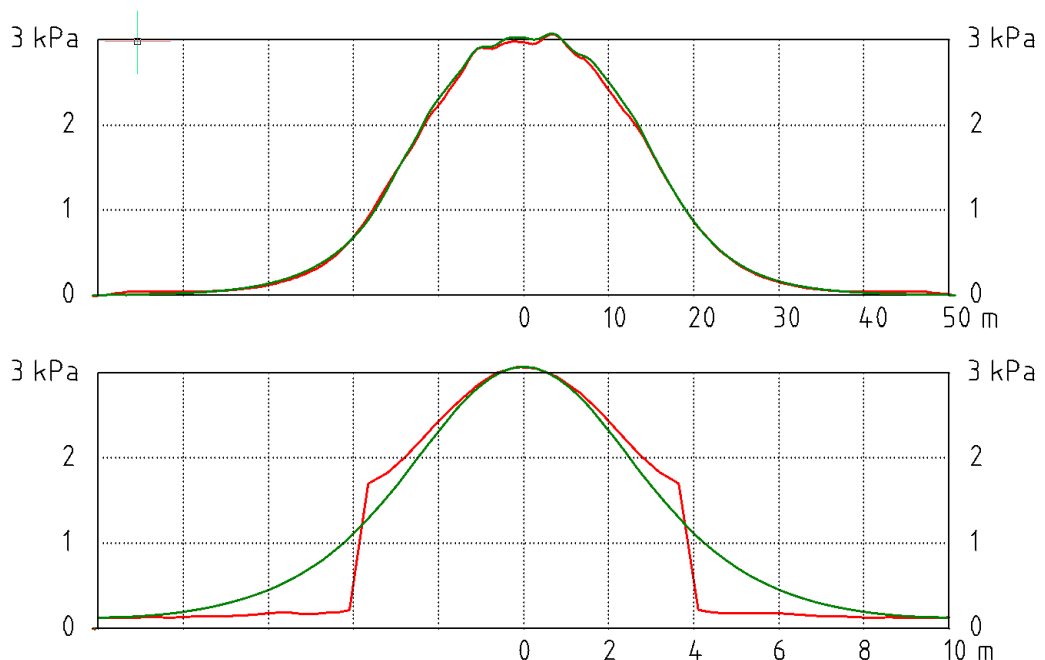
Penger ja 0,5 m paksuinen maakerros saven päällä mallinnettiin väli- ja eristyskerroksen murskeena samoilla parametreilla kuin laskennassa kolme. Tukikerros mallinnettiin samoilla maaparametreilla kuin laskennassa kolme. Eri maakerrosten parametrit on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Neljännessä laskennassa käytetyt maaparametrit.

	E (MPa)	G (MPa)	E _{oed} (MPa)	ν_{nu}	Su [kPa]
Väli- ja eristyskerros, murske	299	115	402,5	0,3	-
Tukikerros	340	130,8	457,7	0,3	-
Savi	10	3,34	338	0,495	20
Betoni	30000	12500	33333	0,2	-

Savi on mallinnettu Plaxis 3D:n Undrained (C) mallilla. Ohjelma ei tällöin rajoita saven tilavuudenmuutosta, jolloin parametreilla pitää varmistaa, että saven tilavuus ei muutu, ts. Poissonin luku on asetettava niin lähelle arvoa 0,5 kuin ohjelma sallii.

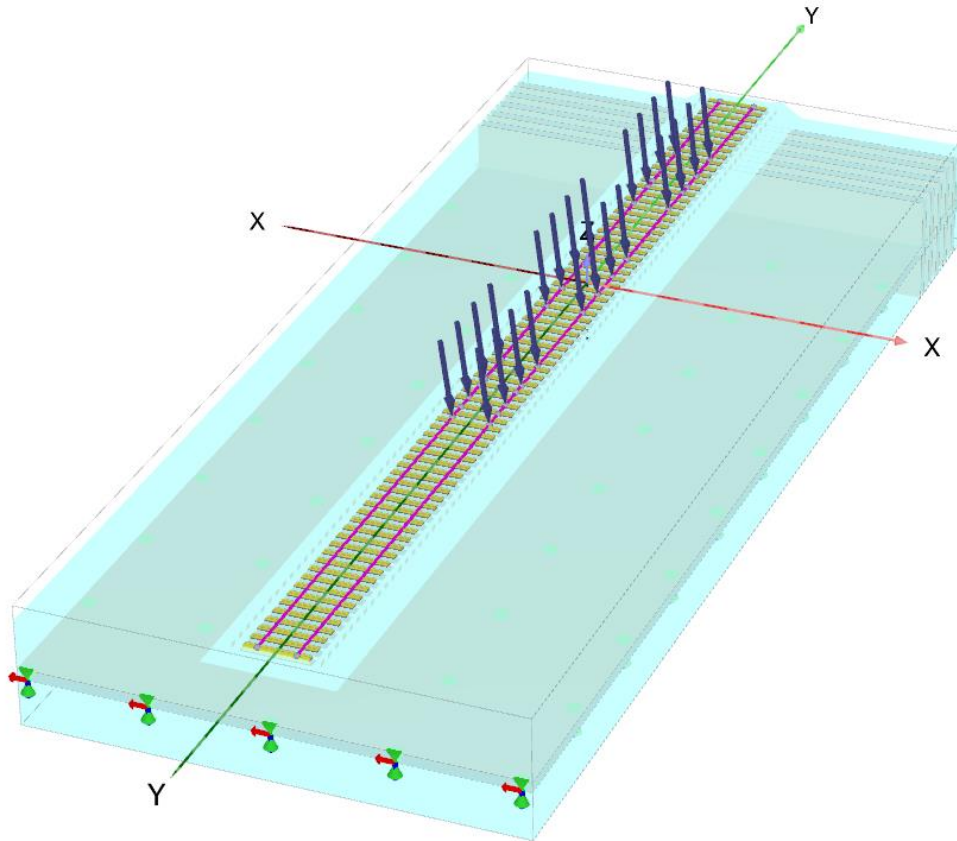
Kuvassa 63 on esitetty laskentatulokset, jossa pystyakselilla on vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan yläpinnan tasossa. Vaaka-akselilla on etäisyys kuorman keskipisteestä. Kuvasta nähdään, että kun laattaa kavennetaan, jännitys laatan reunalla nousee, verrattuna samaan pisteeseen koko mallin levyisellä laattalla. Laatta jäykkänä rakenteena kerää siis jännitykset. Tässä laatan pituus on edelleen koko mallin pituinen, joten pituussuunnassa tulos on identtinen edelliseen vaiheeseen.



Kuva 63. Kuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys laatan pinnan tasossa. Ylhäällä laatan pituussuunnassa ja alhaalla laatan poikkisuunnassa laatan keskikohdalla. Vihreä viiva on tulos edellisestä (3) laskennasta, jossa paalulaatta oli koko mallin levyinen. Punainen viiva on tulos, kun laattaa on kavennettu kuvan 61 mukaiseksi.

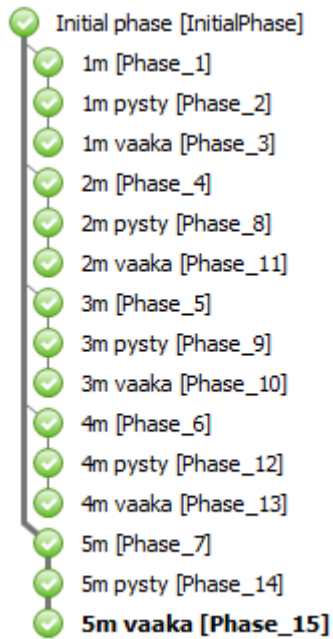
4.4.2 Laskenta radan poikkisuuntaisella seinällä

Paalulaatta oli mallissa kolmen metrin syvyydellä. **Siirtymätön** seinä mallinnettiin yhden, kahden, kolmen, neljän ja viiden metrin päähän reunimmaisesta kuormaparisista. Seinän yläreuna on tukikerroksen alapinnassa, eli siinä ei estä kiskojen eikä tukikerroksen liikettä eikä näin ollen myöskään kerää kuormaa niistä. Siirtymätön seinä kerää suurimman mahdollisen kuormasta aiheutuvan voiman joka kohdistuu seinään tukikerroksen alapuolisista rakenteista. Kuormana on LM71 MAX. Vaakakuormana käytettiin 25 % pystykuormasta. Geometrinen malli esitetty kuvassa 64.



Kuva 64. Plaxis 3D-malli radan poikkisuuntaisesti kulkevasta seinästä. Kuvan yläosassa näkyy poliläpinäkyvän maakerroksen läpi eri laskentavaiheiden tasot tai "seinät" joissa vaakasuuntainen siirtymä on estetty. Koko mallin kokoinen taso tai "paalulaatta" jossa pystysuuntainen siirtymä on estetty näkyy myös.

Laskenta tehtiin viidelle eri seinän etäisyydelle kuormalla LM71 Max. Jokaisessa laskenta suoritettiin a) ilman junakuormaa, b) ainoastaan pystysuuntaisella junakuormalla ja c) sekä pysty- että vaakasuuntaisella junakuormalla. Kun laskennan c tuloksista vähennettiin laskennan b tulokset, saatiin vaakakuormasta aiheutuva normaalijännitys seinän pinnalla. Kun laskennan b tuloksista vähennettiin laskennan a tulokset, saatiin pystykuorman aiheuttama normaalijännitys seinän pinnalla. Plaxikseen syötetyt laskentavaiheet on esitetty kuvassa 65.



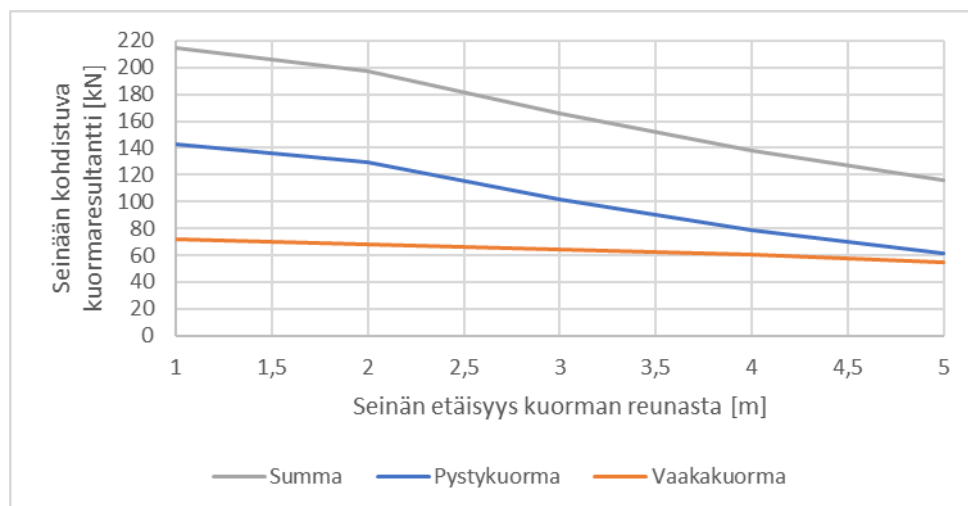
Kuva 65. Plaxis-ohjelmaan syötetty initiaalivaihe sekä laskentavaiheet a), b) ja c) eri kuormitusetäisyyksillä.

Laskentatulokset on koottu taulukkoon 14, jossa on esitetty seinään kohdistuva normaalivoima eri kuormilla, ja niiden etäisyyksillä seinästä. Seinän etäisyys on laskettu reunimmaisesta kuormaparista (ks. kuva 66).

Taulukko 13. Seinään kohdistuvan normaalivoiman resultantti.

Seinän etäisyys [m]	1	2	3	4	5
Resultantti pystykuormasta [kN]	143	129	102	78	61
Resultantti vaakakuormasta [kN]	72	69	64	60	55
Resultanttien summa [kN]	215	198	166	138	116

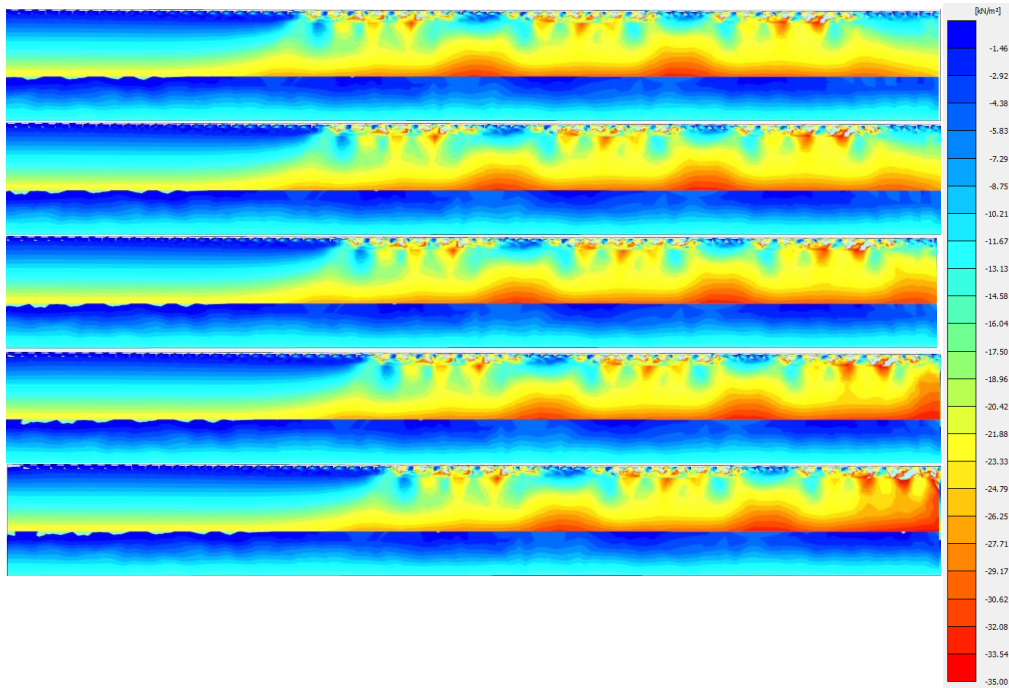
Kuvassa 68 on esitetty tulokset kuvaajana.



Kuva 66. Kuorman aiheuttama normaalivoiman resultantti kuorman ollessa eri etäisyyksillä siirtymättömästä seinästä.

Kuvasta 68 nähdään, että viiden metrin päässä pystykuorman aiheuttama normaalivoima seinässä on samaa suuruusluokkaa vaakakuorman aiheuttaman normaalivoiman kanssa. Kun reunimmainen akseli lähestyy seinää pystykuorman aiheuttama normaalivoima kasvaa yli kaksinkertaiseksi metrin päässä. Vaakakuorman aiheuttama resultantti kasvaa huomattavasti vähemmän, noin kolmanneksen.

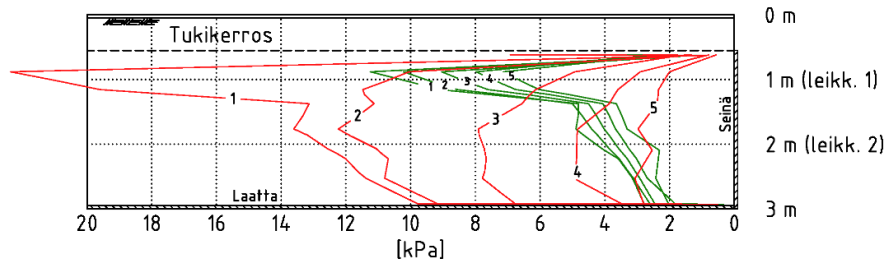
Kuvassa 69 on esitetty kokonaisjännitys, σ_y , jonka suunta on kuvassa oikealle. Seinä on mallin oikeassa reunassa, ja junan suunta on vasemmalta oikealle.



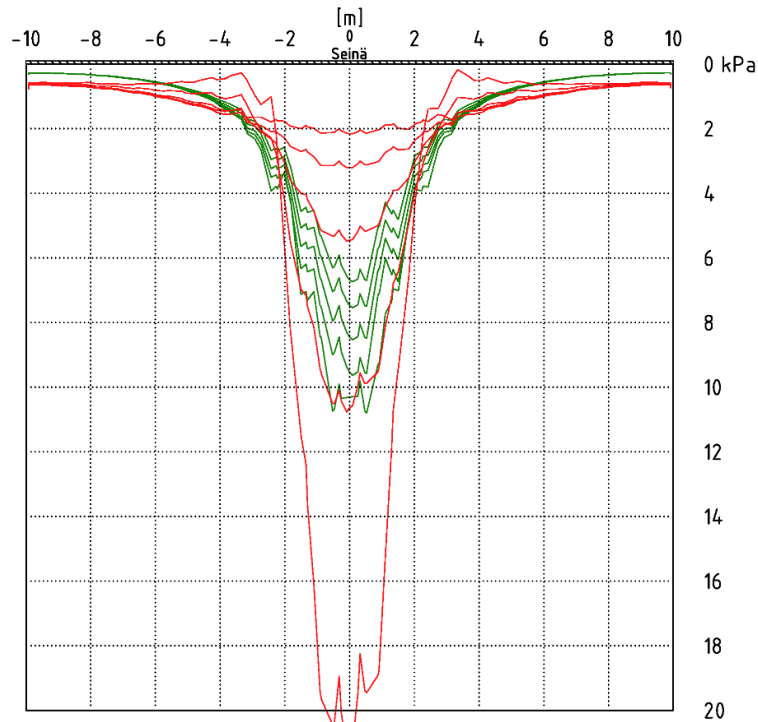
Kuva 67. Junakuorman aiheuttama kokonaisjännitys. Ylin kuva: reunimmainen kuormapari viiden metrin päässä seinästä. Alin kuva: reunimmainen kuormapari metrin päässä seinästä. Kuormana on käytetty LM71 Max. Laatta 3m syvyydellä. Laatan alla 2 m maata.

Kuvassa 70 on esitetty seinään kohdistuva normaalijännitys. Seinän etäisyys, joka on esitetty kuvaajassa välillä 1...5 m, on reunimmaisesta kuormaparista (ks. kuva 66).

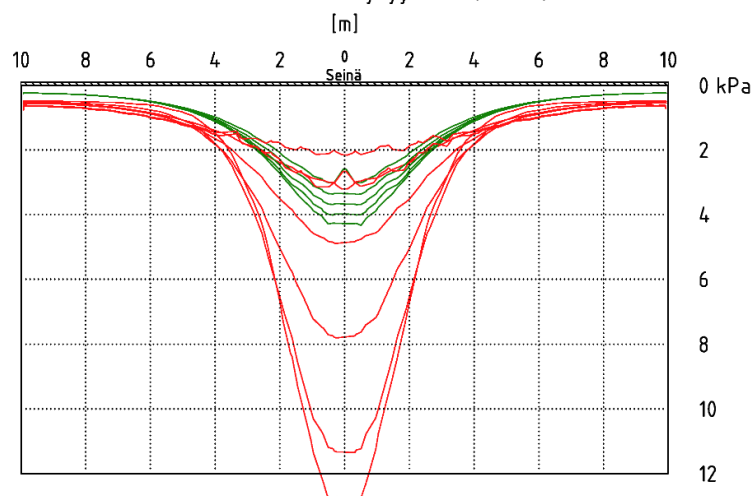
Pystyleikkaus radan keskilinjalla (0). Kuorma: LM71 MAX
 Seinän yläreuna tukikerroksen alapinnassa. Seinän eäisyys 1...5 m reunimmaisesta akselista.
 Laatta kv - 3.0 m



Poikkileikkaus 1 m syvyydessä (leikk.1)



Poikkileikkaus 2 m syvyydessä (leikk.2)

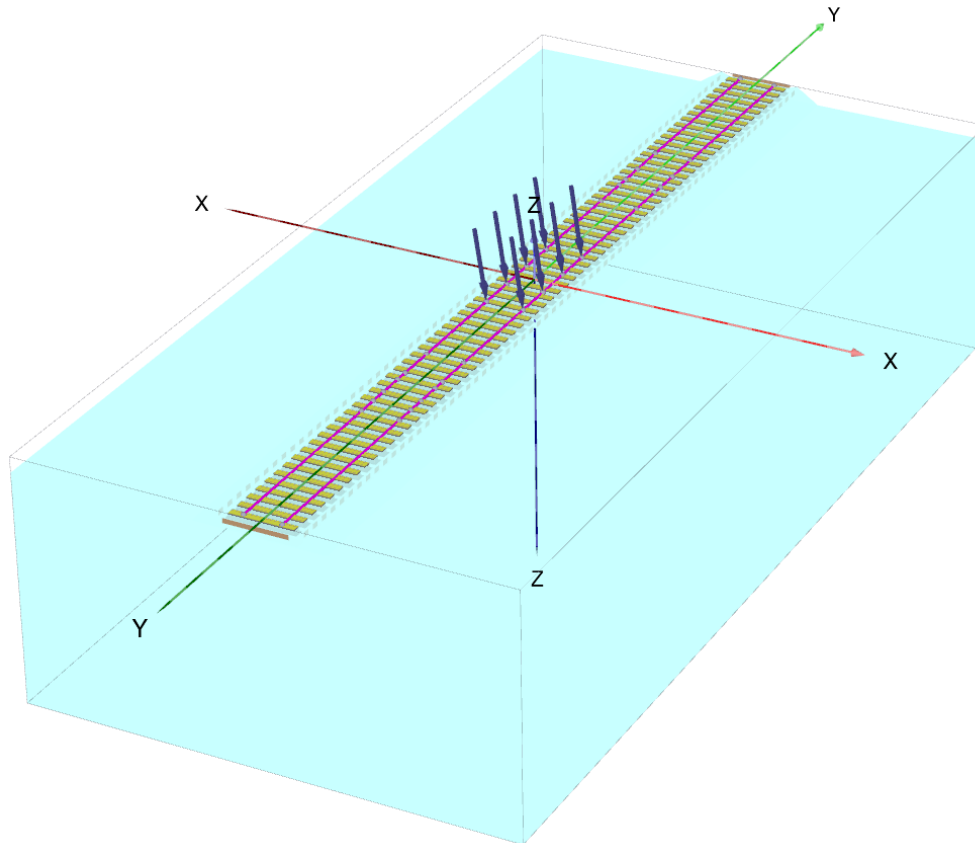


Punainen: Pystykuormasta aiheutuva normaalijännitys seinän pinnassa
 Vihreä: Vaakakuormasta aiheutuva normaalijännitys seinän pinnassa

Kuva 68. Junakuorman aiheuttama normaalijännitys seinässä eroteltuna pysty-
 kuormasta ja vaakakuormasta aiheutuvat jännitykset.

4.4.3 Pystysuuntainen jännitys maassa kuorman alla

Pystysuuntainen jännitys maassa laskettiin mallilla, jossa pölkkyjen alapuolella on vain 1 tasainen maakerros. Laskentamallin geometria on esitetty kuvassa 71. Malli oli 10 m syvä, 20 m leveä ja 40 m pitkä. Kuormana oli yksi akseliryhmä LM71 kuormasta ($8 \times 125 \text{ kN} = 1000 \text{ kN}$).

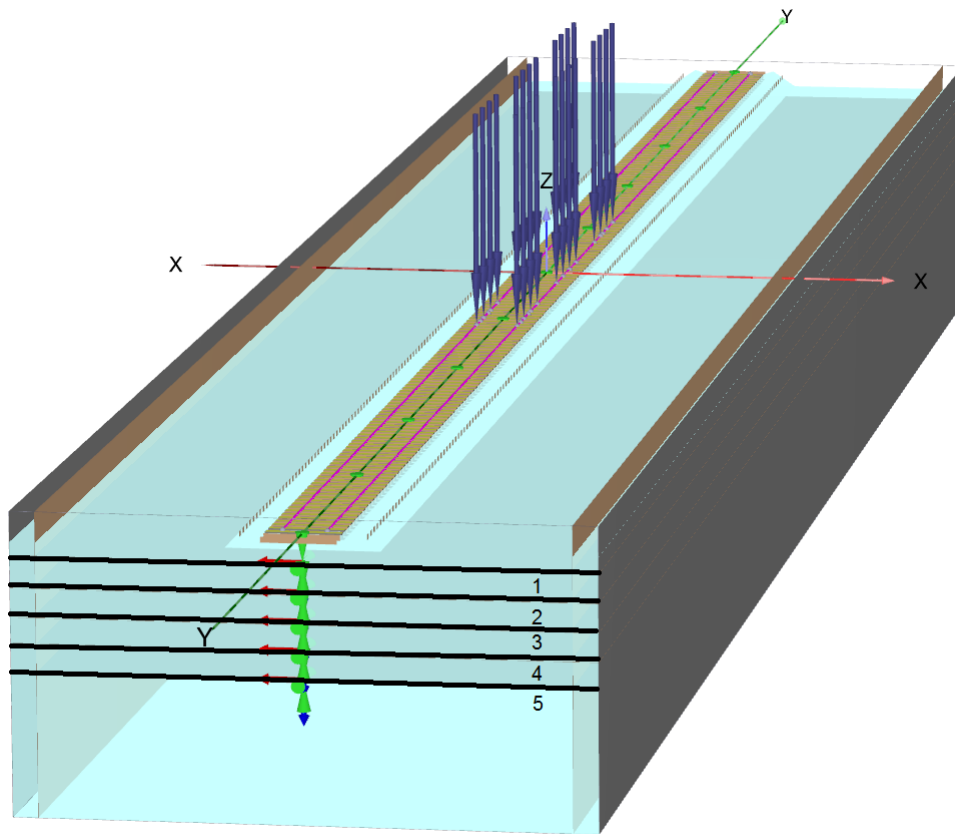


Kuva 69. Pystysuuntaisen jännityksen laskemiseen käytetty laskentageometria ja -kuorma Plaxis 3D-ohjelmassa.

Laskentatulosta vertailtiin Boussinesqin jakauman mukaiseen jännitykseen kuorman alla sekä vastaavan jännitykseen laskettuna 2:1 approksimaatiolla. Boussinesqin ja 2:1 approksimaatiota varten laskettiin jakauma rajoitetun aluekuorman keskipisteen alla. Aluekuorma muodostettiin LM71 akseliryhmän mitoista ja pölkyn leveydestä seuraavasti:

- Kuorman pituus: $3 \times 1,6 \text{ m} = 4,8 \text{ m}$ (neljä akselia 1,6 m toisistaan)
- Kuorman leveys: 2,6 m (ratapölkyn leveys)
- Kuorman ala: $4,8 \times 2,6 \text{ m} = 12,48 \text{ m}^2$
- Kuorma: $1000 \text{ kN} / 12,48 \text{ m}^2 = 80,13 \text{ kPa}$

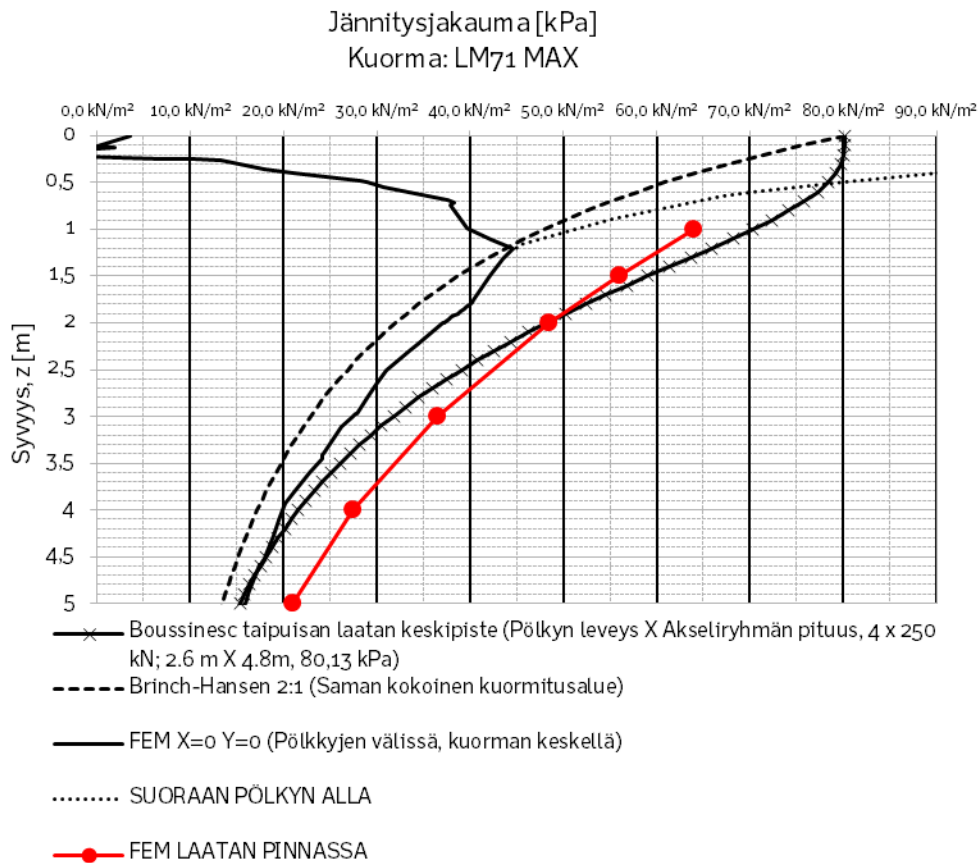
Tämän lisäksi laskettiin pystysuuntainen jännitys paalulaatan pinnassa rajapinta-elementeillä, joiden siirtymä oli estetty. Rajapintaelementtien normaalijännitys vastaa pystyjännitystä vastaavalla syvyydellä. Normaalijännitys laskettiin vaihtamalla elementtien syvyyttä. Laskenta tehtiin viidellä eri syvyydellä (-1...-5 m). Laskenta suoritettiin sekä junakuormalla, että ilman junakuormaa. Erotuksena saatiin laskettua kuorman aiheuttama normaalijännitys. Normaalijännityksen laskentatasot on esitetty kuvassa 72.



Kuva 70. Laskentaan käytetyt rajapinta(interface)elementit Plaxis 3D -ohjelmassa. Numerot ja mustat viivat kuvaavat rajapintaelementtien laskentasyvyysiksi (-1...-5).

Tuloksena saatiin pystyjännitys ilman laattaa, eri syvyyksillä olevan laatan yläpintaan kohdistuva normaalijännitys sekä Boussinesq- ja 2:1-approksimaatiot. Tulokset on koottu kuvaan 71.

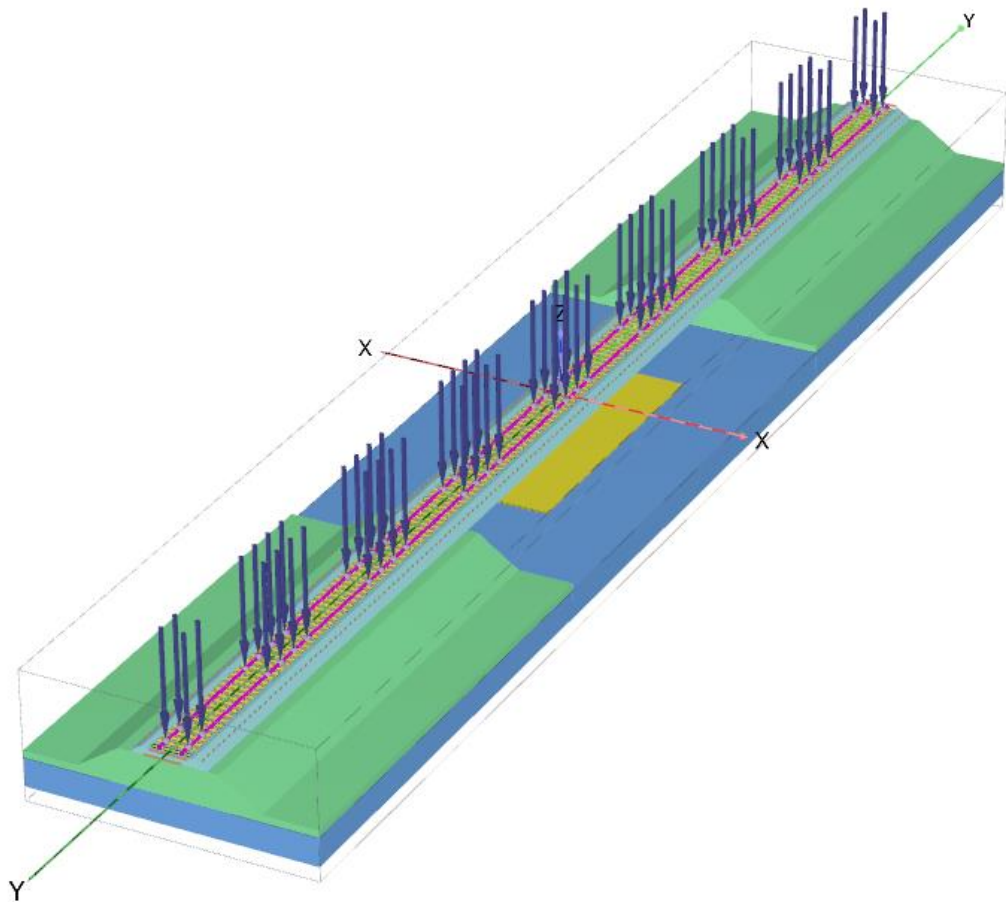
Kuvasta 71 nähdään, että 1,5 metristä alaspäin FEM-laskennan tulos asettuu 2:1 ja Boussinesqin laskentatavalla laskettujen tulosten väliin niin. Puolentoista metrin syvyydessä FEM-tulos vastaa 2:1 menetelmällä laskettua arvoa ja viiden metrin syvyydellä Boussinesqin laskentatavalla laskettua arvoa. Laatan pinnasta, kuorman keskipisteen alta tallennettu pystysuuntaisen jännityksen arvo on noin 35 % isompi kuin vastaavassa pisteessä maasta tallennettu arvo ilman paalulaattaa. Kuvasta voidaan todeta, että pölkkyjen välissä pystykuorman arvo on suurimmillaan 45 kPa noin 1,2 m syvyydellä. Pölkkyjen keskeltä keskelle etäisyys on mallissa 610 mm joten syvyys on noin kaksinkertainen siihen nähden. Pölkyn alla pystysuuntainen jännitys nousee 250 kN akselikuormalla hieman alle 400 kPa:iin mutta laskee siis laskennassa 1,2 metrin matkalla noin 45 kPa:in.



Kuva 71. Kuorman aiheuttama normaalivoiman resultantti kuorman ollessa eri etäisyyksillä

4.5 Osio 2 - Viides laskenta

Viidennessä laskennassa tarkasteltiin pituussuunnassa rajoitettua laattaa. Mallinnetun paalulaatan pituus oli 20 metriä ja leveys 10 metriä. Laattamalli näkyy kuvassa 72. Penger on kuvassa muutettu näkymättömäksi laatan kohdalla, jotta voidaan nähdä keltaisella värillä esitetty paalulaatta. Laatan päällä oli 3 metriä paksu ratapenger. Paalulaatan alle mallinnettiin 5 metriä paksu savikerros. Laskenta tehtiin ohjelmassa kolmessa peräkkäisessä vaiheessa. Laskenta suoritettiin aluksi pelkällä pengerkuormalla. Toisessa vaiheessa lisättiin junakuorman pystykomponentti, ja viimeisessä vaiheessa lisättiin edelleen junakuorman vaakakomponentti.



Kuva 72. *Plaxis-laskentamalli rajoitetulla laamalla. Laatta on esitetty keltaisella värillä. Sininen maakerros on savea, vihreä maakerros on murskeesta rakennettu ratapenger ja sininen maakerros on radan tukikerros. Siniset nuolet kuvaavat pistekuormia, jotka kohdistuvat punaisella värillä esitettyihin kiskoihin. Mallissa oleva tukikerros ja ratapenger on piilotettu laatan ympärillä.*

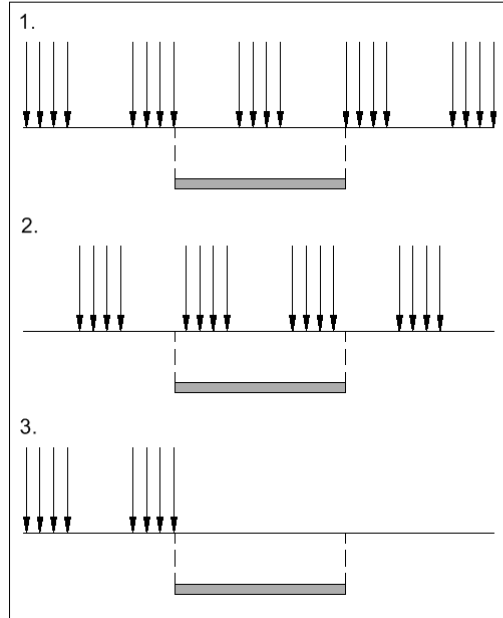
4.5.1 Kuormat

Laattaan kohdistuvia kuormituksia tarkasteltiin kolmella eri laskentatapauksella, joissa vaihdeltiin kuorman paikkaa. Kuormien sijainnit ja laskentavaiheet on esitetty kuvassa 73. Junakuorman vaaka- ja pystykomponenttien osuudet tuloksissa laskettiin vastaavasti kuin aiemmissa vaiheissa. Käytetty kuormakaavio on LM71-akseliryhmä sellaisella jaolla, että viivakuorma on 80 kN/m (nimitetty tässä työssä LM71 E4), joka esitettiin kuvassa 17.

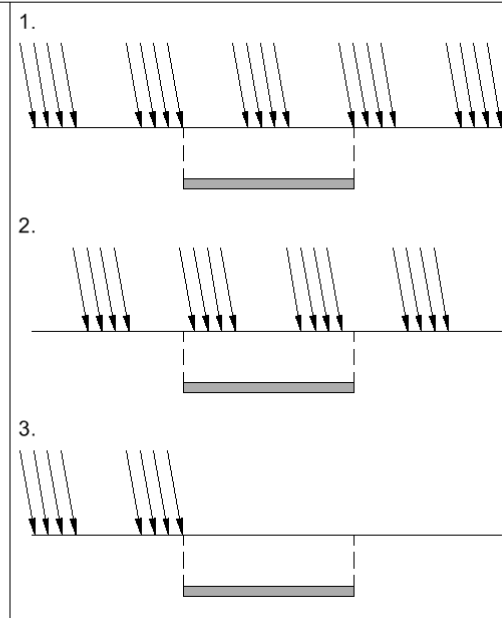
Phase 1: Laskenta pengerkuormalla



Phase 2: Laskennat pystyjunakuormalla



Phase 3: Laskennat pysty- ja vaakajunakuormalla



Kuva 73. Yksinkertaistettu pituusleikkaus, jossa on esitetty laskentatapausten 1...3 kuormien sijainnit suhteessa paalulaataan.

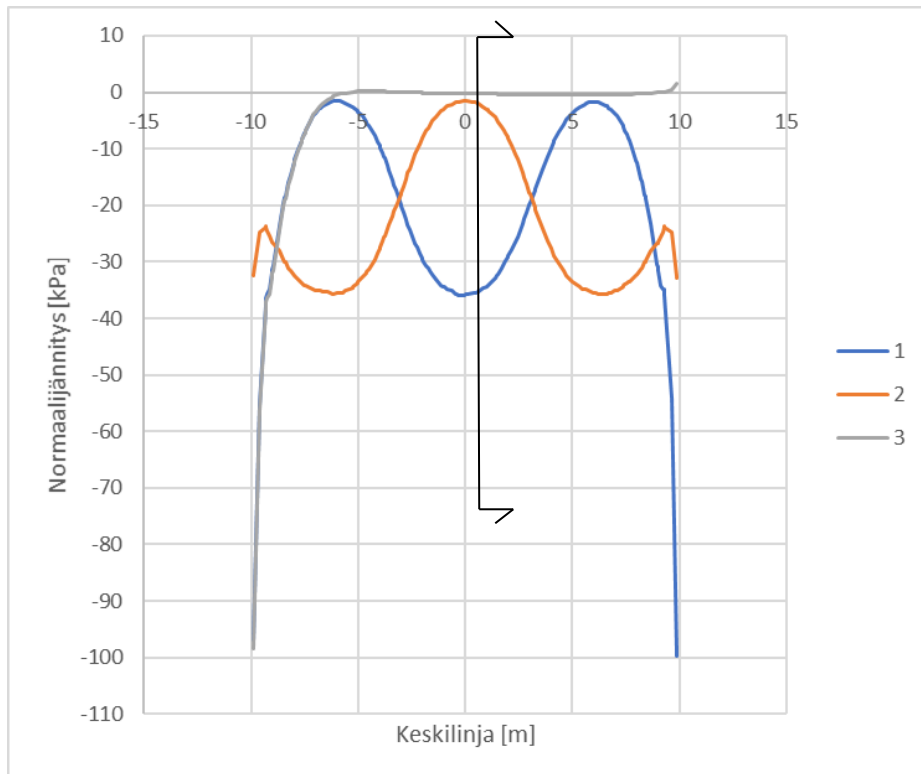
Paalulaatan pystysuuntainen liike oli estetty. Paalujen vaikutusta ei otettu tässä laskennassa muilla tavoilla huomioon. Vaakasuuntaista liikettä esti ainoastaan laatan ylä- ja alapuolelle sekä sivuille syntyvä kitka ja laatan päätyvastus.

4.5.2 Laskennan tulokset

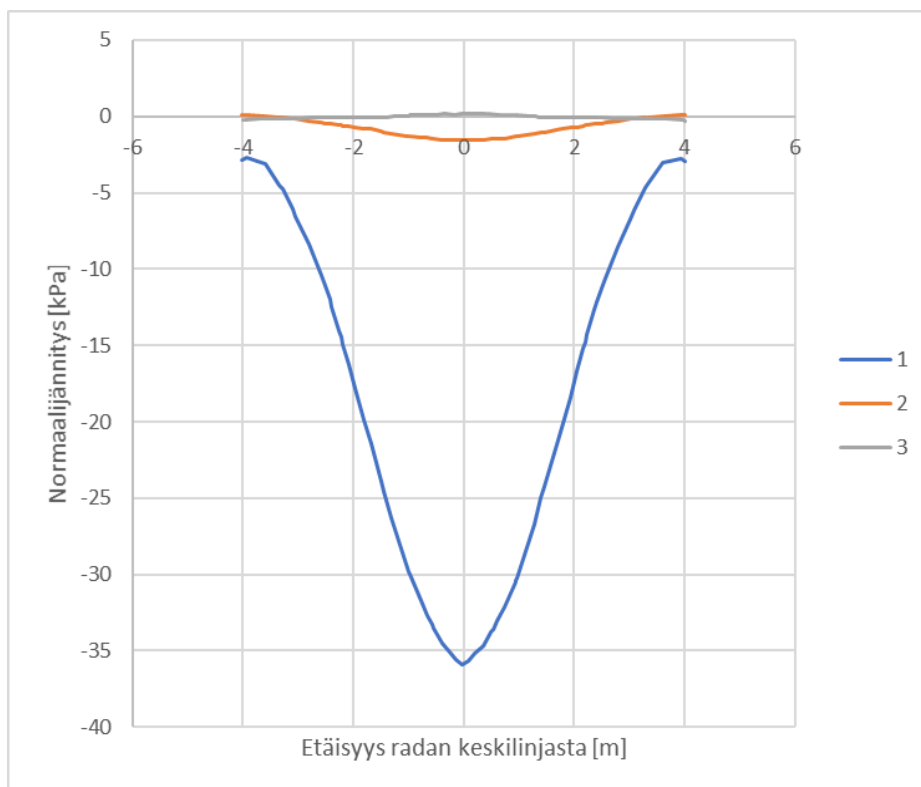
Plaxis-laskennan tuloksista eroteltiin pengerkuorma ja junakuorman pysty- sekä vaakakomponentin osuus vastaavalla tavalla kuin aiemmissa vaiheissa.

Molemmista suunnista rajoitetulla paalulaatalla normaalijännityksen huippu jää hieman koko mallin levyisenä lasketusta laatasta. Laatan reunoille kerääntyy normaalijännitystä, minkä aiheuttaa savikerroksen painuminen jäykän laatan vieressä. Normaalijännityksen huippuarvo laatan reunalla oli 99,7 kPa.

Junakuorman pystysuuntaisen komponentin aiheuttama pystyjännitys laatan yläpinnassa laskettiin kaikilla kolmella eri laskentatapauksella. Paalulaatan pituussuuntaiset pystyjännitykset keskilinjalla on koottu kuvaan 74.



Kuva 74. Junakuorman pystykomponentin aiheuttama normaalijännitys paalulaataan eri laskentatapauksilla 1...3. Tarkastelu on tehty pituussuunnassa radan keskilinjalta. Leikkausmerkintä: ks. kuva 78 alla. Kuormitustapaukset ks. kuva 73. Tuloksista on poistettu pengerkuormasta aiheutuva pystyjännitys.



Kuva 75. Junakuorman pystykomponentin aiheuttama normaalijännitys paalulaataan eri laskentatapauksilla 1...3. Tarkastelu on tehty poikkisuunnassa kohdasta, joka on merkitty leikkauskohtana mustalla värillä kuvassa 77.

Kaikilla laskentatapauksilla syntyi jännityshuippu laatan reunaan, mikä johtui jäykkää laattaa ympäröivän savikerroksen painumisesta. Laskentatapauksessa 3 syntyy pieni vastakkaissuuntainen huippu sillä puolella paalulaattaa, jolla ei ole kuormitusta. Hui-pun arvo oli noin 1,6 kPa, minkä aiheutti todennäköisesti laatan vaakasuuntainen lii-ke. Arvo oli kuitenkin niin pieni, että sen syntymissyytä ei alettu tutkia tarkemmin.

Kuvassa 74 nähdään, että jännityshuippu, joka syntyy laatan päähän, johtuu kokonai-suudessa laatan ulkopuolella sijaitsevasta kuormasta, sillä laskentatapauksen 1 ja 3 käyrät sijaitsevat päällekkäin laatan vasemmalla reunalla.

Kuvassa 75 on tarkasteltu normaalijännityksen jakautumista laatan yläpintaan poik-kisuunnassa. Kuvasta 74 nähdään, että kuvan 75 kohdassa nähdään sinisellä värillä jännityshuippu ja oranssilla värillä pienin arvo. Kuvalla halutaan esittää jakauman poikkisuuntainen muoto ja kiinnittää huomiota laatan reunalle syntyvään jännityk-seen.

Paalulaattaan kohdistuvan normaalivoiman resultantit on koottu laskentatapauksit-tain taulukkoon 14. Taulukkoon on myös lisätty suoraan paalulaatan yläpuolella si-jaitsevan junakuorman pystyresultantti.

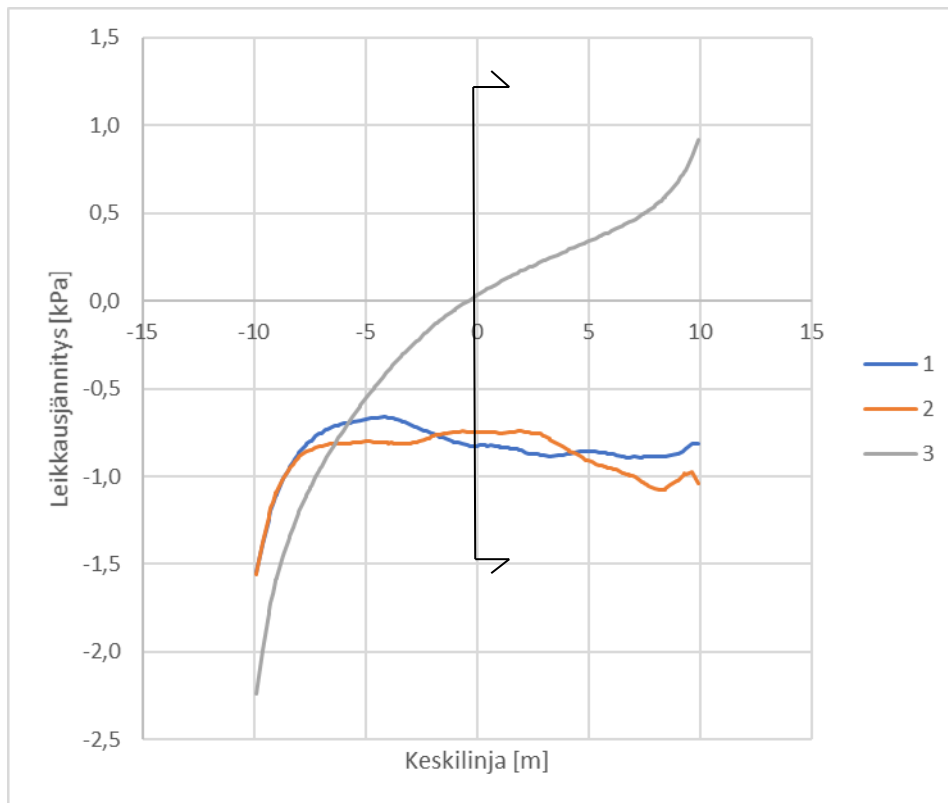
Taulukko 14. Paalulaatan yläpuolella vaikuttuvan pystyjunakuorman resultantti ja paa-lulaattaan kohdistuvan normaalivoiman resultantti.

Laskenta- tapaus	Laatan kohdalla olevien pystykuormien summa [kN]	Paalulaattaan kohdistuva nor- maalivoima [kN]	Junakuorman ja normaalivoiman suhde
1	1000	1635	1,64
2	2000	1891	0,95
3	0	378	-

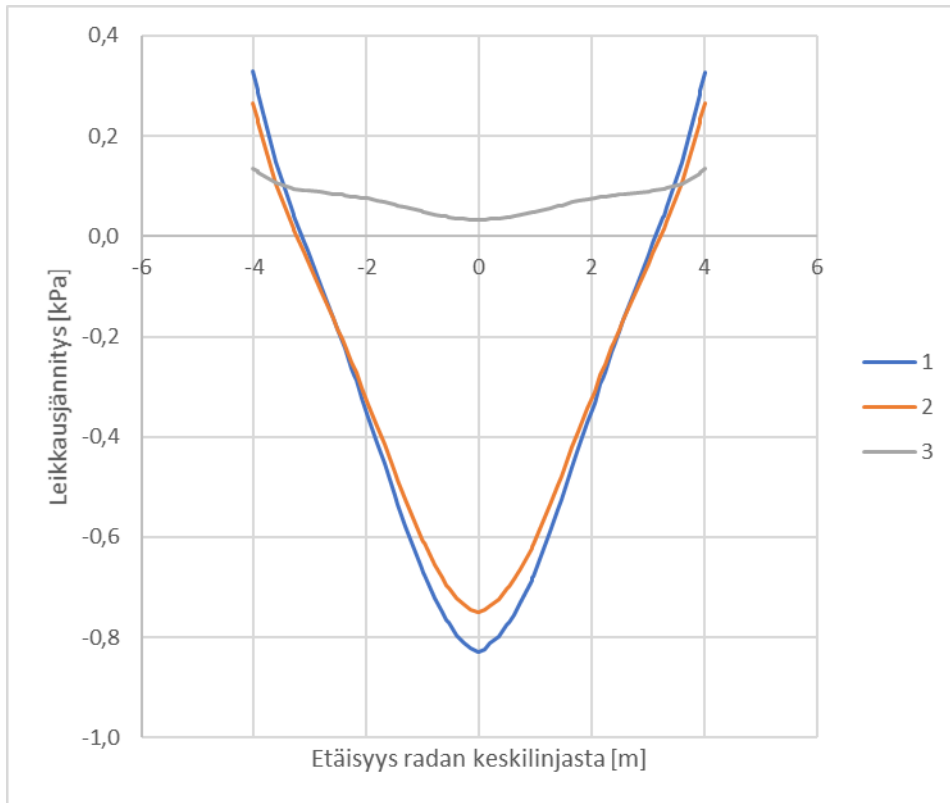
Paalulaattaan kohdistuva normaalivoima on 1,6ertainen verrattuna suoraan paalu-laatan yläpuolella sijaitsevaan kuormaan laskentatapauksessa 1. Asia selittyy sillä, että paalulaatan vieressä olevat kuormat vaikuttavat myös paalulaatan yläpintaan, mikä on odotettua, kun katsoo kuormien suhteellista sijaintia kuvasta 75. Laskentata-pauksessa 2 paalulaatta ottaa vastaan 95 % junakuormasta. Pieni osa kuormasta ja-kaantuu paalulaatan ulkopuolelle. Laskentatapauksessa 3 kuorma sijaitsi paalulaatan ulkopuolella, mistä aiheutui 378 kN normaalivoima paalulaatan yläpintaan.

Laskentatapaukset 1 ja 3 eroavat ainoastaan siten, että tapauksessa 3 kuormitus lop-puu juuri ennen paalulaatan alkua. Laskentatapauksen 1 resultantista voidaan vähen-tää paalulaatan ulkopuolelta tulevan kuormituksen osuus, jonka suuruus on kaksi ker-taa laskentatapauksessa 3 syntyvä normaalivoima. Tällöin saadaan laskentatapauk-sen 1 normaalivoimaksi $1635 \text{ kN} - 2 \times 378 \text{ kN} = 880 \text{ kN}$, joka on 88 % paalulaatan yläpuolella vaikuttavasta junakuormasta.

Junakuorman vaakasuuntaisen komponentin aiheuttamaa leikkausjännitystä laatan yläpinnassa tarkasteltiin myös eri laskentatapauksilla. Paalulaattaan vaikuttava leikkausjännitys keskilinjalla on esitetty kuvassa 76, jossa negatiivinen arvo on keskilinjasta kasvavan paaluvälin suuntainen eli samansuuntainen kuin junakuorman vaakakomponentti.



Kuva 76. Junakuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys paalulaattaassa eri laskentatapauksilla 1...3. Tarkastelu on tehty pituus suunnassa radan keskilinjasta, joka on laskentamallissa Y-akselin kohdalla. Leikkausmerkintä: ks. kuva 77 alla.

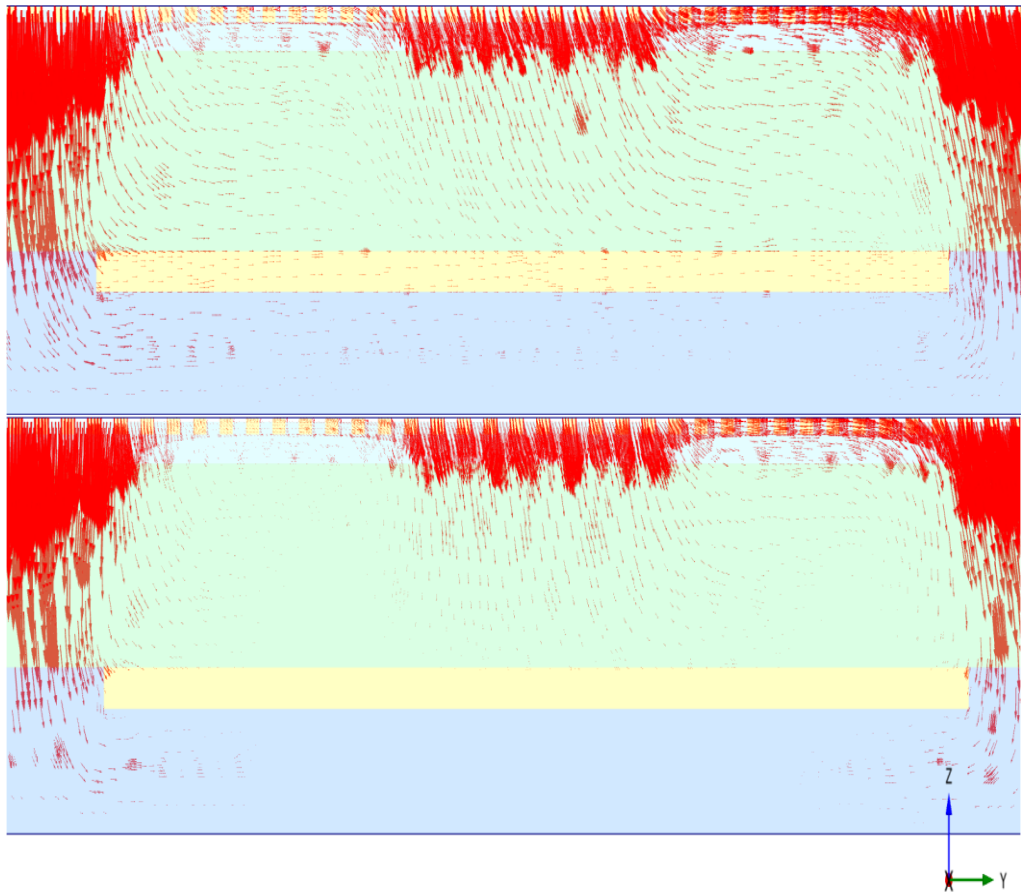


Kuva 77. Junakuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys paalulaat-
taan eri laskentatapauksilla 1...3. Tarkastelu on tehty poikkisuunnassa
kohdasta, joka on merkitty leikkauskohtana mustalla värillä kuvassa 79.

Laskentatapauksessa 3, jossa kuorma oli ulkopuolella paalulaatan vieressä, leikkaus-
jännityksen suunta muuttui ennen keskilinjan nollapaalua. Lähempi tarkastelu osoitti,
että maa liikkui vaakasuunnassa yhtä paljon tai enemmän kuin paalulaatta lähellä
paalulaatan reunaa. Noin paalun -1 m kohdalla paalulaatan vaakasuuntainen siirtymä
ylitti yläpuolella olevan maan siirtymän, jolloin myös leikkausjännityksen suunta
vaihtui.

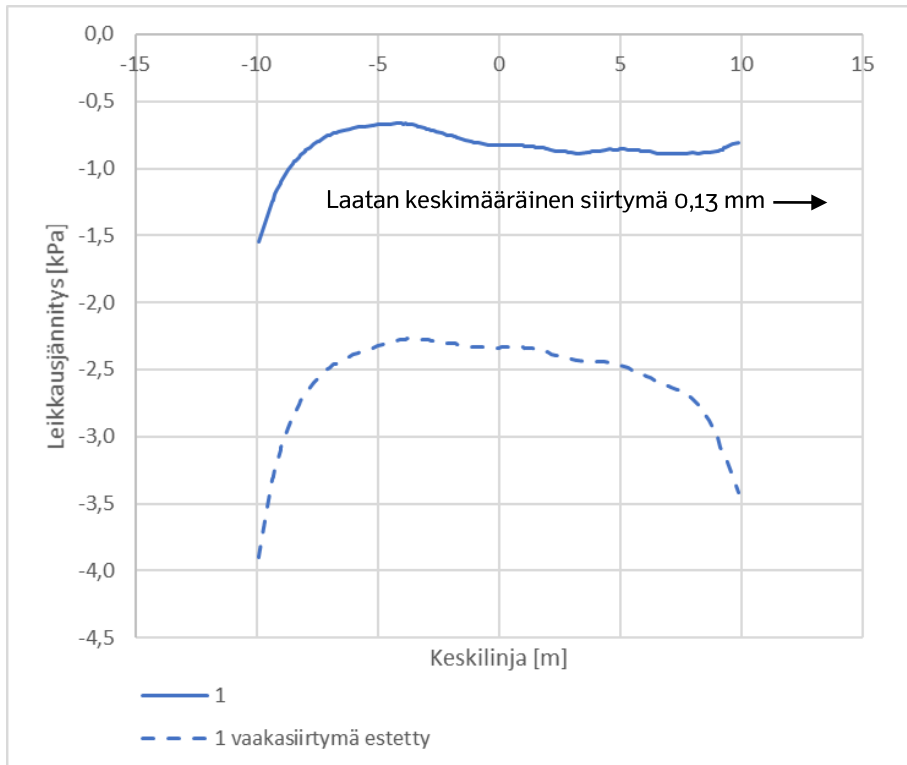
4.5.3 Vertailulaskenta vaakasuunnassa liikkumattomalla laamalla

Paalulaatta pystyi alun perin liikkumaan vaakasuunnassa, ja vain pystysuuntainen
liike oli estetty. Laatan alapinnassa ja sivuilla vaikuttaa saven leikkauslujuus.



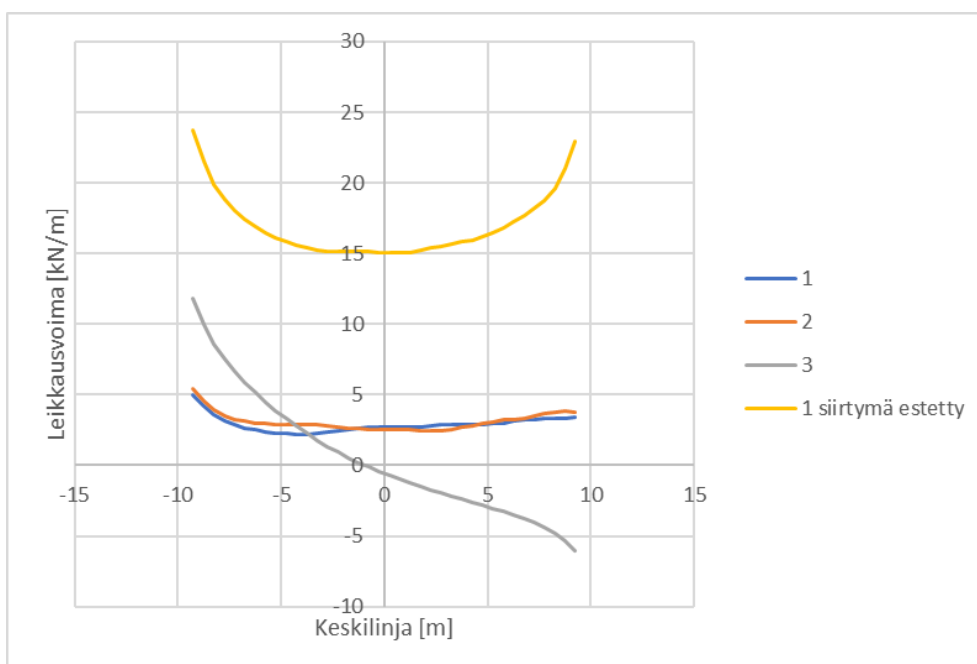
Kuva 78. Ylhäällä vaakasuuntaisen junakuorman aiheuttama liike laskentatapauksella 1 maassa ja paalulaatassa. Laatan keskimääräinen liike pituussuunnassa oli 0,13 mm. Alhaalla laatan liike on estetty.

Paalulaatan siirtymän vaikutuksesta leikkausjännitykseen tehtiin lisätarkastelu, jossa vaakasuuntainen liike oli täysin estetty. Vertailulaskennassa käytettiin laskentatapauksen 1 junakuormia. Kuvaan 79 on koottu laskennan tulos pituusleikkauksessa, jossa on vertailukuvaajana myös vapaan laatan tulos. Kuvasta nähdään, että kun liike estetään pituussuunnassa laatan yläpinnassa vaikuttaa huomattavasti suurempi pituussuuntainen leikkausjännitys.



Kuva 79. Junakuorman vaakakomponentin aiheuttama leikkausjännitys paalulaatan keskilinjalla, kun laatta pääsee siirtymään ja kun siirtymä on estetty.

Kuvaan 80 on koottu laskentatuloksien leikkausvoimat laskettuna metriä kohden, kun tarkastellaan laattaa pituussuunnassa. Arvot on laskettu jakamalla laatta puolen metrin pituisiin siivuihin ja summaamalla jokaisen siivun leikkausjännitys erikseen. Näin on saatu kN/0.5 m arvo, joka on kerrottu kahdella alla olevaan kuvaajaan. Kuvasta nähdään, että kun laatan liike estetään, pituussuuntainen leikkausjännitys nousee laatan keskellä noin viisinkertaiseksi.



Kuva 80. Junakuorman vaakakomponentin aiheuttama metrikohtainen leikkausvoima. Laskentatapaukset 1 – 3 esitetty kuvassa 73.

Paalulaattaan junan vaakakuormasta kohdistuvat leikkausvoimat on koottu laskentatapauksittain taulukkoon 15.

Taulukko 15. Paalulaattaan kohdistuvan leikkausvoiman resultantti muutettu metrikuormaksi jakamalla laatan pituudella. Paalulaatan yläpuolella vaikuttavien pistekuormien vaakakomponentit on laskettu metrikuormaksi jakamalla mallin pituudella.

Laskentatapaus	Mallinnettu keskimääräinen vaakakuorma [kN/m]	Paalulaattaan kohdistuva keskimääräinen leikkausvoima [kN/m]	laattaan kohdistuvan voiman osuus kuormasta
1	20	2,95	15 %
2	20	3,15	16 %
1*	20	17,2	86 %
3	**	0,65 (13 kN)	

*) Laatan vaakasiirtymät on kokonaan estetty

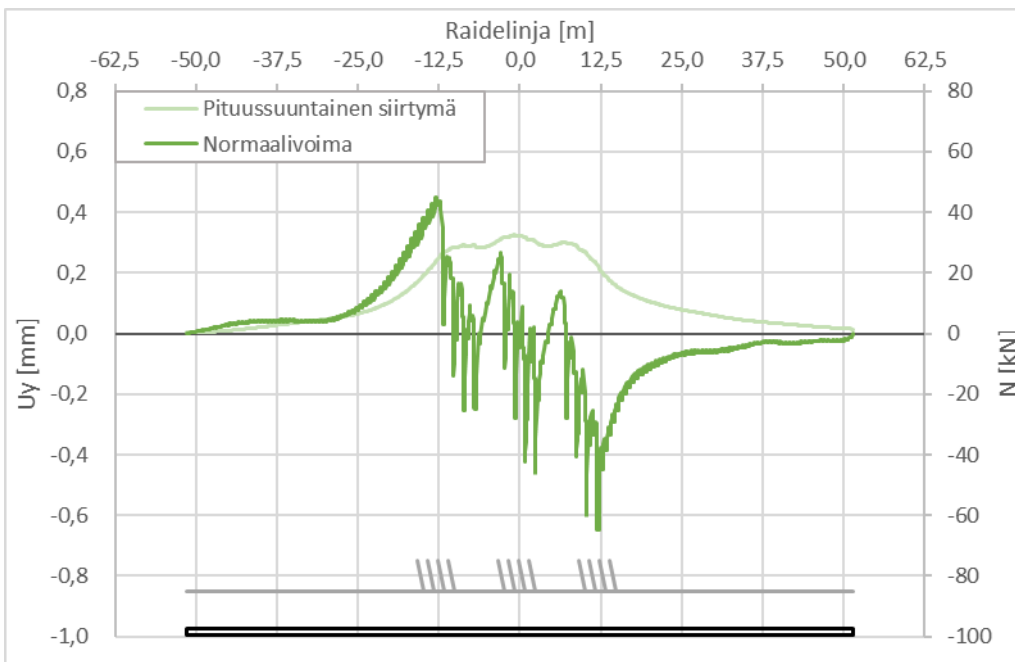
**) Tapauksessa 3 kuorma loppuu laatan reunalle

Laskentatapauksen 1 tulokset kuvaavat leikkausvoiman ääriarvoja laatan pinnassa. Kun paalulaatta pääsee liikkumaan mallissa vaakasuunnassa, leikkausjännitykset jäävät pienemmiksi kuin silloin kun laatan vaakaliike on estetty. On tärkeä huomata, että liike on vain 0.13 mm.

5 Raiteen jännitys ja muodonmuutos

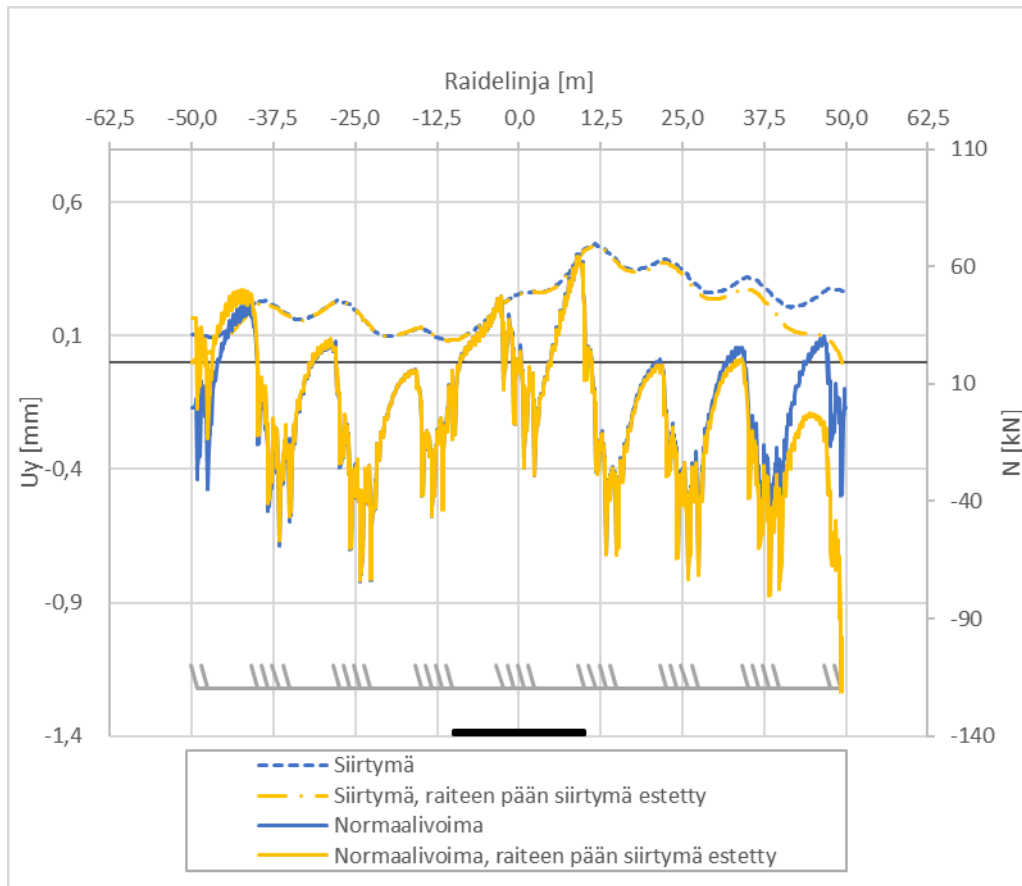
Lopuksi vertailtiin, miten kuormat ja eri laskentojen paalulaattojen geometriamallit vaikuttivat raiteen jännityksiin ja muodonmuutoksiin. Raiteen jännityksen ja muodonmuutoksen tarkasteluun valittiin toinen kisko. Kiskon valinnalla ei ollut merkitystä, sillä kaikki laskentamallit olivat täysin symmetrisiä keskilinjan suhteen. Tarkasteluun valittiin mallit, joissa pengerkorkeutena on 3 metriä ja junakuormana LM71:n pistekuorma tai jatkuva kuormakaavio LM71 E4. Tarkastelussa on mukana junakuormasta sekä pysty- että vaakakomponentti.

Kuvassa 81 on esitetty neljännen laskennan kiskoon pituussuuntainen siirtymä ja sen sisäinen normaalivoima. Laskennassa on mukana junakuorman pystykomponentin lisäksi myös vaakakomponentti, joka on 25 % pystykomponentin suuruudesta. Normaalivoiman positiivinen suunta on vasemmalta oikealle.



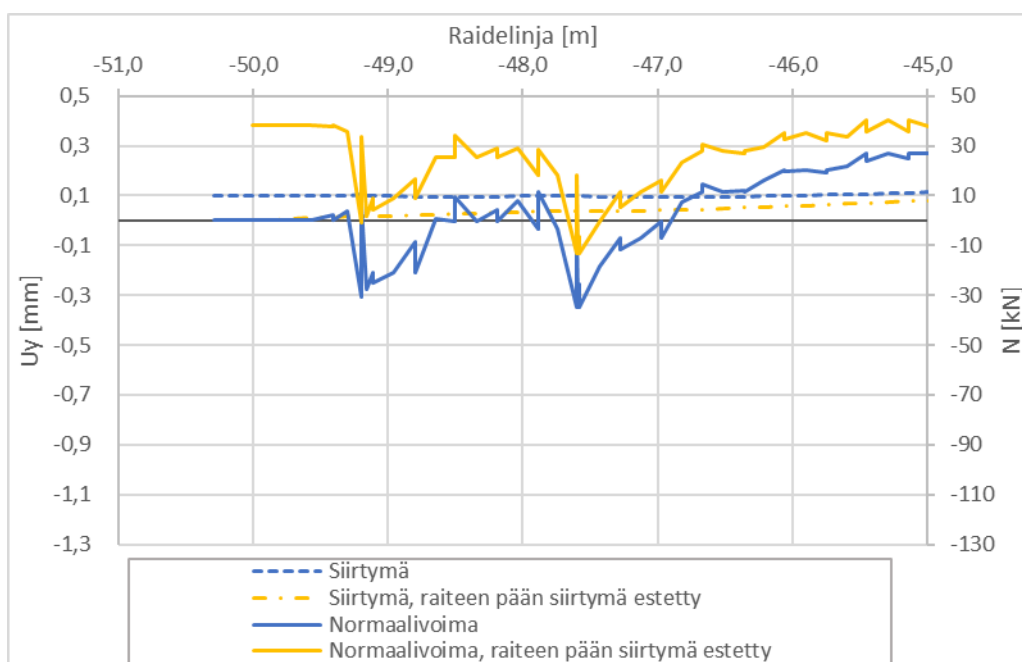
Kuva 81. Neljännen laskennan raiteen siirtymä ja normaalivoima. Kuvan alaosaan on lisätty pistekuormien ja paalulaatan sijainnit harmaalla ja mustalla väripölyllä. Paalulaatan koko oli laskennassa 8,2 m x mallin pituus.

Kuvassa 82 on esitetty viidennen laskennan raiteen pituussuuntainen siirtymä ja sen sisäinen normaalivoima. Laskennassa on mukana junakuorman pystykomponentin lisäksi myös vaakakomponentti, joka on 25 % pystykomponentin suuruudesta. Normaalivoiman positiivinen suunta on vasemmalta oikealle. Kun kiskon liike mallin reunassa on vapaa, kisko liikkuu vetopuolella noin 0,1 mm ja puristuspuolella mallin reunassa noin 0,3 mm. Tällöin jännitys putoaa mallin reunassa nolleen. Toisaalta, kun kiskon liike estetään, on kiskossa mallin reunassa vetopuolella noin 40 kN vetoa ja puristuspuolella noin 100 kN puristusta. Tämä vaikuttaa kiskon siirtymiin ja jännityksiin noin 25 m matkalla mallin reunoista. Oletusarvoisesti laskennassa kiskon liike on mallin reunassa vapaa ja jännitys kiskossa mallin reunalla nolla.

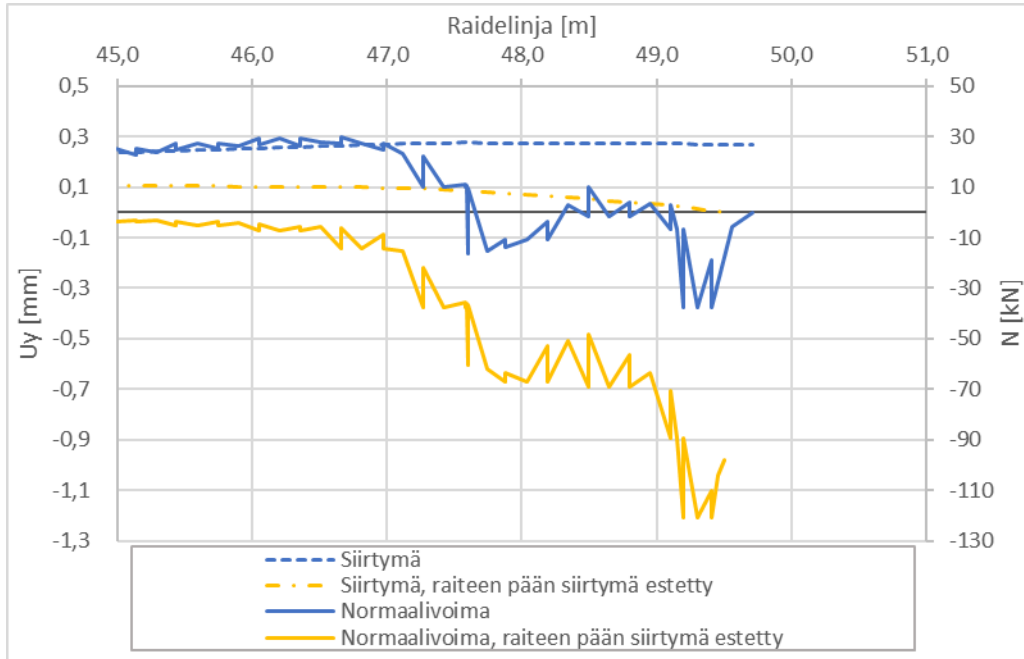


Kuva 82. Viidennen laskennan raiteen siirtymä ja normaalivoima. Kuvan alaosaan on lisätty kuormien ja paalulaatan sijainnit harmaalla ja mustalla värillä. Paalulaatan koko oli laskennassa 8,2 m x 20 m ja sen siirtymä oli estetty.

Kuvissa 86 ja 87 on tarkasteltu vielä lähemmin raiteen päissä tapahtuvia siirtymiä, ja sinne muodostuvaa normaalivoimaa.



Kuva 83. Viidennen laskennan raiteen siirtymä ja normaalivoima mallin alkupäässä (vasen pää).



Kuva 84. Viidennen laskennan raiteen siirtymä ja normaalivoima mallin loppupäässä (oikea pää).

6 Yhteenveto

Työssä mallinnettiin jarruttava juna eri kuormakaavioilla Plaxis 3D FEM-ohjelmalla. Kuormakaaviosta LM71 muodostettiin jännitysvaikutuksiltaan vastaava kuormakaavio LM71 MAX, jossa viivakuormat korvattiin akseleilla. Kuorman pystysuuntainen resultantti oli ”kolmen vaunun” $12 \times 250 \text{ kN} = 3000 \text{ kN}$ ja vaakakomponentti oletettiin 25 % pystykomponentista (750 kN).

Mallissa kiskot kiinnitettiin pölkkyihin täysin jäykästi. Kiskon ja pölkyn välinen liike ei ole oleellista, kun tutkitaan junakuorman aiheuttamia jännityksiä paalulaattaan. Tämä sen takia, että kiskonkiinnitykset eivät saa päästä kiskoa liikkumaan, vaan tarkoitus on siirtää voimavaikutus ratapölkyn ja tukikerroksen väliseen kontaktiin. RATO 11 määrittää läpivetovastuksen minimiarvoksi 9 kN/kiinnitys. Pölkkyt makasivat tukikerroksessa, jonka geometria vastasi RATO 3:sen suoran radan normaalipoikkileikkausta. Pölkkyjen yläpinta nostettiin 50 mm tukikerroksen yläpinnan yläpuolelle, jotta kisko ei olisi kiinnitettynä tukikerrokseen.

Laskennassa käytettiin maakerroksille Mohr-Coulomb-mallia. Parametrit valittiin niin, että laskenta vastasi Hardening soil-mallin laskentaa tilanteessa, jossa kuormitus on toistuvaa. Toistuvassa kuormitukset molemmat mallit toimivat samalla tavalla.

FEM-ohjelmasta saatiin tuloksena kokonaisjännitykset eri tilanteissa. Laskennan tuloksista eroteltiin pengerkuorma ja junakuorman pysty- sekä vaakakomponentin osuus.

Tässä työssä on pääasiassa tarkasteltu jännitystä laatan keskilinjaa pitkin. Kuorma vaikuttaa kuitenkin koko laatan pintaan ja erot keskilinjalla saattavat olla kokonaisuuden kannalta osittain harhaanjohtavia. Tätä on pyritty havainnollistamaan summaamalla jännitys metrin kaistaleissa yhteen poikkisuunnassa. Tarkasteltaessa metrikohtaista kuormaa huomataan, että erot eri kuormakaavioiden ja pengerkorkeuksien välillä ovat pienempiä kuin tarkasteltaessa jännitystä laatan keskilinjalla.

Mallinnuksessa todettiin, että laatta jäykkänä rakenteena kerää vaakakuorman. Jännitys jakauma keskittyi samalle alueelle pituussuunnassa sekä koko mallin levyisellä laatalle, että rajatun levyisellä laatalle. Poikkisuunnassa jännitys keskittyi laatalle, kun laskettiin rajatulla laatalle. Tämä johtuu siitä, että siirtymät laatan pinnan tasossa maassa ovat niin pieniä, että leikkausjännitys maassa jää hyvin pieneksi. Kun molempiin suuntiin rajatun kokoisen laatan siirtymä estettiin myös pituussuunnassa, myös siihen kohdistui vaakakuorma lähes kokonaisuudessaan.

Maahan laatan vierellä pääsee syntymään pystysuuntaista liikettä, vaikka laatan pinnassa maa ei liikkuisikaan. Kuorma vaikuttaa pystysuunnassa myös laatan ulkopuolelle. Laatan reunalle muodostuu jännityspiikki, kun maahan muodostuu suuri siirtymäero reunan kohdalla. Laatan rajoitettu leveys ja reunavaikutus vaikuttivat nostavasti laatan ulkopuoliseen jännitysjakaumaan. Tästä syystä jännityksen huippuarvo laatan päällä jäi pienemmäksi vaakasuunnassa rajatussa laatussa.

Radan alla poikkisuunnassa olevaan jäykkään seinään (esim. sillan maatuki) kohdistuva maanpaine kasvaa, kun juna lähestyy seinää. Voidaan todeta, että kun junan ensimmäinen akseli on viiden metrin päässä seinästä, on jarrutuksesta ja pystykuormasta aiheutuvat osuudet lähes yhtä suuria. Lähempänä seinää pystykuormasta syntyvä vaakasuuntainen maanpaineen resultantti on suurempi. Kun akseli on noin metrin päässä seinästä, pystykuormasta syntyvä vaakasuuntainen maanpaineen resultantti on suuruudeltaan kaksinkertainen jarrutuksesta syntyvään komponenttiin.

Tarkasteltaessa pystysuuntaista jännitystä maassa huomataan, että pölkkyjen välissä jännitys palaa nollaan maapinnassa, kun taas pölkkyjen alla jännitys on noin 400 kPa. Normaalijännitys laatan pinnassa suoraan kuorman alla oli tässä laskelmassa noin 35 % korkeampi kuin vastaava FEM-mallin mukainen maassa vallitseva pystyjännitys. Laskennan tuloksena saatiin, että LM71 kuorman akseliryhmä aiheuttaa jännityshuipun joka rajallisella alueella nostaa vaakakuorman metrikohtaista vaikutusta 20 % puolentoista metrin syvyydessä olevan laatan pinnassa ja 10 % kolmen metrin syvyydellä olevan laatan pinnassa. Viiden metrin syvyydessä vaikutusta ei enää ole.

Pystysuunnassa LM71 kuorman akseliryhmä nostaa laskennan mukaan rajallisella alueella viivakuorman aiheuttamaa metrikohtaista vaikutusta laatan pinnassa puolentoista metrin syvyydessä 100 %, kolmen metrin syvyydessä 85 % ja viiden metrin syvyydessä 55 %.

Tässä työssä on pääasiassa tutkittu jännityksiä koko mallin levyisen laatan pinnassa eri syvyyksillä. Laatan geometrian vaikutuksia jännitysjakumaan on tutkittu ainoastaan 3 m korkuisen ratapenkereen alla. Tärkeää on huomata, että 8 m leveän ja 20 m pitkään laattaan kohdistuva jännitysjakuma on hyvin mallinnettavissa koko mallin kokoisella laatalta vain, jos laatan siirtymät oletetaan estetyiksi. Toisaalta on merkittävää, että näiden kahden geometrialtaan hyvin erilaisten laskelmien tulokset ovat käytännössä samat.

Pituussuuntaisen jäykkyyden mallintaminen, paalulaattaan kohdistuvat jännitykset matalan 1,5 m penkereen alla ja yhteisvaikutus sillan kanssa, vaatii vielä lisätutkimusta.

Lähteet

Jaakkonen, J. 2013. Osavarmuus- ja kokonaisvarmuusmenettelyn vaikutus vanhojen kriittisten ratapenkereiden laskennalliseen varmuustasoon. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 51/2013. Helsinki. Saatavilla:
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2013-51_osavarmuus_ja_web.pdf

Kalliainen, A. & Kolisoja, P. 2017. Pile supported embankment slabs under railway track line. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 28/2017. Helsinki.

Komission asetus (EU) N:o 1299/2014. YTE. 2014. Bryssel.

Liikennevirasto. 2016. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3, Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 6/2016. Helsinki.

Liikennevirasto. 2017. Eurokoodin soveltamisohje. Siltojen kuormat ja suunnittelu-
perusteet – NCCI 1. Liikenneviraston ohjeita 24/2017. Helsinki.

Nemlander, R. 2015. Junan jarrukuorman välittyminen pengerlaatalle. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 35/2015. Helsinki.

Plaxis. 2016. Plaxis Material Models Manual.

Plaxis. 2012. Plaxis 3D Reference Manual.

Ratahallintokeskus. 2002. Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Saatavilla:
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rato_11_radan_paallysrakenne.pdf

SFS-EN 1991-2. 2009. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat osa 2: Siltojen liikennekuormat. Helsinki.

SFS-EN 15528. 2015. Railway applications. Line categories for managing the interface between load limits of vehicles and infrastructure. Bryssel.

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-641-6
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

