

Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiliteetti- tarkasteluihin



Markku Juvankoski



Ratahallintokeskuksen
julkaisu A 4/2007

Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen
stabiliteettitarkasteluihin

Markku Juvankoski

Helsinki 2007

Ratahallintokeskus

Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2007

ISBN 978-952-445-183-3 (nid.)

ISBN 978-952-445-184-0 (pdf)

ISSN 1455-2604

Julkaisu pdf-muodossa: www.rhk.fi

Kannen ulkoasu: Proinno Design Oy, Sodankylä

Kansikuva: Olavi Huotari

Helsinki 2007

Juvankoski, Markku: Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiliteetti-tarkasteluihin. Ratahallintokeskus. Rataverkko-osasto. Helsinki 2007. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 4/2007. 48 sivua ja 29 liitettä. ISBN 978-952-445-183-3, ISBN 978-952-445-184-0 (pdf), ISSN 1455-2604.

Avainsanat: ratarakenne, ratapenger, akselipaino, nauhakuorma, stabiliteetti, vakavuus, leikkausjännitys, sysäyskerroin

TIIVISTELMÄ

Tämän selvityksen tavoitteena on ollut määrittellä sen viivakuorman suuruus, jota klassisen maamekaniikan liukupinta-analyysiä käytettäessä tulisi soveltaa, jotta valitun viivakuorman rasitukset mahdollisimman luonnonmukaisesti vastaisivat niitä rasituksia, jotka todellinen, liikkuva junakuorma liukupintaan leikkausrasituksina aikaansaa. Näin määräytyvä viivakuorma kattaa junan aikaansaamien paikallisten rasituskeskittymien vaikutukset radan stabiliteettimitoituksessa.

Nykyisin vakavuuslaskelmissa käytettävän kuormituksen otaksutaan jakautuvan tasaisesti koko paikallaan seisovan junan pituudelta. Pysähtyneenkin junan akselit kuitenkin kuormittavat pistekuorman tapaan kiskoa, josta kuormitus leviää rata-pölkkyjen ja penkereen välityksellä pohjamaahan. Tässä selvityksessä tarkastelut on suoritettu kolmella eri akselipainoja edustavalla vaunukalustolla ja kolmea eri pengerkorkeutta esimerkkinä käyttäen.

Tarkastelu on suoritettu tavanomaisista vakavuustarkastelumenetelmistä poiketen määrittämällä akselikuormista aiheutuvat jännitystilajakautumat Boussinesqin piste-kuorman jännitysten jakautumaan perustuen ja laskemalla oletusliukupintoihin toisaalta akseleista kohdistuvat leikkausvoimat ja toisaalta tasaisesti jakautuneen nauhakuorman aiheuttamat leikkausvoimat. Tulokset on esitetty kuormituspituuden suhteen kertoimina, jotka kuvaavat akseleista aiheutuvan suurimman rasituksen suuruutta tasaisen 80 kN/m olevan nauhakuorman aiheuttamaan suurimpaan rasitukseen nähden. Jännitysten laskennassa on huomioitu ainoastaan akselikuormista aiheutuva jännitys, ei penkereen painosta aiheutuvia tai muita geostaattisia jännityksiä.

Akseleista aiheutuvat paikalliset leikkausrasitukset olivat suurimmillaan matalimmalla penkereellä 1,07-kertaisia (akselikuorma 250 kN), 1,24-kertaisia (akselikuorma 300 kN) ja 1,28-kertaisia (akselikuorma 278.5 kN) 80 kN/m tasaisen nauhakuorman aikaansaamiin rasituksiin verrattuna.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että tarkasteluissa esimerkkeinä käytetyillä kalustoilla akseleista maapohjaan aiheutuvien rasitusten vaikutukset stabiliteettiin ovat kuitenkin käytännössä RAMOssa (Ratatekniset määräykset ja ohjeet osa 3, 27.9.2005), taulukossa 3.7:2 esitettyjen akselipainokohtaisten mitoitusnauhakuormien tasolla tai sen alapuolella. Korkeammilla penkereillä marginaalit ovat matalia penkereitä suurempia. Tarkastelussa saatuja tuloksia yleistäen marginaalit saattavat olla pienempiä tässä yhteydessä käytetyn akselikuorman vaihtelualueen, 250...300 kN, alapäässä kuin yläpäässä.

Juvankoski, Markku: Bestämning av bankonstruktionens belastning för stabilitetsgranskningar. Banförvaltningscentralen. Bannätsavdelningen. Helsingfors 2007. Banförvaltningscentralens publikationer A 4/2007. 48 sidor och 29 bilagor. ISBN 978-952-445-183-3, ISBN 978-952-445-184-0 (pdf), ISSN 1455-2604.

Nyckelord: bankonstruktion, banvall, axellast, jämnt fördelad last, stabilitet, skjuvspänning, stötfaktor

SAMMANDRAG

Målet för denna undersökning har varit att definiera storleken på den jämnt fördelade last som man borde tillämpa vid användning av glidyteanalysen inom den klassiska jordmekaniken, så att påkänningarna från den valda jämnt fördelade lasten så naturenligt som möjligt skall motsvara de påkänningar som en verklig rörlig tåg-belastning får till stånd i form av skjuvpåkänningar på glidytan. Den sålunda bestämbara jämnt fördelade lasten täcker de av tåget förorsakade lokala påkänningskoncentrationerna vid dimensioneringen av banans stabilitet.

Den belastning som nuförtiden används i stabilitetskalkylerna antas fördela sig jämnt över tågets hela längd när det står på stället. Även ett stilla stående tågs axlar belastar emellertid rälsen på samma sätt som en punktlast, och belastningen sprider sig via bansliprarna och banvallen till jordgrunden. I denna utredning har som exempel kontrollerna utförts med tre vagnstyper som representerar olika axellaster och under användning av tre olika banvallshöjder.

Granskningen har utförts, avvikande från sedvanliga stabilitetsgranskningsmetoder, genom att man definierat hur den spänningssituation som föranleds av axellasterna fördelas enligt Boussinesqis teori gällande fördelning av spänningarna från punktbelastningen. Man har dessutom räknat ut å ena sidan skjuvkrafterna från axlarna och å andra sidan skjuvkrafterna från den jämnt fördelade lasten på de förmodade glidyterna. Resultaten har framställts, vad gäller belastningslängden, som faktorer vilka återger storleken på den största belastningen från axlarna i förhållande till den största belastningen från en jämnt fördelad last på 80 kN/m. Vid beräkningen av spänningarna har man enbart beaktat spänningen från axellasterna, inte spänningarna från banvallens tyngd eller övriga geostatiska spänningar.

De lokala skjuvpåkänningarna från axlarna var på den lägsta banvallen, när de var som störst, 1,07-faldiga (axellast 250 kN), 1,24-faldiga (axellast 300 kN) och 1,28-faldiga (axellast 278,5 kN) jämfört med påkänningarna från en jämnt fördelad last på 80 kN/m.

Som slutledning kan konstateras beträffande den i granskningen som exempel använda materielen, att den inverkan som påkänningarna från axlarna har på jordgrunden gällande stabiliteten, i praktiken ändå ligger på de i RAMOs (Bantekniska bestämmelser och föreskrifter) tabell 3.7:2 framförda jämnt fördelade lasternas nivå eller under den, när de jämnt fördelade lasterna dimensionerats enligt de enskilda axellasterna. På högre banvallar är marginalerna större än på låga. För att generalisera de resultat som man kom fram till i undersökningen, kan marginalerna vara mindre nertill på det i detta sammanhang använda variationsområde för axellasten mellan 250 och 300 kN, än upptill.

Juvankoski, Markku: Determining of the loading of rail structure for stability analyses. Finnish Rail Administration. Rail Network Department. Helsinki 2007. Publications of the Finnish Rail Administration A 4/2007. 48 pages and 29 appendices. ISBN 978-952-445-183-3, ISBN 978-952-445-184-0 (pdf), ISSN 1455-2604.

Key words: rail structure, railway embankment, axle load, strip load, stability, shear stress, impact ratio

SUMMARY

The goal of this study is to define the dimensions of the line load, which should be applied when using the analysis with the method of slices of the classical soil mechanics. Thus, the stresses of the selected line load would as naturally as possible correspond to those stresses, which are generated by a real moving train load as shear forces on the gliding surface. The line load defined in this way will cover the impact of local stress concentrations caused by a train in the track stability design.

Nowadays, the loading used in the stability calculations is supposed to be evenly divided for the entire length of a standing train. However, even the axles of a halted train are loading the rail in a manner of point load, from where the load spreads to the subsoil through sleepers and embankment. In this study, analyses have been conducted with rolling stock representing three different axle loads and by using three different embankment heights as an example.

Apart from normal stability analyses, this analysis has been conducted by defining the stress state distributions from axle loads based on Boussinesq's stress distribution of a point load and by calculating the shear forces directed to the presumed gliding surfaces both from axles and from shear forces caused by an evenly distributed strip load. The results are presented as coefficients to the loading length, which describe the size of the biggest stress caused by axles in relation to the biggest stress caused by an even 80 kN/m strip load. In the stress calculations, the stress caused by axle loads has only been considered, not stresses caused by the weight of embankment or other geostatic stresses.

Local shear forces caused by axles were the greatest on the lowest embankment 1.07-fold (axle load 250 kN), 1.24-fold (axle load 300 kN) and 1.28-fold (axle load 278.5 kN) when compared to stresses generated by an even strip load of 80 kN/m.

As a conclusion, it can be stated that with the rolling stock used as examples in the analyses the impact of stresses on stability caused by axles to the subsoil are in practise, however, at the same level or below the level of the design strip loads, which are presented in table 3.7:2 of RAMO (Technical rules and guidelines for fixed installations of railway, part 3, 27 September 2005). The margins are greater for higher embankments than for lower embankments. When generalizing the results of the analyses, the margins may be minor at the lower end of the variation area, 250...300 kN, used in this connection than at the higher end.

ALKUSANAT

Tässä selvityksessä on tarkasteltu junan akselikuormista maapohjaan kohdistuvia jännityksiä. Nykyisin vakavuuslaskelmissa käytettävän kuormituksen otaksutaan jakautuvan tasaisesti koko paikallaan seisovan junan pituudelta. Pysähtyneenkin junan akselit kuitenkin kuormittavat pistekuorman tapaan kiskoa, josta kuormitus leviää rata-pölkkyjen ja penkereen välityksellä pohjamaahan. Tarkastelu on suoritettu kolmella eri akselipainoja edustavalla vaunukalustolla ja kolmea eri pengerkorkeutta esimerkkinä käyttäen.

Tutkimuksen tarkoituksena on ollut arvioida sitä, kuinka hyvin nykyisin vakavuuslaskennassa käytössä olevat mitoituskuormaotaksumat vastaavat akselikuormista aiheutuvaa jännitysten jakautumista maapohjassa. Tarkastelu on suoritettu tavanomaisista vakavuustarkastelumenetelmistä poiketen määrittämällä akselikuormista aiheutuvat jännitystilajakautumat Boussinesqin pistekuorman jännitysten jakautumaan perustuen ja laskemalla oletusliukupintoihin toisaalta akseleista kohdistuvat leikkausvoimat ja toisaalta tasaisesti jakautuneen nauhakuorman aiheuttamat leikkausvoimat. Tulokset on esitetty kuormituspituuden suhteen kertoimina, jotka kuvaavat akseleista aiheutuvan suurimman rasituksen suuruutta tasaisen 80 kN/m olevan nauhakuorman aiheuttamaan suurimpaan rasitukseen nähden. Jännitysten laskennassa on huomioitu ainoastaan akselikuormista aiheutuva jännitys, ei penkereen painosta aiheutuvia tai muita geostaattisia jännityksiä. Vertailu on tehty siis vain akseleittain vaihtelevan junakuorman ja nauhakuorman vaikutusten kesken.

Tämä raportti "Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiliteettitarkasteluihin" on laadittu VTT:n Materiaalit ja rakentaminen -osaamiskeskuksessa. VTT:ltä tutkimukseen ovat osallistuneet Jouko Törnqvist ja Markku Juvankoski. RHK:n suunnitteluohjeiden asiantuntijana on toiminut Jaakko Heikkilä Arcus Oy:stä. Raportin laatimista on valvonut projektiryhmä, jonka työskentelyyn ovat osallistuneet ylitarkastaja, tekn.lis. Erkki Mäkelä RHK:sta, dipl.ins. Jaakko Heikkilä Insinööritoimisto Arcus Oy:stä ja dipl.ins. Jouko Törnqvist VTT:ltä sekä dipl.ins. Markku Juvankoski VTT:ltä.

Helsingissä kesäkuussa 2007

Ratahallintokeskus
Rataverkko-osasto

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SAMMANDRAG.....	4
SUMMARY	5
ALKUSANAT.....	7
1 JOHDANTO.....	9
2 TARKASTELUN LÄHTÖTIEDOT	11
2.1 Maapohja.....	11
2.2 Kuormitus.....	11
3 LASKENTAMENETTELY	13
3.1 Periaate.....	13
3.2 Kuormituksen laskenta.....	15
3.3 Liukupintojen tarkastelupisteiden määrittäminen	19
3.4 Jännitysten laskenta liukupinnan laskentapisteissä.....	22
4 LASKENTATULOKSET	25
5 LASKENTATULOSTEN MUOTOILU KÄYTTÖÖN.....	30
6 LASKENTATULOSTEN JA RAMON KUORMITUSTEN VERTAILU	34
7 AKSELIEN SYSÄYSKUORMIIN LIITTYVÄT TARKASTELUT	38
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	42
9 TARPEET NYKYISEN MITOITUSMENETELMÄN TÄSMENTÄMISEKSI JA SUOSITUKSET JATKOSELVITYKSIKSI.....	46
LÄHDELUETTELO	48

LIITTEET

Liite 1...29. Tarkastelutapausten kuormitus-, leikkausvoima- ja leikkausjännitys-
kuvaajat

1 JOHDANTO

Tämän selvityksen tavoitteena on ollut tarkastella sen viivakuorman suuruutta, jota klassisen maamekaniikan liukupinta-analyysiä käytettäessä tulisi soveltaa, jotta valitun viivakuoman rasiitukset mahdollisimman luonnonmukaisesti vastaisivat niitä rasiituksia, jotka todellinen junakuorma liukupintaan leikkausrasiituksina aikaansaa.

Nykyisin junakuormien staattinen suuruus on rajoitettu arvoon 80 kN/radan juoksumetri. Junien akselikuormat sen sijaan vaihtelevat paljonkin käytetystä vaunukalustosta riippuen. Tyypillisesti suurin sallittu akselipaino on nykyisin 25 t. Ainoastaan Kerava-Lahti-oikoradalla sallittu akselipaino on nykyisellään 30 t.

Selvityksessä laskettiin Sr2-veturin vetämänä eri vaunukalustoista ja eri paksuisilla penkereillä akselikuormista ennakolta määritettyihin liukupintojen tarkastelupisteisiin vaikuttavat leikkausvoimat ja verrattiin niitä tasaisen kuormituksen (80 kN/m) vastaaviin pisteisiin aikaansaamiin leikkausvoimiin. Akselikuormista penkereen pintaan kohdistuva kuormitus radan pituussuunnassa määritettiin kimmoisella alustalla olevan palkin teorian pohjalta kiskon ja ratapölkkyjen toimiessa maanvaraisena palkkina. Radan pituus- ja poikkisuuntaan muodostetun pistekuormitusverkon aiheuttama jännitystila laskettiin liukupinnan tarkastelupisteissä pohjautuen Boussinesqin piste-kuorman jännitysten leviämisteoriaan. Liukupintojen tarkastelupisteissä eri piste-kuormista aiheutuneet jännitykset superponoitiin ja liukupinnan koko leikkausvoima saatiin summaamalla edelleen liukupinnan eri tarkastelupisteissä vaikuttavat liukupinnan suuntaiset leikkausvoimat. Jännitysten laskennassa on huomioitu ainoastaan akselikuormista aiheutuva jännitys, ei penkereestä aiheutuvia tai muita geostaattisia jännityksiä. Vertailu on tehty siis vain akseleittain vaihtelevan junakuorman ja nauhakuoman vaikutusten kesken. Saadut tulokset on esitetty kuormituspituuden suhteen kertoimina, jotka kuvaavat akseleista aiheutuvan suurimman rasiituksen suuruutta tasaisen 80 kN/m olevan nauhakuorman aiheuttamaan suurimpaan rasiitukseen nähden.

Laskentatyömäärän pitämiseksi kohtuullisena tämän selvityksen yhteydessä tarkasteltiin ainoastaan kolmesta eri vaunukalustosta aiheutuvia akselikuormia. Tarkastelussa käytetyt akselikuormat määritettiin junakuormaan 80 kN/radan juoksumetri nähden siten, että akselikuormat olivat 250 kN, 278,5 kN ja 300 kN. Erilaisten perustamisolosuhteiden vaikutuksen huomioimiseksi tarkasteluissa käytettiin kolmea eri pengerkorkeutta, joilla kullakin tarkasteltiin kolmea erityyppistä laskennallisen liukupinnan sijainnin vaikutusta.

Jo ennen tutkimuksen aloittamista oltiin tietoisia siitä, että kalustossa olevat lovipyörät tai radassa olevat epätasaisuudet vaikuttavat ns. sysäyskertoimena akseleista maapohjaan kohdistuviin rasiituksiin. Paikallisen sysäyskuorman vaikutusten tarkastelut rajattiin siis tietoisesti tämän tarkastelun ulkopuolelle. Sysäysvoimat vaikuttavat vain liikkuvalla junalla. Tämän tiedettiin taas vääjäämättä nostavan esille tarpeen arvioida maamateriaalilla käytettävää lujuutta nopeassa kuormitustilanteessa. Erityisesti tarve keskittyy saviin, siltteihin ja turpeisiin. Näiden ilmiöiden tarkastelua ei katsottu olevan kokonaisuutena mahdollista sisällyttää tähän selvitykseen, vaikka lovipyörän ja radan epätasaisuuden vaikutusta yhden akselikuorman ja pengerkorkeuden osalta yhteydessä onkin esimerkinomaisesti tarkasteltu. Nämä seikat on kuitenkin pidettävä mielessä

selvityksen tuloksia arvioitaessa ja käytäntöön sovellettaessa. Selvityksessä tehdyt laskelmat on suoritettu MathCad- ja excel-ohjelmaympäristössä.

2 TARKASTELUN LÄHTÖTIEDOT

Tarkastelussa käytettävät lähtöarvot sovittiin yhdessä Ratahallintokeskuksen kanssa.

2.1 Maapohja

Boussinesqin jännitysten jakaantumista tarkasteltaessa maapohjan ominaisuudet eivät sinällään juurikaan vaikuta jännitysten jakautumiseen. Maapohjaa ja pengertä koskevat lähtöarvot tarvitaan kuitenkin ratkaistaessa kimmoisella alustalla olevan palkin avulla akselikuormien jakautumista ja tarkastelussa käytettävien liukupintojen määrittämiseen. Tarkasteluissa käytettäväksi pohjamaaksi valittiin pehmeä savikko. Savikon paksuudeksi valittiin 5 m ja saven moduuliksi $E = 10$ MPa ja Poisson luvuksi $\nu = 0.42$. Ratapenkereellä käytettäväksi moduuliksi valittiin $E = 100$ MPa.

Tarkastelussa käytettäviä liukupintoja valittaessa sovittiin pohjamaan pinnassa käytettäväksi yhden liukupinnan osalta 1 m paksuista kuivakuorikerrosta, jonka leikkauslujuus on 50 kPa ja toisessa leikkauslujuutena kuivakuoriosuudellakin suoraan pohjamaalla käytettävää leikkauslujuutta 10 kPa. Pohjamaan päällä olevien penkereiden kokonaiskorkeudet sepelitukikerros huomioiden (penger + sepelitukikerros 55 cm) olivat 1,55 m, 2,55 m ja 3,55 m.

2.2 Kuormitus

Kaikissa tarkastelutapauksissa junakuormaa mallinnettaessa käytettäväksi veturityypiksi valittiin veturi Sr2.

Ensimmäiseen kuormitustapaukseen veturin Sr2 vetämiksi vaunuiksi valittiin Taimn-tvaunut muutettuna siten, että akselipainot nostettiin arvoon 250 kN ja nauhakuorma arvoon 80 kN/m. Akselipainojen ja nauhakuorman korotus oli lähinnä nimellinen, kuten taulukosta 1 voidaan havaita.

Toiseksi kuormitustapaukseksi valittiin Sr2-veturi ja hypoteettinen "RASKO"-vaunu, jonka akselikuorma on 300 kN/akseli ja nauhakuorma 80 kN/m. "RASKO"-vaunussa pyörien k/k-väli on 2,0 m, telien väli vaunussa 9 m ja peräkkäisten vaunujen teliväli 6 m.

Kolmanneksi kuormitustapaukseksi valittiin veturin Sr2 vetäminä korkealaitaisia avovaunuja, joiden akselikuormitus laskettiin nauhakuorman 80 kN/m mukaan.

Tarkastelussa eri kuormitustapauksissa käytettävät veturi- ja vaunutiedot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kuormitustapauksissa käytettävät veturi- ja vaunutiedot

Veturi- ja vaunutiedot	Akseleita/ teli	Teliväli	Pyörä- väli	Puskumatka telikeskiöstä	Pyörä- kuorma	Akseli- kuorma	Teli- kuorma	Nauha- kuorma	Pituus
	kpl	m	m	m	kN	kN	kN	kN/m	m
Sr2	2	11,00	2,80	3,85	102,03	204,05	408,1	43,67	18,69
Taimn-t	2	6,50	1,80	3,00	122,63	245,25	490,5	78,48	12,50
muutoksin					125,00	250,00	500,0	80,00	
RASKO	2	9,00	2,00	3,00	150,00	300,00	600,0	80,00	15,00
Vok-korkealaitainen avovaunu	2	8,65	1,80	2,64	111,60	223,18	446,4	64,13	13,92
muutoksin						278,54		80,00	

Myöhemmin tuloksien esittämisen yhteydessä tarkastelut on nimetty tunnuksin, joissa K1, K2 ja K3 vastaavat akselikuormia 250 kN, 300 kN ja 278.5 kN. Tarkastelun tunnus sisältää vielä tarkastelussa käytetyn pengerkorkeuden tunnuksen P1, P2 tai P3, jotka vastaavasti tarkoittavat pengerkorkeuksia 1,55 m, 2,55 m ja 3,55 m sekä tarkastelussa käytetyn liukupinnan tunnuksen L1, L2 ja L3. Kaikkiaan tarkastelutapauksia oli yhteensä 27. Tarkastelutapauksilla käytettyjä tunnuksia selventää taulukko 2.

Taulukko 2. Tarkastelutapausten tunnukset. K kuormitus, P pengerkorkeus, L liukupinnan tunnus

Kuormitus / Pengerkorkeus	K1, akselikuorma 250 kN	K2, akselikuorma 300 kN	K3, akselikuorma 278.5 kN
P1 1,55 m	K1P1L1	K2P1L1	K3P1L1
	K1P1L2	K2P1L2	K3P1L2
	K1P1L3	K2P1L3	K3P1L3
P2 2,55 m	K1P2L1	K2P2L1	K3P2L1
	K1P2L2	K2P2L2	K3P2L2
	K1P2L3	K2P2L3	K3P2L3
P3 3,55 m	K1P3L1	K2P3L1	K3P3L1
	K1P3L2	K2P3L2	K3P3L2
	K1P3L3	K2P3L3	K3P3L3

3 LASKENTAMENETTELY

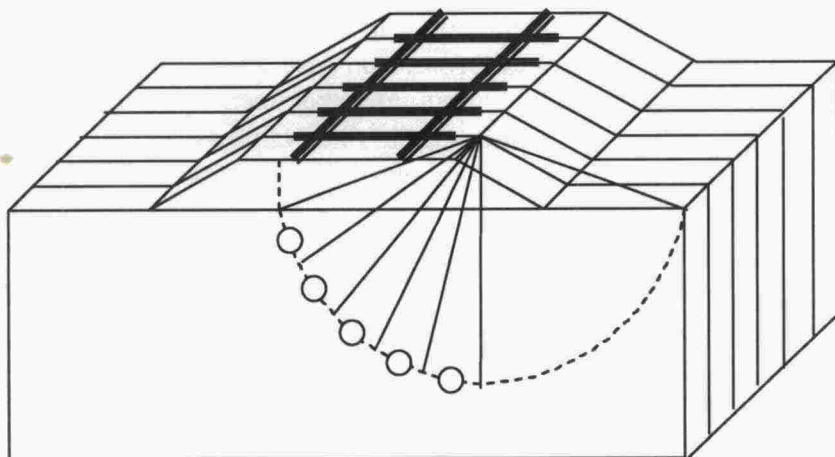
3.1 Periaate

Tarkasteluissa käytetty laskentamenettelyn lähestymistapa on lyhyesti seuraava.

Ratarakenne ja maapohja radan alla on jaettu radan pituussuunnassa 0,5 metrin levyisiin lamelleihin. Peräkkäisten lamellien kuormat ovat radan pituussuunnassa erisuuruisia ja kuormat riippuvat vaunujen geometriasta (akselivälit, telivälit, peräkkäisten vaunujen telien välit) ja akselien painoista. Akselikuormat on muutettu ratapenkereen pinnassa lamelleittain vaikuttavaksi kuormaksi kimmoisella alustalla olevan palkin teoriaa käyttäen. Kiskojen ja pölkytyksen toimiessa kimmoisella alustalla olevana palkkina on ensin laskettu yksittäisen akselin sijainnista ja kuormasta aiheutuva painuma. Kaikista junan akselien sijainneista ja kuormista aiheutuvat painumat on tämän jälkeen superponoitu junan aiheuttaman painumaviivan määrittämiseksi. Alustaluvun avulla on edelleen takaisinlaskettu kuormituslamellissa vaikuttava kuormitus lamellin painuman avulla. Koska maanvarainen palkki tietyssä kuormitusilanteessa voi irrota maasta ja siitä aiheutuisi vetoa penkereen suuntaan, on vetoa aiheuttavat lamellikuormat poistettu tarkasteluissa käytetyistä kuormituksista.

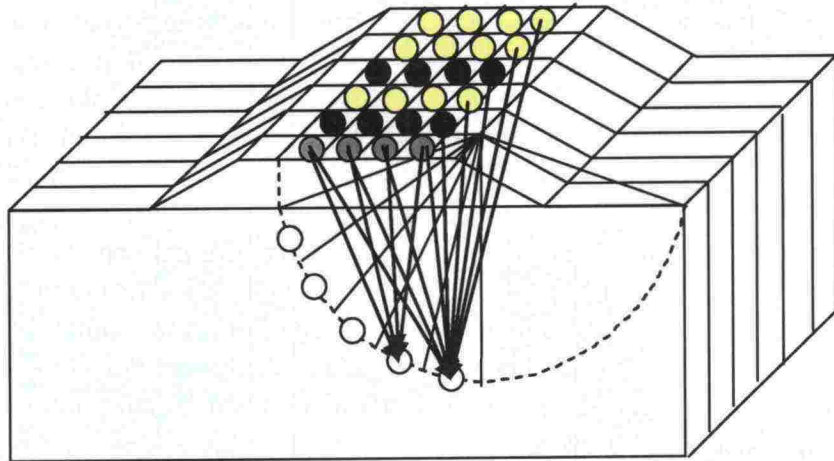
Radan poikkisuunnassa pölkytyksen on oletettu jakavan kuorman tasaisesti. Jännitystilän laskennassa poikkisuuntakin on kuitenkin jaettu viiteen osa-alueeseen (osa-alueen leveys 0,5 m), joista keskimmäistä osa-aluetta ei kuitenkaan ole kuormitettu. 2,5 m levyiseen kuormituslamelliin kohdistuva voima on siis jaettu siten, että alueen molemmissa päissä on kaksi $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ kokoista aluetta, joihin pistekuorma kohdistuu.

Radan poikkisuuntaan on määritetty ratapölkyn päästä alkavat ympyränmuotoiset liukupinnat. Liukupintoihin liittyvät tarkastelut on tehty radan pituussuunnassa 1 m levyiselle tarkastelulamellille. Liukupinta on oletettu kussakin tarkastelulamellissa vakioksi. Tarkastelulamellin liukupinta on jaettu maapohjassa kulkevalla osuudellaan liukupinnan alimpaan kohtaan saakka liukupinnan kaaren matkalla samanpituisiin osa-alueisiin jännitysten laskentapisteiden määrittämiseksi. Laskentapisteet on sijoitettu osa-alueen keskelle (kuva 1).



Kuva 1. Liukupinnan laskentapisteet pohjamaassa (avoin ympyrä). Vain ensimmäisen lamellin pisteet on esitetty.

Kunkin tarkastelulamellin liukupinnan osa-alueisiin (laskentapisteisiin) kohdistuvat jännitykset on laskettu kaikkien eri kuormituslamellien osa-alueista aiheutuvien jännitysten summana. Koska jännitysten laskenta on kimmoteorian mukainen, on superpositioperiaate voimassa. Kuvassa 2 on havainnollistettu kaikkien kuormitusalueiden vaikutusta liukupinnan tarkastelupisteisiin.



Kuva 2. Periaatekuva kunkin kuormituspisteen vaikutuksen huomioinnista tarkastelupisteen jännitystilaan. Penkereen päällä olevat pistekuormat (täytetty ympyrä) kuvaavat lamelleittain erisuuruisia kuormia. Vain osa kuormituspisteiden vaikutuksesta osaan laskentapisteistä on esitetty kuvassa.

Kussakin tarkastelulamellissa on laskettu osa-alueittain pystysuuntaisesta ja radan poikisuuntaisesta vaakajännityksestä aiheutuvat liukupinnan tangentin suuntaisesti vaikuttavat voimat. Osa-alueiden leikkausvoimat on summattu yhteen lamellissa vaikuttavaksi kokonaisleikkausvoimaksi. Leikkausjännitys on laskettu leikkausvoimasta.

Tarkastelulamelleittain saaduista voimista koko junan pituudelle muodostuneesta voiman jakautumafunktiosta on poimittu 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 10 m, 20 m ja 30 metrin mittaisten alueiden keskiarvojen maksimiarvot. Nämä arvot kuvaavat siis vastaavalla matkalla keskimäärin esiintyvää suurinta leikkausvoimaa. Tätä voimaa on verrattu vastaavalla junapituudella olevan tasaisen 80 kN/m nauhakuorman aiheuttamaan leikkausvoimaan. Leikkausvoima on tasaisen kuormituksen tapauksessa laskettu vastaavaa pengerkorkeutta ja liukupintaa käyttäen kuin mitä akselikuomien tapauksessa on käytetty. Tasaisen kuormituksen aiheuttama voima on määritetty 30 m mittaisen tarkastelualueen keskiarvon maksimina.

Jännitysten laskennassa on huomioitu ainoastaan akselikuormista aiheutuva jännitys, ei penkereen painosta aiheutuvia kuormituksia tai muita geostaattisia jännityksiä. Vertailu on tehty siis vain akseleittain vaihtelevan junakuorman ja nauhakuoman vaikutusten kesken. Lopulliset tulokset on laskettu ja esitetty 1 m välein (tarkasteltujen liukupintojen välimatka radan pituussuunnassa).

Tarkastelussa saadut tulokset on esitetty kuormituspituuden suhteen kertoimina, jotka kuvaavat akseleista aiheutuvan suurimman rasituksen suuruutta tasaisen 80 kN/m olevan nauhakuorman aiheuttamaan suurimpaan rasitukseen nähden.

Tarkastelussa käytetyissä laskentatiedoissa ratapengertä on mallinnettu yhteensä 100 metrin matkalta. Koska kuormituslamellien pituus radansuunnassa on 0,5 m ja leveys 2,5 m, ja näissä kuormitusalueita on kussakin 5, on kuormitusalueita 100 m matkalla yhteensä 1000 kappaletta. Radan poikkisuunnassa kuormituslamellin keskimmaiseen alueeseen ei kuitenkaan ole kohdistettu kuormitusta. Tasaista nauhakuormaolettamusta käytettäessä tasainen kuorma on aloitettu kuormituslamellien kohdasta 7,5 m (kuormitusalue 0...100 metriin). Akselikuormitusta laskettaessa veturin ensimmäinen akseli on sijoitettu 10 m päähän tarkastelualueen alusta. Kuormituslamellien kuormitukseksi muutettuna kuormitus on käytännössä alkanut 6,5 m päässä tarkastelualueen päästä. Akselikuormalla 250 kN (kuormitustapaus K1) junan pituus oli 64,15 m, akselikuormalla 300 kN 74,25 m (kuormitustapaus K2) ja akselikuormalla 278,5 kN 70,23 m (kuormitustapaus K3). Kussakin tarkasteltavassa vaunuyhdistelmässä oli veturin Sr2 ohella neljä vaunua.

Tulosten esittämisen yhteydessä on esitetty tarkastelussa saadut kertoimet sellaisenaan sekä ns. päätyvaikutusefektillä korjattuina. Päätyvaikutusefektillä tarkoitetaan tässä vaikutusta, joka syntyy määrämittaisen (radan suunnassa suhteellisen lyhyen) liukupinnan päiden muodostamasta leikkausvastuksesta. Liukupinnan ollessa lyhyt liukupinnan päiden leikkausvastus saattaa olla huomattava verrattuna liukupinnan vaipan pinnalla syntyvään leikkausvastukseen nähden. Tämä pätee kuitenkin vain sellaisessa tapauksessa, joissa kuormitus ja sen alla oleva liukupinta on siis suhteellisen lyhyt.

3.2 Kuormituksen laskenta

Lamellien kuormitusten määrittäminen

Lamellien kuormitukset radan pituussuunnassa määritettiin laskemalla akselikohtaisesti maanvaraisen palkin painumat kimmoisella alustalla olevan palkin teoriaa hyväksikäyttäen ja superponoimalla eri akselien aikaansaamat painumat. Lamelliin kohdistuva kuormitus määritettiin kuormituslamellin painuman ja maapohjan jousivakion perusteella. Maanvaraisen palkin (ratarakenne ja pengeri) jäykkyytenä käytettiin kiskoparia UIC60 vastaavaa jäykkyyttä ($EI = 12220 \text{ kNm}^2$). Pölkkyjen oletettiin jakavan kuormitus tasaiseksi radan poikkisuunnassa.

Alustaluku laskettiin akselikuormista junan pituudella olevan akselikuormien summan, junan vaikutuspituuden ja ratapölkkyjen leveyden avulla määritettävän pohjapaineen q_1 ja tästä kuormasta aiheutuvan keskimääräisen painuman avulla.

$$k_s = \frac{q_1}{y_{ka}}$$

missä

k_s on alustaluku

q_1 kuormituspinnassa vaikuttava tasainen kuormitus

y_{ka} kuormituspinnan keskimääräinen painuma

Painuma laskettiin ratapenkereen, pohjamaan yläosan ja laskelmissa käytetyn pohjamaan alaosan keskimääräisten jännitysten ja kerrosten moduulien avulla. Penger-materiaalia kuvaavan kerroksen moduulina käytettiin valittua arvoa 100 MPa ja samoin savelle sille valittua arvoa 10 MPa. Ratapenkereen paksuus vaihteli tarkasteluissa valittujen pengerkorkeuksien mukaan. Pohjamaan yläosaa kuvaavan pehmeikön paksuus oli 5 m, samoin kuin jäykemmän savikerrosten alapuolta kuvaavan kerroksen paksuus. Jäykemmällä alakerroksella käytettiin samaa moduulia kuin ratapenkereellä.

Yksittäisestä akselikuormasta aiheutuva painumafunktio laskettiin kaavasta /1/

$$y(x) = \frac{-(P\lambda)(\cos(\lambda x) + \sin(\lambda x)) \times e^{-(\lambda x)}}{2k_s}$$

missä

$y(x)$ on painuma etäisyyden funktiona kuormituskohdasta

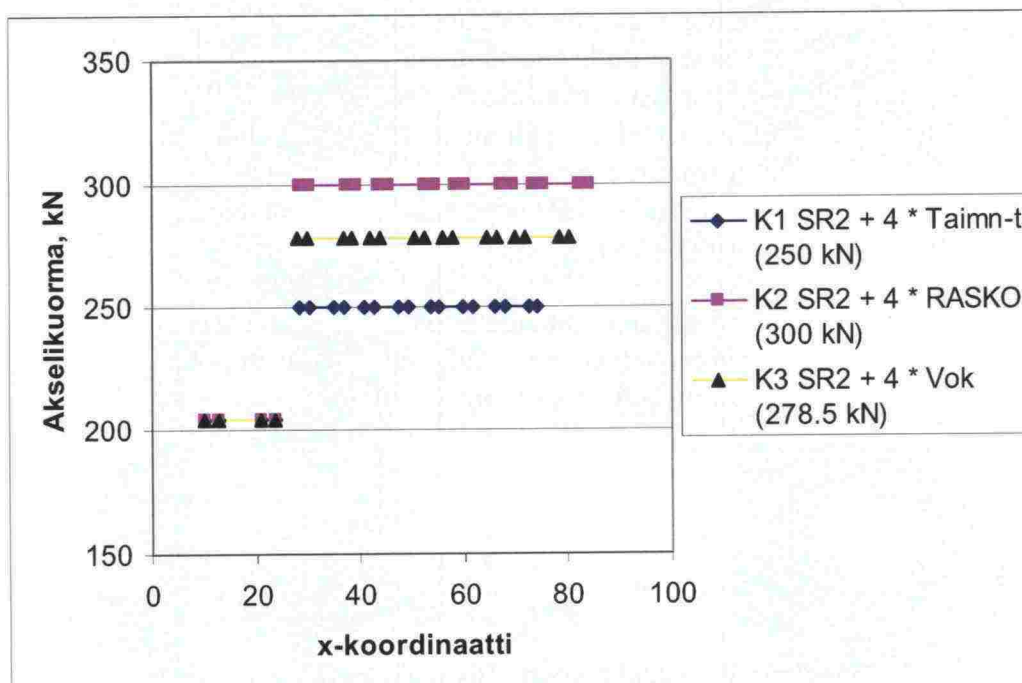
P akselikuorma

λ apumuuttuja

$$\lambda = \left[\frac{k_s}{4EI} \right]^{0.25}$$

Kuormituksen jakautuminen lamelleille laskettiin MathCad-ohjelmalla. Ohjelmassa akselien sijainnit ja akselikuormat voidaan kukin määrittää erikseen. Tämä mahdollistaa tarvittaessa staattisten akselikuormien akselikohtaisten syyäslisien käytön simuloimaan esimerkiksi yksittäisten pyörien lovivaikutusta.

MathCad-ohjelmaan annettujen eri kuormitustapausten mukaiset akselien sijainnit ja akselien kuormitukset on esitetty kuvassa 3 ja taulukossa 3.

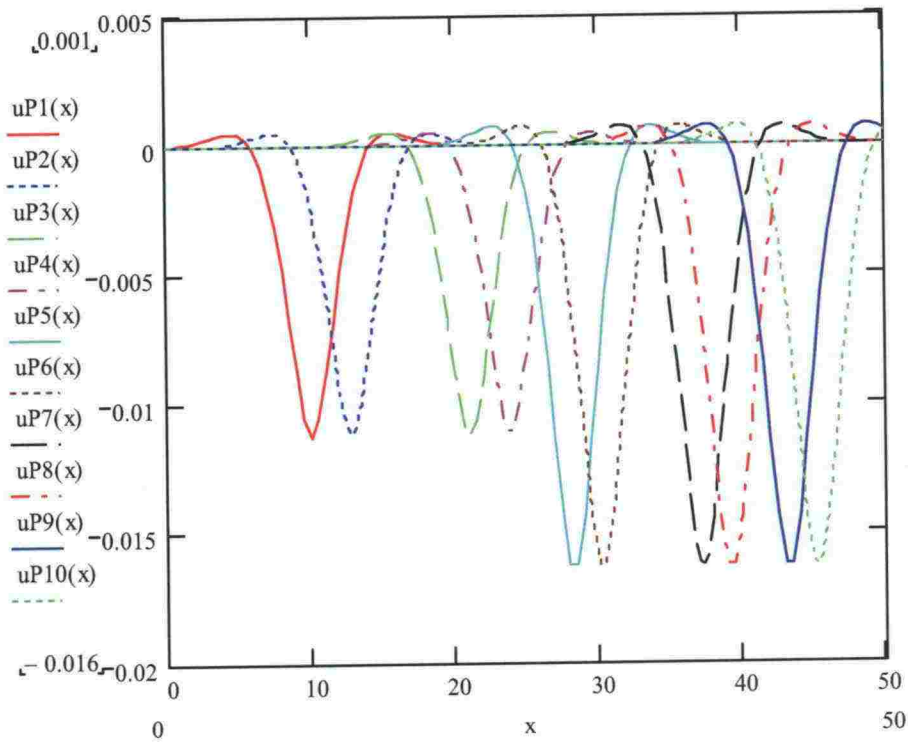


Kuva 3. Akselien sijainnit ja akselikuormat eri kuormitustapauksissa.

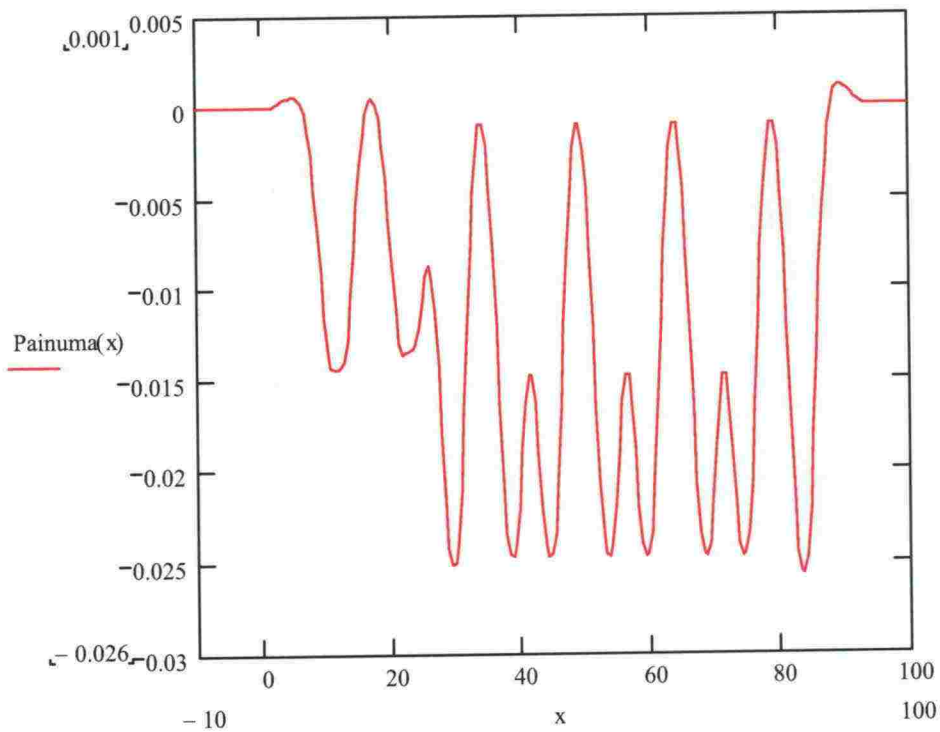
Taulukko 3. Akselien sijainnit ja akselikuormat eri kuormitustapauksissa

Kuormitustapaus K1			Kuormitustapaus K2			Kuormitustapaus K3		
Akselin nro	Paikka, x-koord.	Akseli-kuorma	Akselin nro	Paikka, x-koord.	Akseli-kuorma	Akselin nro	Paikka, x-koord.	Akseli-kuorma
1	10.00	204,05	1	10.00	204,05	1	10.00	204,05
2	12.80	204,05	2	12.80	204,05	2	12.80	204,05
3	21.00	204,05	3	21.00	204,05	3	21.00	204,05
4	23.80	204,05	4	23.80	204,05	4	23.80	204,05
5	28.35	250,00	5	28.24	300,00	5	27.98	278,54
6	30.15	250,00	6	30.24	300,00	6	29.78	278,54
7	34.85	250,00	7	37.24	300,00	7	36.63	278,54
8	36.65	250,00	8	39.24	300,00	8	38.43	278,54
9	40.85	250,00	9	43.24	300,00	9	41.91	278,54
10	42.65	250,00	10	45.24	300,00	10	43.71	278,54
11	47.35	250,00	11	52.24	300,00	11	50.56	278,54
12	49.15	250,00	12	54.24	300,00	12	52.36	278,54
13	53.35	250,00	13	58.24	300,00	13	55.84	278,54
14	55.15	250,00	14	60.24	300,00	14	57.64	278,54
15	59.85	250,00	15	67.24	300,00	15	64.49	278,54
16	61.65	250,00	16	69.24	300,00	16	66.29	278,54
17	65.85	250,00	17	73.24	300,00	17	69.77	278,54
18	67.65	250,00	18	75.24	300,00	18	71.57	278,54
19	72.35	250,00	19	82.24	300,00	19	78.42	278,54
20	74.15	250,00	20	84.24	300,00	20	80.22	278,54

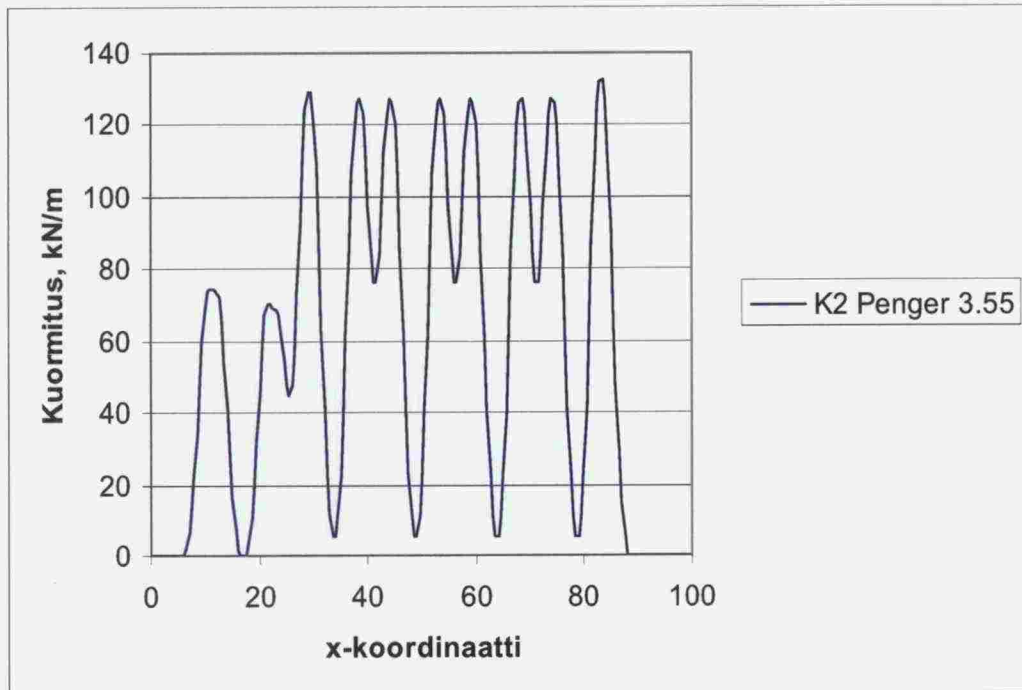
Kuvassa 4 on esitetty esimerkkinä kuormitustapauksessa K2 ensimmäisestä 10 akselista aiheutuvat yksittäiset painumat, kuvassa 5 kaikista akselista aiheutuvien painumien summa ja kuvassa 6 painumista kuormituslamelleille lasketut kuormitukset, kun negatiivisiksi (vedolle) jääneet kuormitusosuudet on poistettu. Paksuimmalla penkereellä kuormitushuiput muodostuivat jonkin verran terävämmiksi kuin ohuemmalla penkereellä, mutta pengerkorkeuden vaikutukset sinällään muodostuneeseen kuormaan olivat vähäiset, suurimmillaan alle 5 % luokkaa.



Kuva 4. Ensimmäisten 10 akselin aiheuttamat yksittäiset painumat kuormitustapauksessa K2, kun pengerkorkeus on 3,55 m.



Kuva 5. Kaikkien 20 akselin kuormitusten aiheuttamat painumat kuormitustapauksessa K2, kun pengerkorkeus on 3,55 m.



Kuva 6. Kuormituslamelleihin kohdistuva kuormitus kuormitustapauksessa K2, kun pengerkorkeus on 3,55 m.

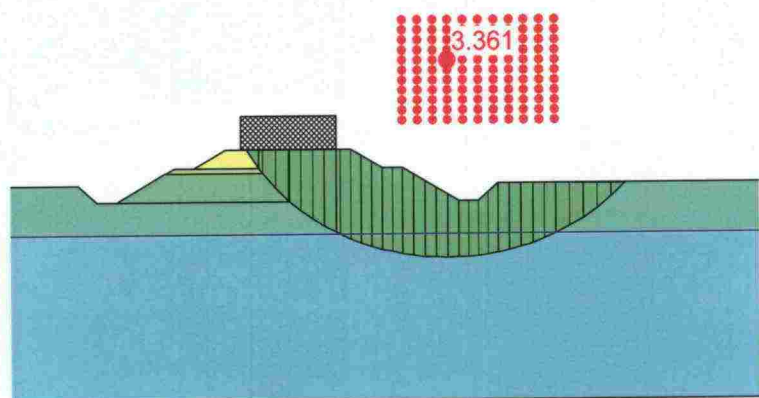
3.3 Liukupintojen tarkastelupisteiden määrittäminen

Tarkastelussa käytettäville penkereille määritettiin kullekin kolme tyypillistä liukupintaa. Tyypillisten liukupintojen valinnalla pyrittiin yksinkertaisesti saamaan laskentoihin aikaan riittävä tilanteiden edustavuus, jotta lopputulokset olisivat yleistettäviä. Alustavat liukupinnat määritettiin SLOPE/W-ohjelmalla käyttäen penkereeseen kohdistuvalle kuormitukselle 80 kN/m olevaa nauhakuormaa. Laskennan geometriaa vaihdeltiin siten, että maakerrosten paksuudet ja vedenpinnan taso (1 m penkereen alapinnan alapuolella) eri pengerkorkeuksilla pysyivät samoina. Liukupinnan L1 määrittämisessä penkereen alla olevan 1 m paksuisen kuivakuoren leikkauslujuutena käytettiin arvoa 50 kPa ja sen alapuolisen pehmeän pohjamaan leikkauslujuutena arvoa 10 kPa. Liukupinnan L2 määrittämisessä kuivakuorenkin leikkauslujuus oli 10 kPa. Liukupinta L3 määritettiin käyttäen kuivakuorikerroksen leikkauslujuudella jälleen arvoa 50 kPa, mutta vetohalkeamaa penkereen alapinnan muodostamaan tasoon saakka.

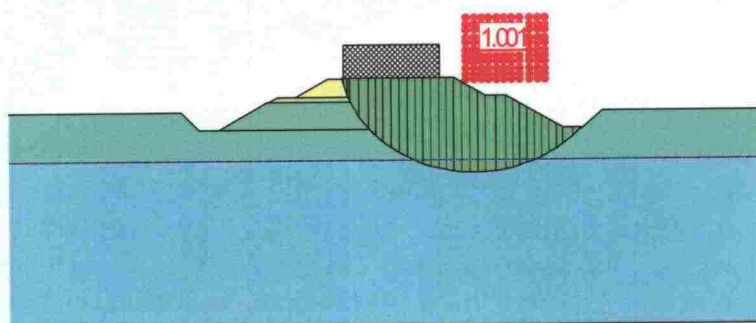
Liukupintojen L1 ja L3 varmuuskertoimet matalimmalla penkereellä P1 olivat $F = 3,36 \dots 2,40$, keskimmaisella penkereellä P2 $F = 2,32 \dots 1,66$ ja korkeimmalla penkereellä P3 $F = 1,68 \dots 1,19$. Liukupinnalla L2 (ei kuivakuorta) kaikkien penkereiden varmuuskertoimet olivat $F = 1$ tai sen alle. Kuvassa 7 on esitetty matalimmalla pengerkorkeudella SLOPE/W-ohjelmalla lasketut liukupinnat.

SLOPE/W-ohjelmalla lasketut liukupinnat L1 ja L2 sovitettiin kulkemaan tarkasti tarkastelussa käytettävän koordinaatiston origoksi valitun ratapölkyn pään kohdalta ja liukupinnan koordinaatit muutettiin vastaamaan tarkastelussa käytettävää koordinaatistoa. Liukupinnat jaettiin penkereen alapinnasta liukupinnan "alakuolo kohtaan" saakka liukupinnan suunnassa viiteen yhtä pitkään osuuteen. Näiden osuuksien keskelle määritettiin tarkastelupisteet, joissa radan penkereen pinnassa vaikuttavista piste-kuormista syntyvät jännitykset laskettiin.

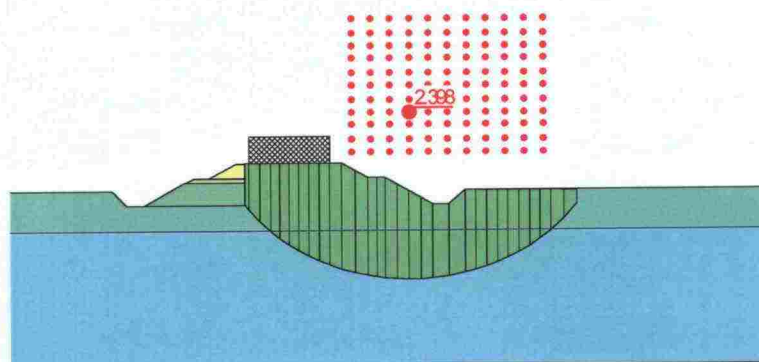
Eri penkereiden geometria ja tarkastelussa käytettyjen liukupinnan osuuksien muodot ja liukupintaan liittyvät tarkastelupisteet on esitetty kuvissa 8...10. Liukupintojen tarkastelupisteiden koordinaatit on esitetty taulukossa 4.



a.

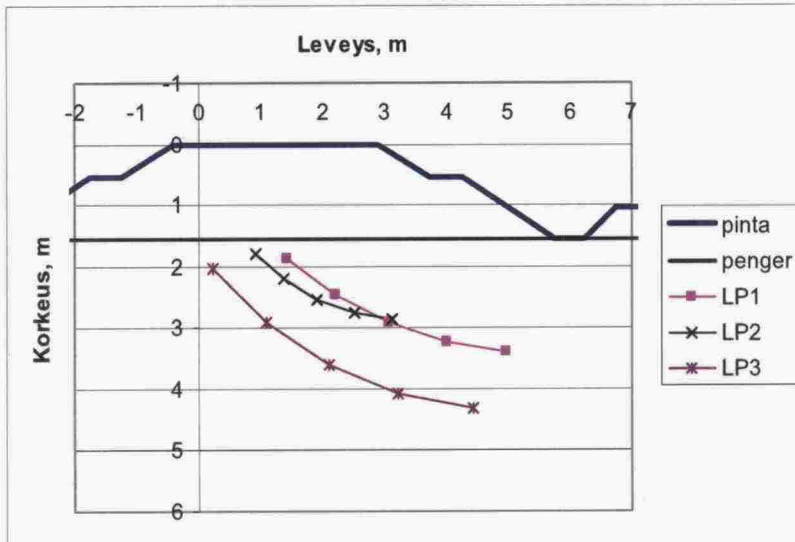


b.

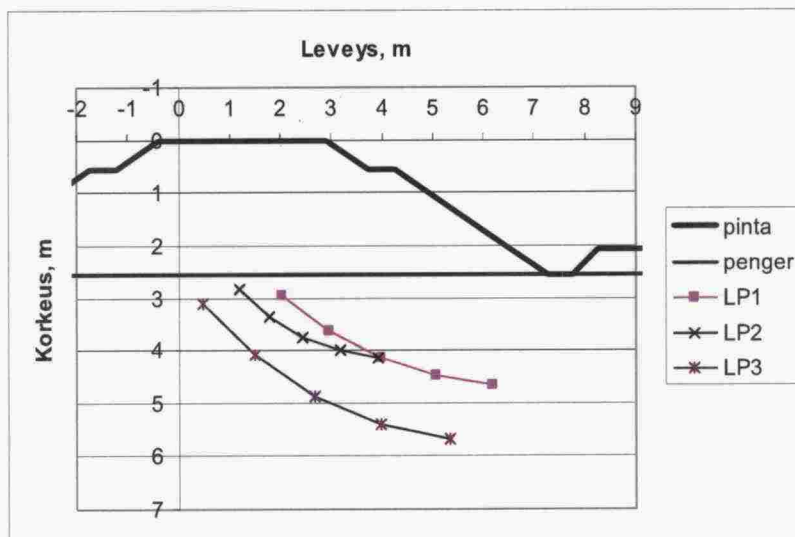


c.

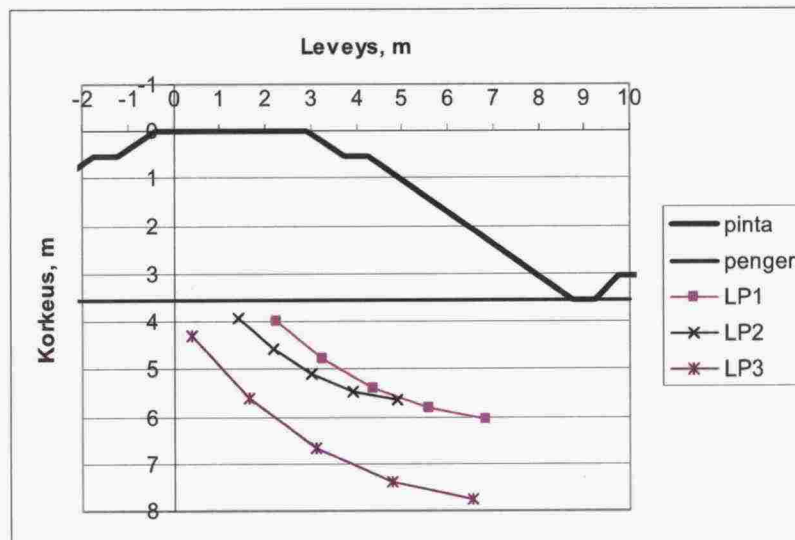
Kuva 7. SLOPE/W-ohjelmalla lasketut varmuuskertoimet eri liukupinta-olettamusten mukaisilla maapohjilla matalimmalla penkereellä. a. Kuivakuori mukana, b. Ei kuivakuorta, c. Kuivakuori mukana, vetohalkeama penkereen alapinnan tasoon.



Kuva 8. Penkereen P1 ($h = 1.55\text{m}$) liukupinnat ja tarkastelupisteet.



Kuva 9. Penkereen P2 ($h = 2.55\text{m}$) liukupinnat ja tarkastelupisteet.



Kuva 10. Penkereen P3 ($h = 3.55\text{m}$) liukupinnat ja tarkastelupisteet.

Taulukko 4. Liukupintojen tarkastelupisteiden koordinaatit

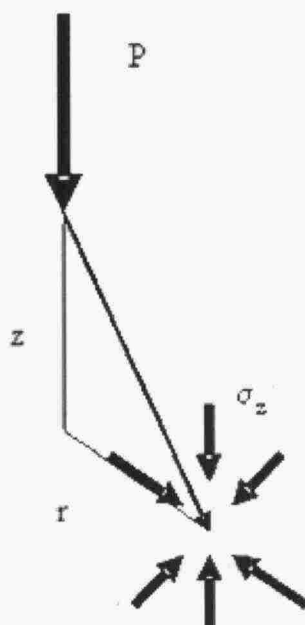
Penger 1					
Liukupinta L1		Liukupinta L2		Liukupinta L3	
z	y	z	y	z	y
1.89	1.43	1.79	0.90	2.05	0.23
2.47	2.21	2.20	1.38	2.92	1.09
2.93	3.08	2.53	1.92	3.61	2.10
3.23	4.00	2.75	2.50	4.08	3.23
3.39	4.96	2.86	3.12	4.32	4.44
Penger 2					
Liukupinta L1		Liukupinta L2		Liukupinta L3	
z	y	z	y	z	y
2.94	2.04	2.84	1.20	3.11	0.49
3.62	2.96	3.34	1.78	4.10	1.49
4.14	3.98	3.74	2.44	4.87	2.67
4.50	5.06	4.01	3.16	5.40	3.97
4.68	6.19	4.14	3.92	5.68	5.36
Penger 3					
Liukupinta L1		Liukupinta L2		Liukupinta L3	
z	y	z	y	z	y
4.00	2.26	3.93	1.43	4.30	0.40
4.79	3.25	4.59	2.16	5.62	1.64
5.40	4.37	5.10	3.00	6.66	3.12
5.82	5.57	5.46	3.92	7.38	4.79
6.03	6.83	5.64	4.89	7.74	6.56

3.4 Jännitysten laskenta liukupinnan laskentapisteissä

Yksittäisistä kuormituslamellin kuormista liukupinnan laskentapisteeseen muodostuva jännitystila on määritetty perustuen Boussinesqin pistekuorman aiheuttamaan jännitykseen tarkastelupisteessä (kuva 11).

Jännitystilan laskentaa varten valmisteltiin excel-tiedosto, joka käyttää lähtötietoina ennalta annettuja kuorman sijaintipisteitä. Vaikuttava kuormitus siis määräytyy alustalukuteorian mukaan lasketun kuormituselementin kuorman mukaan. Toisena ohjelman lähtötietona on tarkastelussa käytettävän liukupinnan tarkastelupisteiden koordinaatit syvyys- ja sivusuunnassa. Kolmantena lähtötietona annetaan ensimmäisen tarkasteltavan liukupinnan muodostaman lamellin radan pituussuuntainen koordinaatti. Näiden lähtötietojen avulla valmistellaan lähtötiedot MathCad-ohjelmaan, jossa varsinainen jännitystilan laskenta suoritetaan ja josta saadut tulokset palautetaan excel-tiedostoon jatkokäsittelyä varten. Vaikka excel-tiedosto sisältää kaikki radan pituus- ja poikkisuunnassa vaikuttavien kuormituselementtien ($0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$) kuormat, suoritetaan lähtötietojen valmistelu ja lopulta tulosten laskenta tässä tiedossa kerralla ainoastaan 10 m matkalla laskentakapasiteetin mahdollistamiseksi. Tarkastelussa käytetyn kokonaismatkan (100 m) tarkastelu on suoritettu superponoimalla 10 a 10 m osa-alueen tulokset yhteen.

Lähtötietoina laskentapisteiden jännitystilojen laskennassa käytetään pistekuorman suuruutta, pistekuorman ja tarkastelupisteen välisiä etäisyyksiä ja kulmia. Excel-tiedostossa valmistellut lähtötiedot luetaan MathCad-ohjelmaan.



Kuva 11. Pistekuorman aiheuttama jännitystila maassa Boussinesqin mukaan. Kuvassa on esitetty vain pystysuorat, tangentialiset ja radiaaliset jännitykset.

Boussinesqin pistekuorman jännitystenjakautuman mukaiset sylinterikoordinaatistossa lasketut jännityskomponentit on muutettu yhteenlaskua varten suorakulmaisen koordinaatiston mukaisiksi jännityskomponenteiksi. Kullakin kuormitusosa-alueella vaikuttavan kuorman aiheuttama jännityslisäys on laskettu yhteen kunkin tarkastelulamellin liukupinnan tarkastelupisteissä ja niistä aiheutuvat voimat on laskettu tarkastelupisteissä vaikuttavien jännitysten ja tarkastelupisteisiin liittyvän pysty- ja vaakasuuntaisten pinta-alojen avulla. Pystysuuntaiset voimat ja radan poikkisuuntaiset vaakavoimat on projisoitu liukupinnan laskentapisteen tangentin suuntaiseen tasoon tarkastelupisteissä ja summattu koko liukupinnalla vaikuttavaksi kokonaisleikkausvoimaksi.

MathCad-ohjelmassa jännityskomponentit, pystysuuntainen jännitys σ_z , radiaalinen jännitys σ_r , tangentialinen jännitys σ_θ ja leikkausjännitys τ_{rz} lasketaan sylinterikoordinaatistossa kaavoilla /2/

$$\sigma_z = 3Q \times \frac{z^3}{2\pi R^5}$$

$$\sigma_r = - \left[\frac{Q}{2\pi R^2} \right] \left[\frac{-3r^2 z}{R^3} + \frac{[(1-2\nu)R]}{R+z} \right]$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{-(1-2\nu)Q}{2\pi R^2} \left[\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} \right]$$

$$\tau_{rz} = 3Qr \frac{z^2}{2\pi R^5}$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

$$\tau_{\theta z} = 0$$

$$\tau_{zr} = \tau_{rz}$$

Q on pistekuorma

z tarkastelusyvyyys

R kuormituspisteen ja tarkastelupisteen välinen etäisyys

r pisteen etäisyys kuormituspisteen kautta kulkevasta z-akselista

\nu Poisson-luku

Sylinterikoordinaatistossa määritetyt jännitykset muutetaan suorakulmaiseen koordinaatiston mukaiseen jännitystilaan kaavoilla

$$\sigma_x = \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_{\theta} \sin^2 \theta - 2\tau_{r\theta} \sin \theta \cos \theta$$

$$\sigma_y = \sigma_r \sin^2 \theta + \sigma_{\theta} \cos^2 \theta + 2\tau_{r\theta} \sin \theta \cos \theta$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_r - \sigma_{\theta}) \sin \theta \cos \theta + \tau_{r\theta} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zr} \sin \theta + \tau_{\theta z} \cos \theta$$

$$\tau_{zz} = \tau_{rz} \cos \theta - \tau_{\theta z} \sin \theta$$

σ_x on radan pituussuuntainen jännitys

σ_y radan poikkisuuntainen jännitys

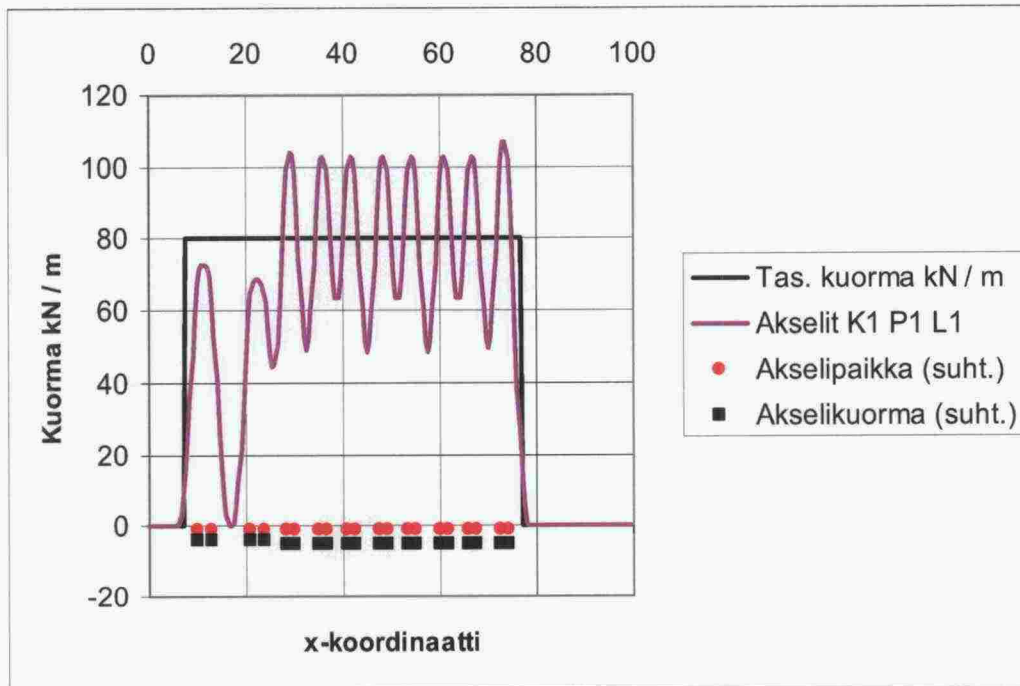
θ pisteen sijaintikulma (y/x).

Pystysuuntainen jännitys σ_z ei muutu suorakulmaiseen koordinaatistoon siirryttäessä.

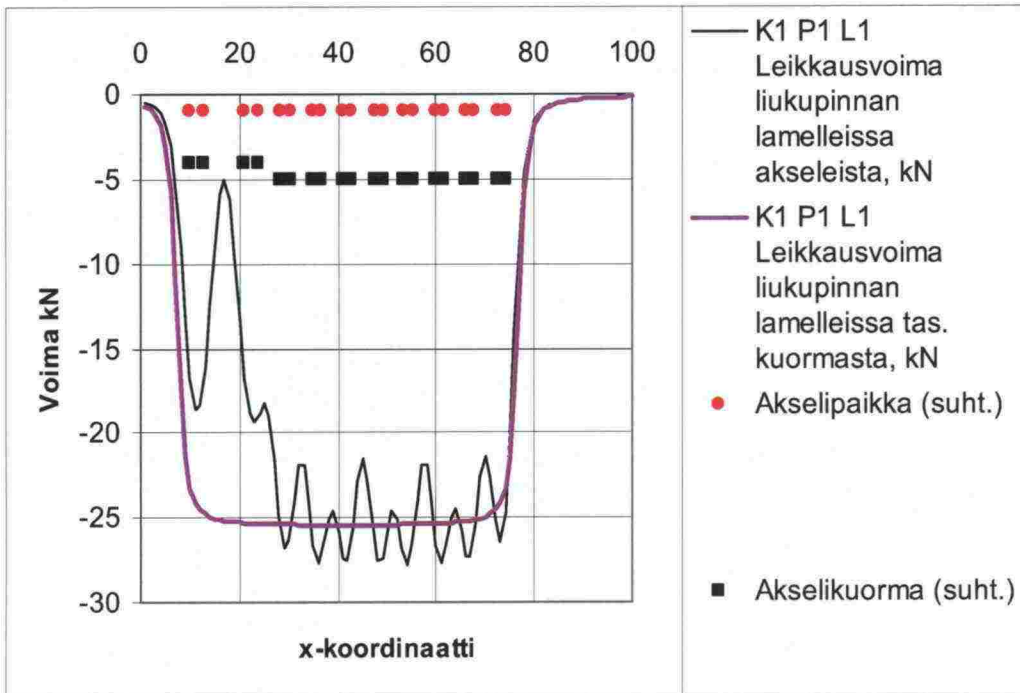
4 LASKENTATULOKSET

Kussakin tarkastelutapauksessa (kuormitus-pengerkorkeus-liukupinta-kombinaatio) liukupinnassa vaikuttavat leikkausvoimat laskettiin 1 metrin välein 100 m mittaisella matkalla. Voimien laskenta suoritettiin liukupintakohtaisesti sekä tasan jakautuneen kuormituksen osalta että akselikuormista aiheutuneen kuormituksen osalta.

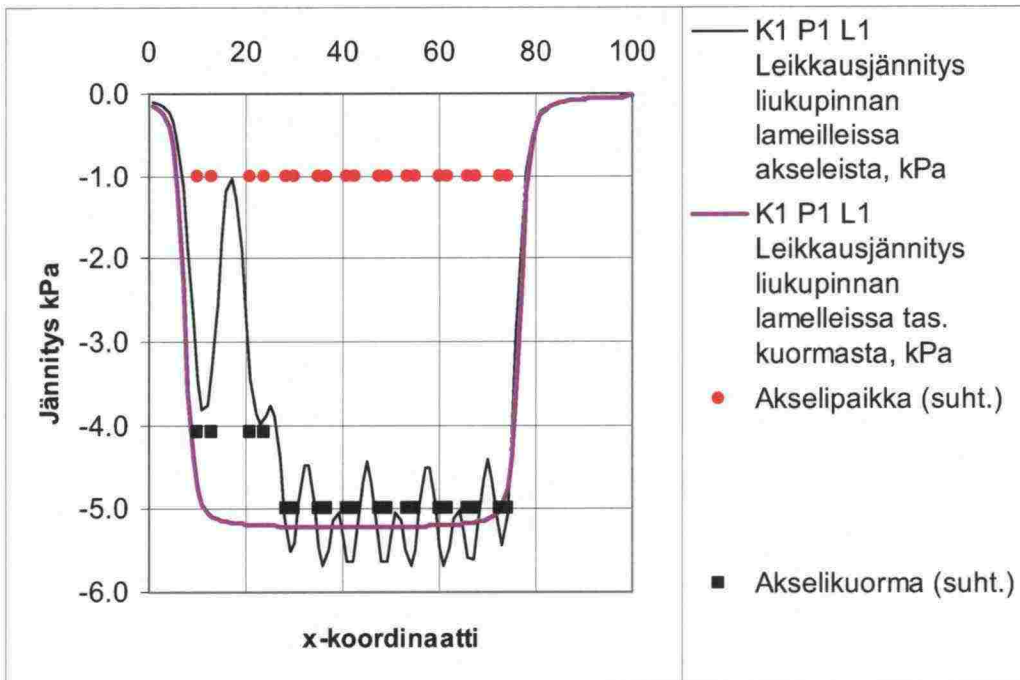
Esimerkkinä tarkastelutapauksen kuormituksista on esitetty laskennassa käytetyn tasaisen kuormituksen ja akselikuormista aiheutuvan kuormituksen sijoittuminen ja intensiteetti tarkastelutapauksessa K1 P1 L1 kuvassa 12. Samoin esimerkkinä on esitetty laskennan tuloksena saadun leikkausvoiman ja leikkausjännityksen jakautuminen 100 m mittaisella tarkastelupituudella kuvissa 13 ja 14. Kussakin kuvassa on esitetty myös laskennassa käytetyn junan akselien sijainti ja akselien kuormitus suhteellisina arvoina tarkastelupituudella. Vastaavat kuvat on kaikkien tarkastelutapausten osalta esitetty liitteissä 1...29.



Kuva 12. Tarkastelutapauksessa K1 P1 L1 käytetyn tasaisen kuormituksen ja aksleista aiheutuvan kuormituksen jakautuma.



Kuva 13. Tarkastelutapauksessa K1 P1 L1 tasaisesta kuormituksesta ja akseleista aiheutuvasta kuormituksesta liukupintaan muodostuvat leikkausvoimat.



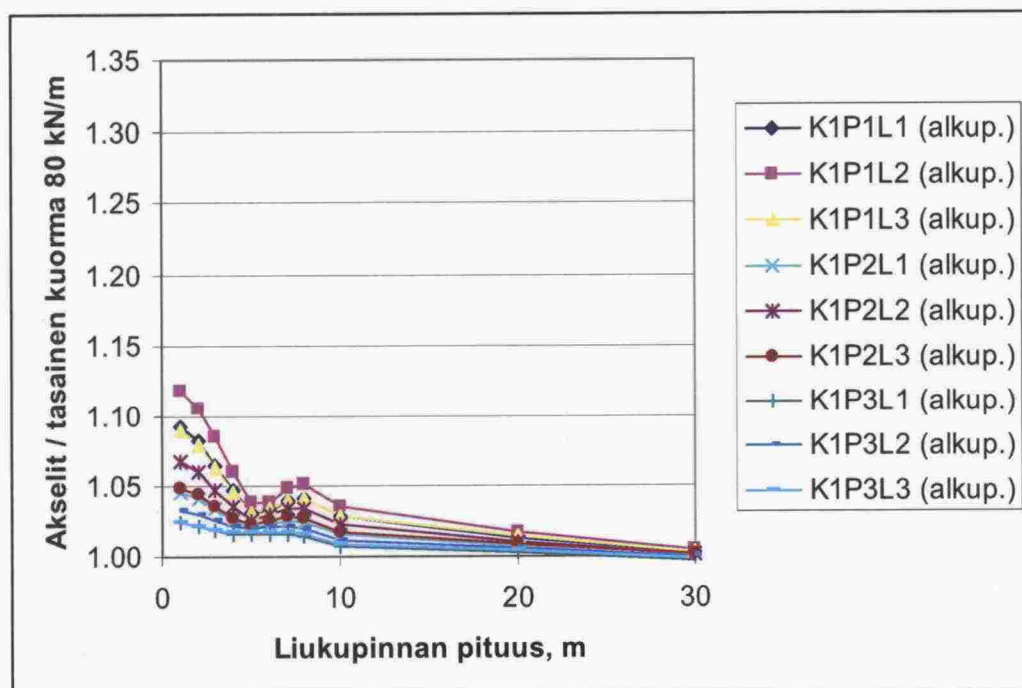
Kuva 14. Tarkastelutapauksessa K1 P1 L1 tasaisesta kuormituksesta ja akseleista aiheutuvasta kuormituksesta liukupintaan muodostuvat leikkausjännitykset.

Kuvista 13 ja 14 voidaan havaita, että raskaimmin kuormitettujen vaunujen akseleista aiheutuu paikallisesti liukupintaan jonkin verran suurempi leikkausvoima kuin tasaisen nauhakuormaolettamuksen mukaan. Akseleista aiheutuvan kuormituksen ja tasaisen kuormituksen aiheuttamien leikkausvoimien suhtena määritettiin kerroin, joka siis kertoo sen, kuinka paljon suurempi rasitus liukupintaan akselikuormista kohdistuu tasaiseen kuormituksen jakautumaolettamukseen verrattuna. Kuvista 13 ja 14 havaitaan

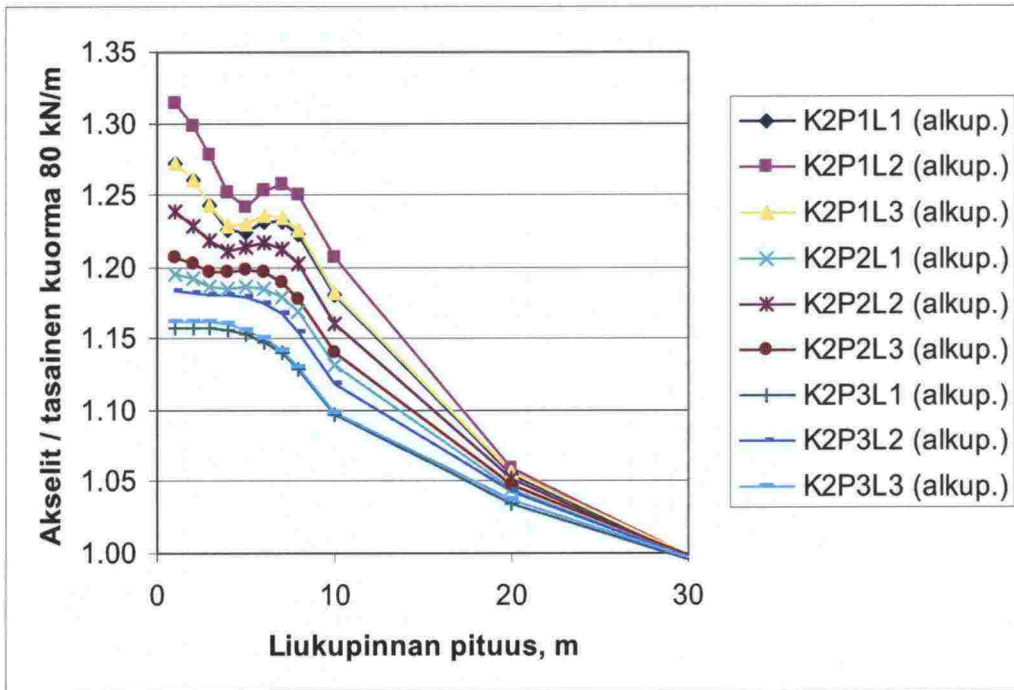
samalla, että liukupinnalla (tässä tapauksessa keskimääräisenä liukupinnan aktiivipuolella) havaittavasta leikkausvoimasta vain pieni osa on luonnehdittavissa nopeasti muuttuvaksi - "dynaamiseksi" - pääosan leikkausrasituksesta ollessa hyvinkin kvasistaattisena kuvattavissa.

Suhde määritettiin liukupinnan radan suuntaisen pituuden funktiona. Akseli-kuormituksesta aiheutuvalle leikkausvoimalle laskettiin keskiarvot "signaalia" pitkin 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 10 m, 20 m ja 30 m mittaisille alueille tarkastelupituuden alusta lähtien. Näin saaduista keskiarvoista valittiin kutakin liukupinnan pituutta kuvaamaan maksimi-arvo. 1 m mittaisen liukupinnan maksimi-arvo saatiin suoraan laskentatulosten maksimi-arvona. Tasaisesta kuormituksesta aiheutuvan leikkausvoiman maksimi-arvo määritettiin 30 m mittaisen alueen keskiarvon maksimina. Kuvista 13 ja 14 voidaan nähdä, ettei tasaisen kuormituksen keskiarvona laskettu maksimi-arvo juurikaan poikkea suurimmasta yksittäisestä tasaisen kuormituksen aiheuttamasta maksimi-arvosta, koska vaunujen alla leikkausvoiman arvo on lähes vakio tällä matkalla.

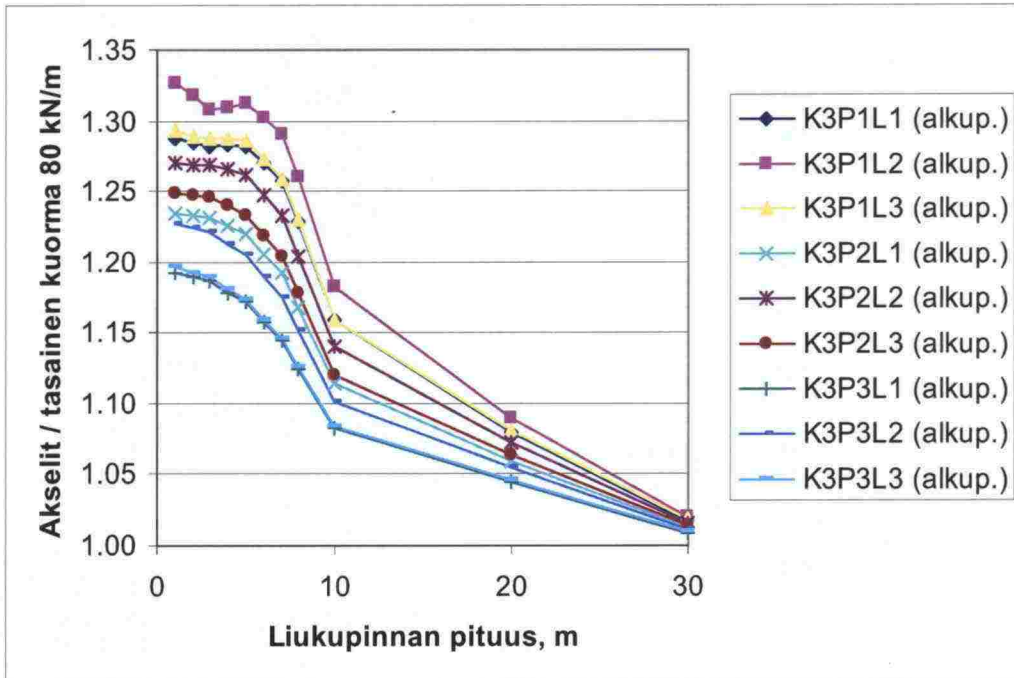
Kuvissa 15...17 on esitetty laskettujen suhteiden (kertoimien) arvot akselikuormittain liukupinnan radansuuntaisen tarkastelupituuden funktiona. Taulukossa 5 on lisäksi esitetty laskentatuloksena saadut akselikuormien 1 m maksimi-arvot.



Kuva 15. Akselikuormista (250 kN) liukupintoihin aiheutuvan rasituksen suuruus tasaisesta kuormasta aiheutuvaan rasitukseen nähden liukupinnan radansuuntaisen tarkastelupituuden funktiona eri pengerkorkeuksilla.



Kuva 16. Akselikuormista (300 kN) liukupintoihin aiheutuvan rasituksen suuruus tasaisesta kuormasta aiheutuvaan rasitukseen nähden liukupinnan radansuuntaisen tarkastelupituuden funktiona eri pengerkorkeuksilla.



Kuva 17. Akselikuormista (278.5 kN) liukupintoihin aiheutuvan rasituksen suuruus tasaisesta kuormasta aiheutuvaan rasitukseen nähden liukupinnan radansuuntaisen tarkastelupituuden funktiona eri pengerkorkeuksilla.

Taulukko 5. Eri akselikuormituksilla ja pengerkorkeuksilla sekä liukupintaotaksumilla saadut akselikuorma/tasainen 80 kN/m nauhakuormaolettamus -suhteet, kun akselikuorman maksimi on määritetty 1 metrin matkalta.

Pengerkorkeus / liukupinta- olettamus	Kuormitus		
	K1, akselikuorma 250 kN	K2, akselikuorma 300 kN	K3, akselikuorma 278.5 kN
P1, h=1,55 / L1	1,092	1,271	1,288
P1, h=1,55 / L2	1,119	1,314	1,327
P1, h=1,55 / L3	1,089	1,271	1,293
P2, h=2,55 / L1	1,046	1,196	1,234
P2, h=2,55 / L2	1,067	1,238	1,270
P2, h=2,55 / L3	1,049	1,207	1,247
P3, h=3,55 / L1	1,024	1,158	1,193
P3, h=3,55 / L2	1,034	1,184	1,228
P3, h=3,55 / L3	1,024	1,162	1,197

5 LASKENTATULOSTEN MUOTOILU KÄYTTÖÖN

Edellä esitettyjen akselikuormista aiheutuvien maksimirasitusten mukaisten laskentatulosten käytettävyys sinällään stabiliteettitarkastelussa käyttävän kuormituksen määrittäisperusteena ei täysin vastaa todellista tilannetta käytännössä ja on lisäksi hankalaa. Liukupinta ei yleensä muodostu 1...2 m matkalla olevan kuormitusalueen mukaiseksi, koska näin lyhyellä kuormitusalueella liukupinnan kokonaisleikkausvastukseen vaikuttaa suuresti liukupinnan päätyjen leikkausvastus. Käytännössä tasotapauksena suoritettavassa liukupinta-analyysissä on myös tiedettävä vakioksi oletettava nauhakuorman suuruus. Liukupinnan radansuuntaisen pituuden mukaan esitetyt kertoimet eivät myös saa johtaa tilanteeseen, jossa lyhemmällä matkalla voitaisiin käyttää pienempää kuormitusta kuin pidemmällä matkalla, koska kuormitusalue kuitenkin jossain tilanteessa voi olla tämän lyhyemmän alueen kohdalla. Näiden vaikutusten huomioimiseksi edellä esitetyt laskentatulokset on korjattu eri tekijöillä, joita tässä yhteydessä kokonaisuutena kutsutaan päätyvaikutusefektin huomioimiseksi.

Päätyvaikutusefektillä tarkoitetaan tässä vaikutusta, joka syntyy määrämittaisen (suhteellisen lyhyen) liukupinnan päiden muodostamasta leikkausvastuksesta. Liukupinnan radansuuntaisen pituuden ollessa lyhyt liukupinnan päiden leikkausvastus saattaa olla huomattava verrattuna liukupinnan vaipan pinnalla syntyvään leikkausvastukseen nähden. Tämä pätee kuitenkin vain sellaisessa tapauksessa, joissa kuormitus ja sen alla oleva liukupinta on siis suhteellisen lyhyt. Kantavuuskaavoissa päätyvaikutusefekti otetaan huomioon perustuksen muodon vaikutuskertoimella. Neliönmuotoisella anturalla muodon vaikutuskerroin on 1,2, kun se äärettömän pitkällä anturalla on 1. Muodon vaikutuskerroin on empiirinen ja pätee maapohjaan nähden jäykällä anturalla. Virhe joustavaan penkereeseen verrattuna voidaan olettaa kuitenkin vähäiseksi muihin tarkasteltuihin virhelähteisiin verrattuna.

Liukupinnassa päätyvaikutus voi syntyä vain, jos kuormitetun liukupinnan jatkeena molemmissa päissä olevien seuraavien, kuvitteellisten liukupintojen päädyt pystyvät tarjoamaan leikkausvastusta. Mikäli kuvitteellisten liukupintojen vaipoilla ovat leikkausjännitykset ovat jo leikkauslujuuden suuruiset, eivät liukupinnan kuvitteelliset päädyt voi tukea keskimmäistä kuormitettua liukupintaa, aivan kuten kantavuuskaavassakaan pitkän anturan kapasiteettia ei voida laskea peräkkäisten neliönmuotoisten anturoiden avulla. Keskimmäisen kuormitetun alueen liukupinnan päihin leikkausvastusta voi siis syntyä vain, jos seuraavien kuvitteellisten liukupintojen vaipat voivat ottaa vastaan vielä päätyjen kautta välittyvää voimaa.

Tässä tarkastelussa päätyvaikutusefekti on käsitelty kolmella korjauskertoimella, joista kaksi ensimmäistä varsinaisesti huomioivat päätyvaikutuksen ja kolmas joissain tapauksissa korottaa tyypillisesti vaunun teliväliä pienemmillä tarkastelupituuksilla esiintyvät suhteen (kertoimen) arvot vaunun teli- ja pyöräväleistä riippuvien muutaman metrin mittaisella tarkastelualueella havaittavissa olevien maksimiarvojen suuruisiksi. Korjauskerrointen tarkoitus on esitetty seuraavissa kappaleissa.

Ensimmäisenä korjauskertoimena on käytetty kantavuuskaavoissa käytettävää anturan muodon vaikutuskerrointa. Anturan muodon vaikutuskerroin kantokykyä laskettaessa on

$$s_c = 1 + 0,2(B/L)$$

missä

B on anturalaatan pienempi sivumitta

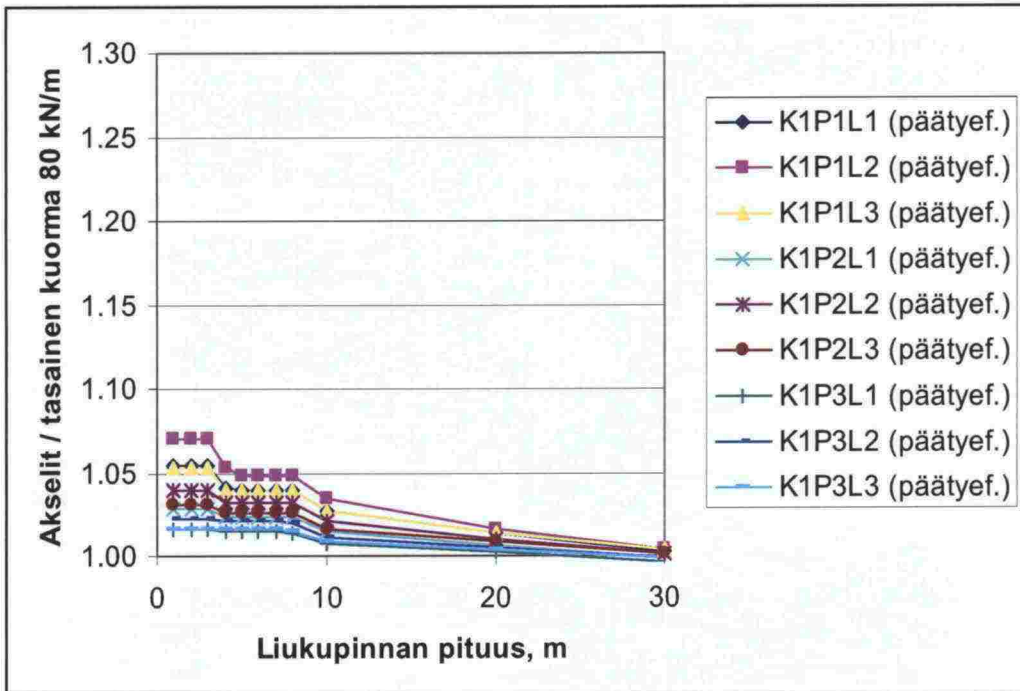
L on anturalaatan suurempi läpimitta.

Kantavuuskaavassa koheesion ja kantavuuskertoimen tulo kerrotaan anturan muodon vaikutuskertoimella. Koska tässä yhteydessä kapasiteetti puolen sijaan tarkastellaan ainoastaan kuormituspuolta, sovelletaan kerrointa kuormaan. Pitkän, koko junan pituudella vaikuttavan peruskuorman voidaan kuitenkin arvioida kuluttavan oman osuutensa kapasiteetista (jolla kapasiteettia laskettaessa muotokerroin siis on 1), joten akselien (eri tarkastelupituuksilla lasketusta) voiman arvosta vähennetään tasaisen kuormituksen aiheuttaman voiman suuruus ja vasta erotus jaetaan korjauskertoimella. Osamäärä lisätään tasaisen kuormituksen arvoon, jolloin saadaan ensimmäinen korjattu suhde (kerroin) ko. summan ja tasaisen kuormituksen osamääränä. Tässä yhteydessä korjaus on suoritettu ratapölkkyjen pyöristettyyn 3 m leveyteen perustuvan kuormitusalueen leveyttä käyttäen.

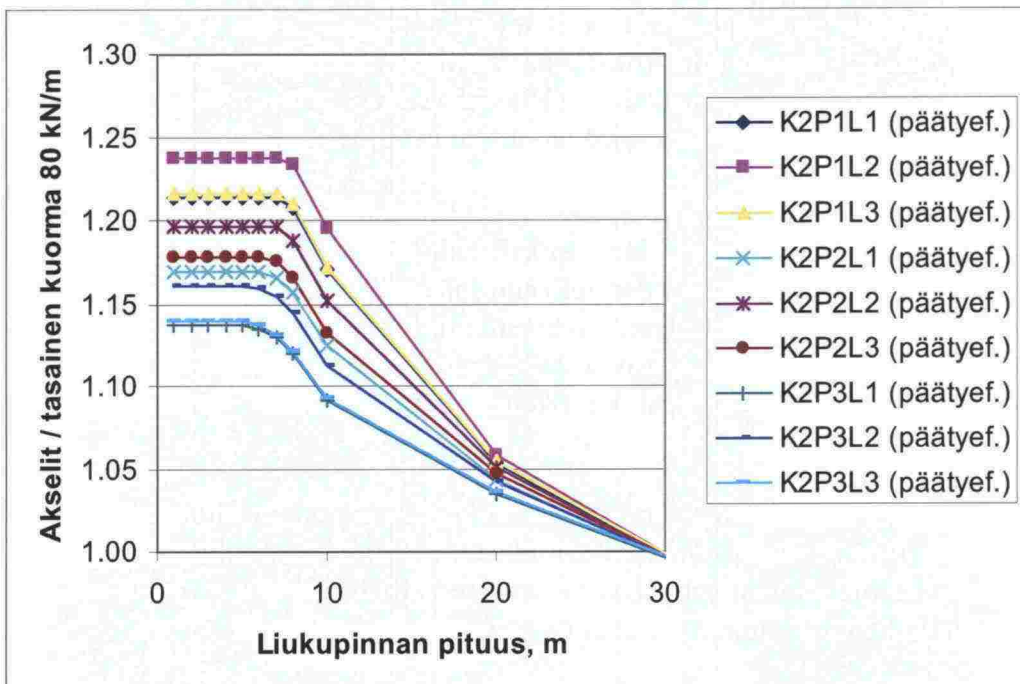
Toisessa suhteen (kertoimen) korjauksessa rajoitetaan mahdolliset alle kolmen metrin matkalla saadut suhteen arvot 3 m kohdalla saatujen arvojen suuruisiksi, koska kantavuuskaavaan perustuva korjaus on tarkoitettu suhteille, joissa $B/L \geq 1$. Valittua 3 metrin mittaista aluetta pienemmillä osuuksilla voimien oletetaan myös jakautuvan riittävästi ainakin tämän alueen matkalle. Tällä rajoitetaan pois myös tarve junan vaunun pyörien välissä olevien liukupintojen tarkasteluun.

Kolmannessa suhteen (kertoimen) korjauksessa käydään saadun suhteen muoto tarkastelumatkan funktiona uudestaan läpi. Mikäli suhteessa esiintyy maksimi, kuten monissa tapauksissa on esiintynyt, vaunun telivälin mittaisen kohdan lähellä (7...8 m), asetetaan tämän maksimin sijaintia olevilla lyhyemmillä matkoilla suhteen (kertoimen) arvot tämän maksimin suuruisiksi, koska tarkastelut, joissa vaunun telien välillä voitaisiin käyttää pienempää kuormaa kuin telien kohdalla, eivät käytännössä ole mielekkäitä.

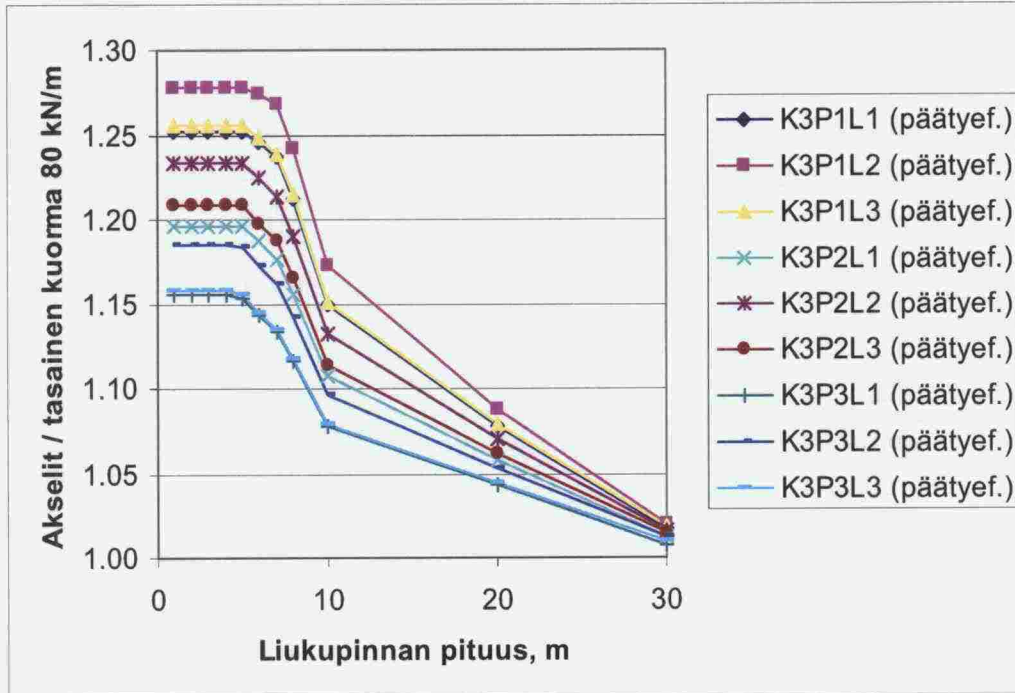
Päätyvaikutus-efektillä korjatut tulokset liukupinnan radansuuntaisen pituuden suhteen on esitetty kuvissa 18...20 ja maksimi-arvot taulukossa 6. Taulukon 6 alkuperäiset arvot ovat 1 m alueen arvoja samoin kuin päätyvaikutusefektillä korjatut arvot. Korjattua arvoa sovelletaan kuitenkin vähintään 3 m pitkään liukupinnan osuuteen.



Kuva 18. Akselikuormista (250 kN) päätyvaikutusefekti huomioonotettuna liukupintoihin aiheutuvan rasituksen suuruus tasaisesta kuormasta aiheutuvaan rasitukseen nähden liukupinnan radansuuntaisen tarkastelupituuden funktiona eri pengerkorkeuksilla.



Kuva 19. Akselikuormista (300 kN) päätyvaikutusefekti huomioonotettuna liukupintoihin aiheutuvan rasituksen suuruus tasaisesta kuormasta aiheutuvaan rasitukseen nähden liukupinnan radansuuntaisen tarkastelupituuden funktiona eri pengerkorkeuksilla.



Kuva 20. Akselikuormista (278.5 kN) päätyvaikutusefetti huomioonotettuna liukupintoihin aiheutuvan rasituksen suuruus tasaisesta kuormasta aiheutuvaan rasitukseen nähden liukupinnan radansuuntaisen tarkastelupituuden funktiona eri pengerkorkeuksilla.

Taulukko 6. Eri akselikuormituksilla ja pengerkorkeuksilla sekä liukupintaotaksumilla saadut akselikuorma/tasainen 80 kN/m nauhakuormaolettamus -suhteet, kun akselikuorman maksimi on määritetty 1 metrin matkalta. Alkuperäiset arvot ja päätyvaikutusefektillä korjatut arvot.

Pengerkorkeus / liukupinta- olettamus	Alkuperäiset arvot			Päätyvaikutusefektillä korjatut arvot		
	K1, akseli- kuorma 250 kN	K2, akseli- kuorma 300 kN	K3, akseli- kuorma 278.5 kN	K1, akseli- kuorma 250 kN	K2, akseli- kuorma 300 kN	K3, akseli- kuorma 278.5 kN
P1, h = 1,55 / L1	1,092	1,271	1,288	1,055	1,213	1,252
P1, h = 1,55 / L2	1,119	1,314	1,327	1,071	1,237	1,278
P1, h = 1,55 / L3	1,089	1,271	1,293	1,053	1,216	1,256
P2, h = 2,55 / L1	1,046	1,196	1,234	1,028	1,169	1,197
P2, h = 2,55 / L2	1,067	1,238	1,270	1,040	1,197	1,233
P2, h = 2,55 / L3	1,049	1,207	1,247	1,030	1,178	1,208
P3, h = 3,55 / L1	1,024	1,158	1,193	1,016	1,137	1,155
P3, h = 3,55 / L2	1,034	1,184	1,228	1,022	1,161	1,185
P3, h = 3,55 / L3	1,024	1,162	1,197	1,016	1,140	1,158

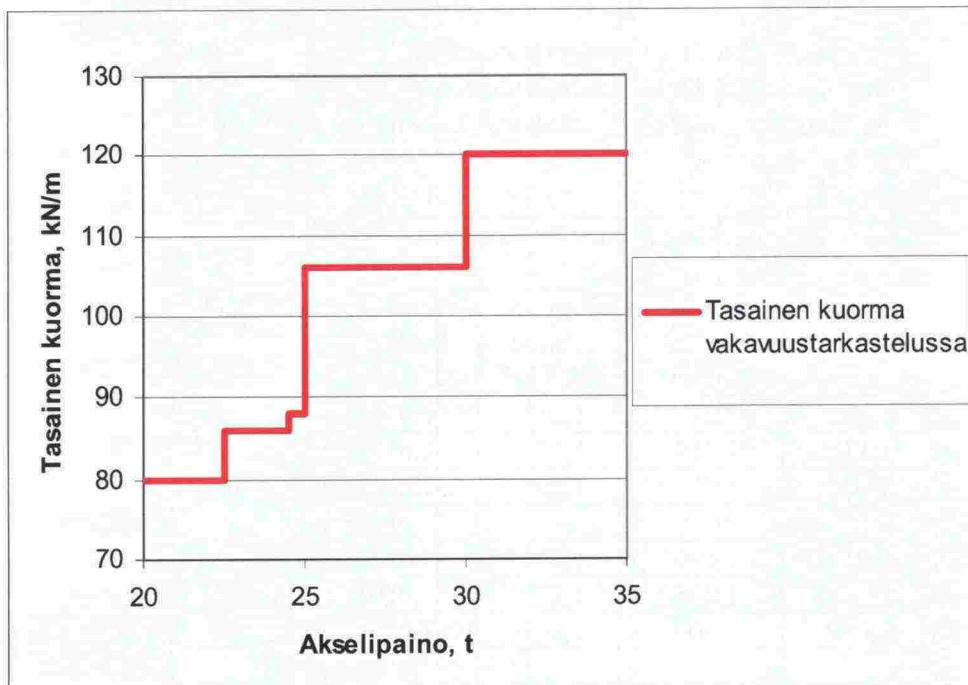
6 LASKENTATULOSTEN JA RAMON KUORMITUSTEN VERTAILU

Vakavuuslaskennassa nykyisin käytettävät junakuormat on esitetty RAMOn (Ratatekniset määräykset ja ohjeet osa 3, 27.9.2005) taulukossa 3.7:2. Taulukossa 7 on esitetty sen mukaiset mitoitusakselipainot ja nauhakuormat. Nauhakuormia on havainnollistettu kuvassa 21.

Taulukko 7. RAMOn (Ratatekniset määräykset ja ohjeet osa 3, 27.9.2005) taulukossa 3.7:2 esitetyt akselipainot ja nauhakuormat.

Akselipainot	
Mitoitusakselipaino, t	Nauhakuorma q_{vk} , kN/m
17	60
22,5	80
24,5	86
25	88
30	106
35	120

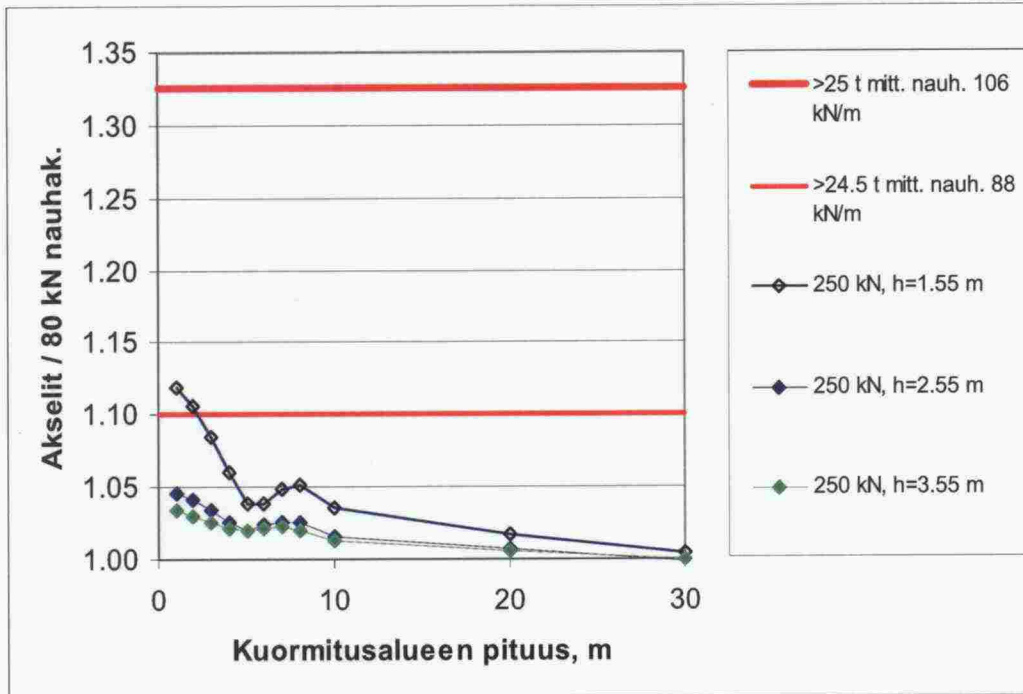
Mitoittava tilanne on pysähtynyt juna. Sysäyskertoimen arvo on 1,0. Taulukon mukaan akselipainon ollessa esimerkiksi yli 25 t vakavuuslaskennassa käytettävä nauhakuorma on 106 kN/m.



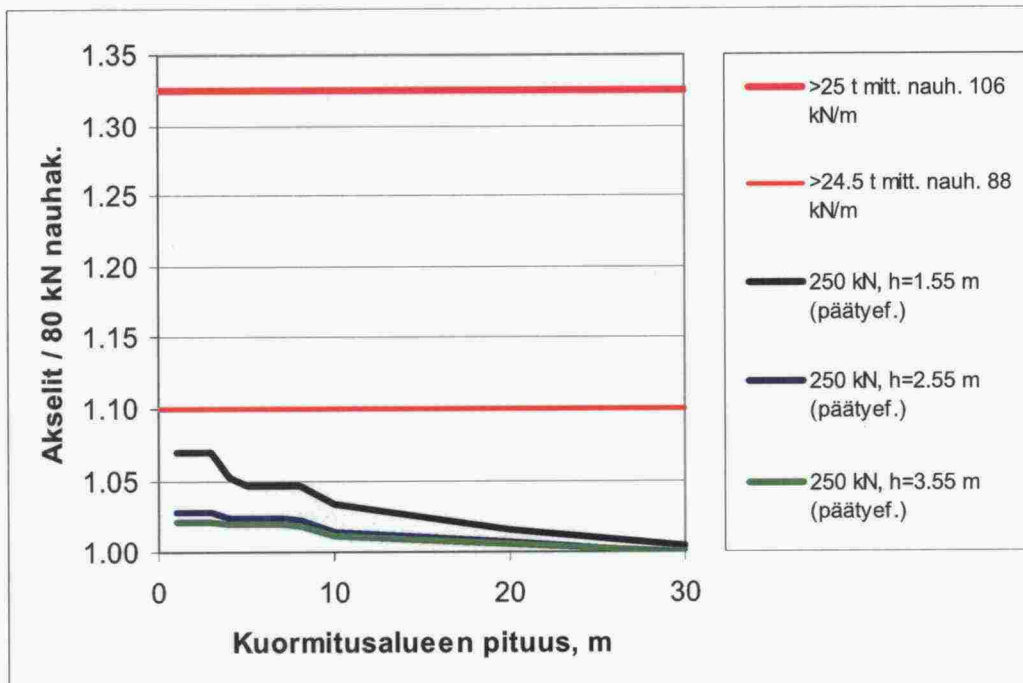
Kuva 21. Vakavuuslaskennassa käytettävä nauhakuorma akselikuorman suhteen.

Tässä tarkastelussa saatujen tulosten maksimiarvot on esitetty akselikuormittain kuormitusalueen (liukupinnan) pituuden suhteen kuvissa 22...27 yhdessä RAMOssa esitetyille nauhakuormille laskennassa käytetyn nauhakuorman 80 kN/m suhteen laskettujen kerrointen muodostamien rajojen kanssa. Kuvissa on esitetty sekä alkuperäiset laskentatulokset että tulokset, joissa on huomioitu päätyvaikutusefekti.

Kuvista 22 ja 23 voidaan havaita, että laskentatulokset 250 kN akselikuormalla ylittävät matalimmalla penkereellä lyhyellä matkalla yli 24,5 t mukaisen nauhakuorman arvon, mutta jäävät selvästi alle yli 25 t akselikuomilla käytettävän nauhakuorman arvon 106 kN/m. Kun laskentatuloksissa on huomioitu päätyvaikutusefekti, jäävät kaikki tulokset alle yli 24,5 t nauhakuorman arvon.

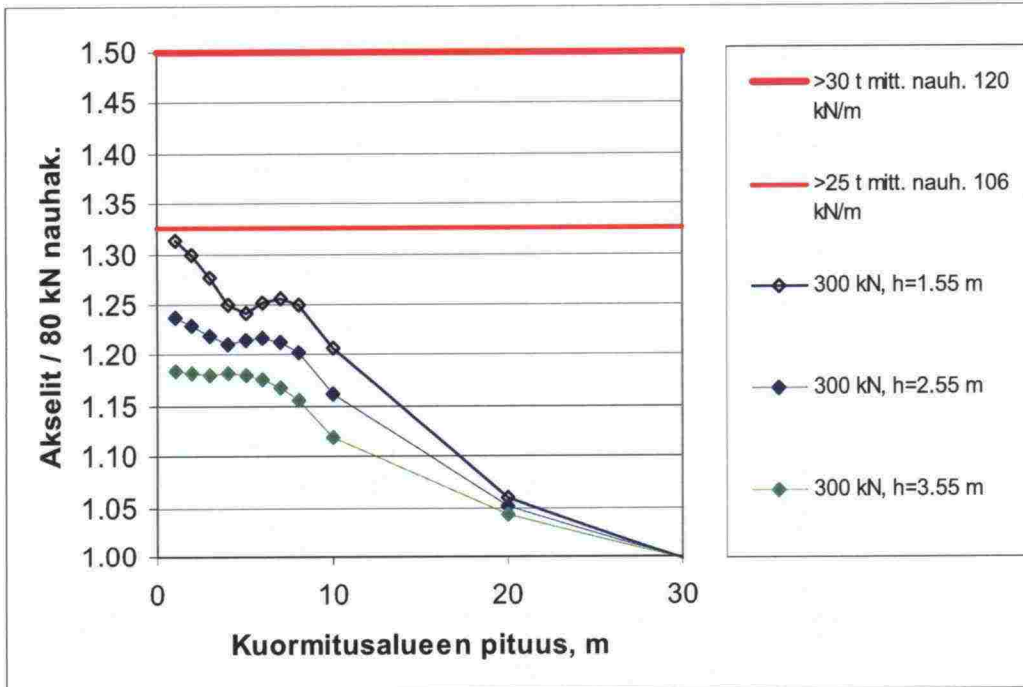


Kuva 22. Akselikuorman 250 kN aiheuttamien laskennallisten rasiutusten ja RAMOn eri akselipainojen mukaisten mitoitusnauhakuormien (mitt. nauh.) suhde 80 kN/m nauhakuormaan.

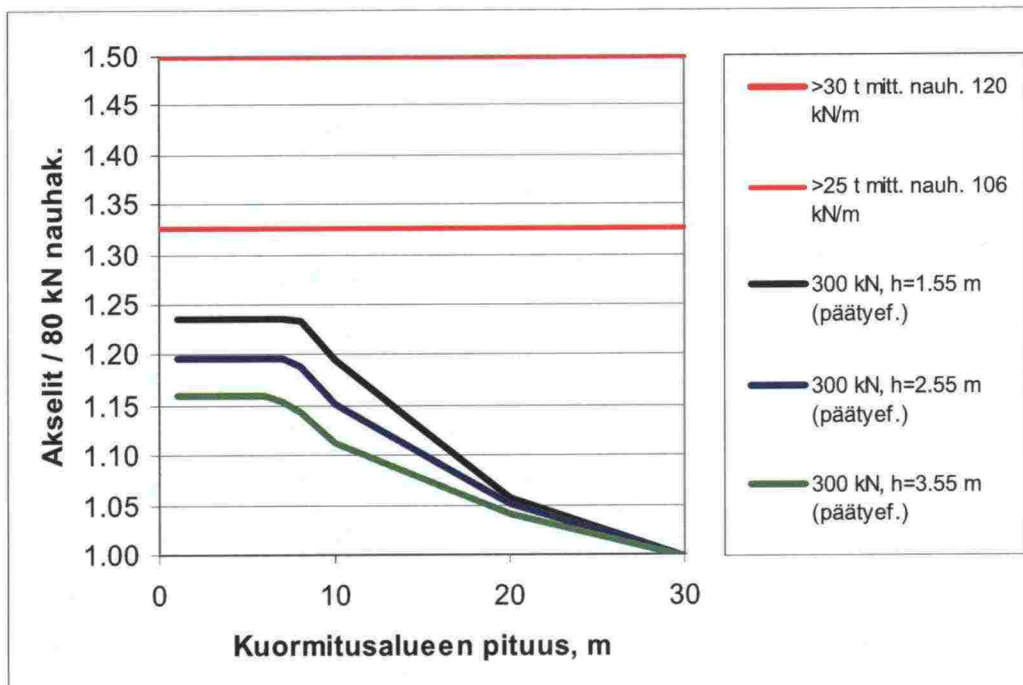


Kuva 23. Akselikuorman 250 kN aiheuttamien päätyvaikutusefektillä korjattujen rasiutusten ja RAMOn eri akselipainojen mukaisten mitoitusnauhakuormien (mitt. nauh.) suhde 80 kN/m nauhakuormaan.

Kuvista 24 ja 25 voidaan havaita, että laskentatulokset 300 kN akselikuormalla nousevat lähelle yli 25 t nauhakuorman arvoa 106 kN/m, mutta jäävät selvästi alle yli 30 t akselikuomilla käytettävän nauhakuorman arvon 120 kN/m. Kun laskentatuloksissa on huomioitu päätyvaikutusefekti, jäävät kaikki tulokset luonnollisesti alle yli 25 t nauhakuorman arvon 106 kN/m.

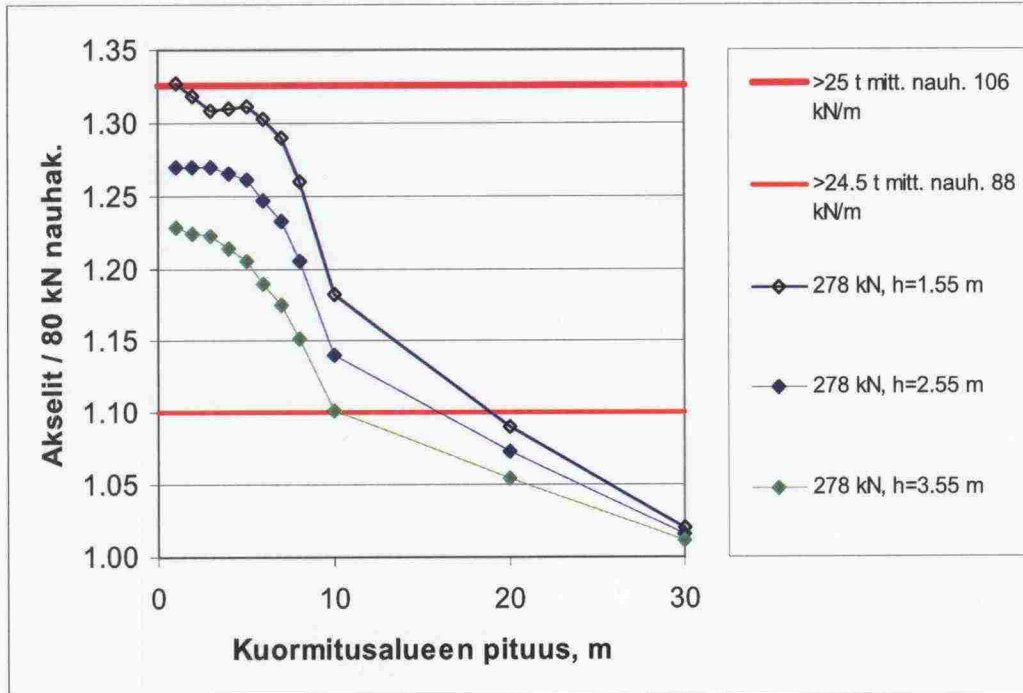


Kuva 24. Akselikuorman 300 kN aiheuttamien laskennallisten rasitusten ja RAMOn eri akselipainojen mukaisten mitoitusnauhakuormien (mitt. nauh.) suhde 80 kN/m nauhakuormaan.

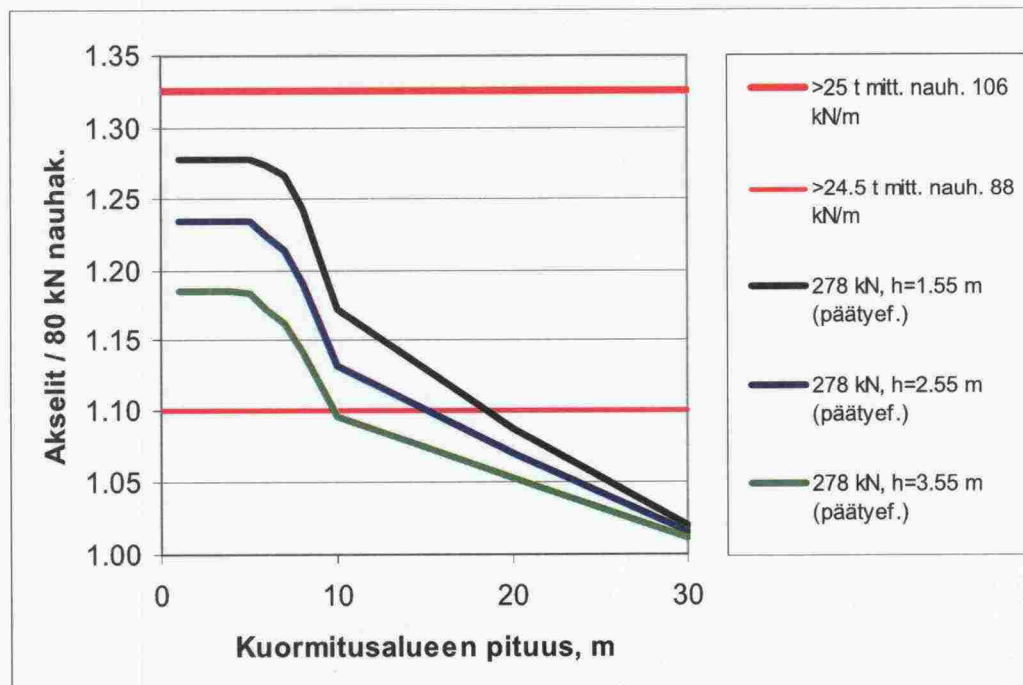


Kuva 25. Akselikuorman 300 kN aiheuttamien päätyvaikutusefektillä korjattujen rasitusten ja RAMOn eri akselipainojen mukaisten mitoitusnauhakuormien (mitt. nauh.) suhde 80 kN/m nauhakuormaan.

Myös 278,5 kN akselikuormalla kuvista 26 ja 27 voidaan nähdä, että laskentatulokset saavuttavat yli 25 t nauhakuorman arvon 106 kN/m. Päätysvaikutusefekti huomioiden tulokset jäävät alle yli 25 t nauhakuorman arvon 106 kN/m.



Kuva 26. Akselikuorman 278,5 kN aiheuttamien laskennallisten rasisitusten ja RAMOn eri akselipainojen mukaisten mitoitusnauhakuormien (mitt. nauh.) suhde 80 kN/m nauhakuormaan.



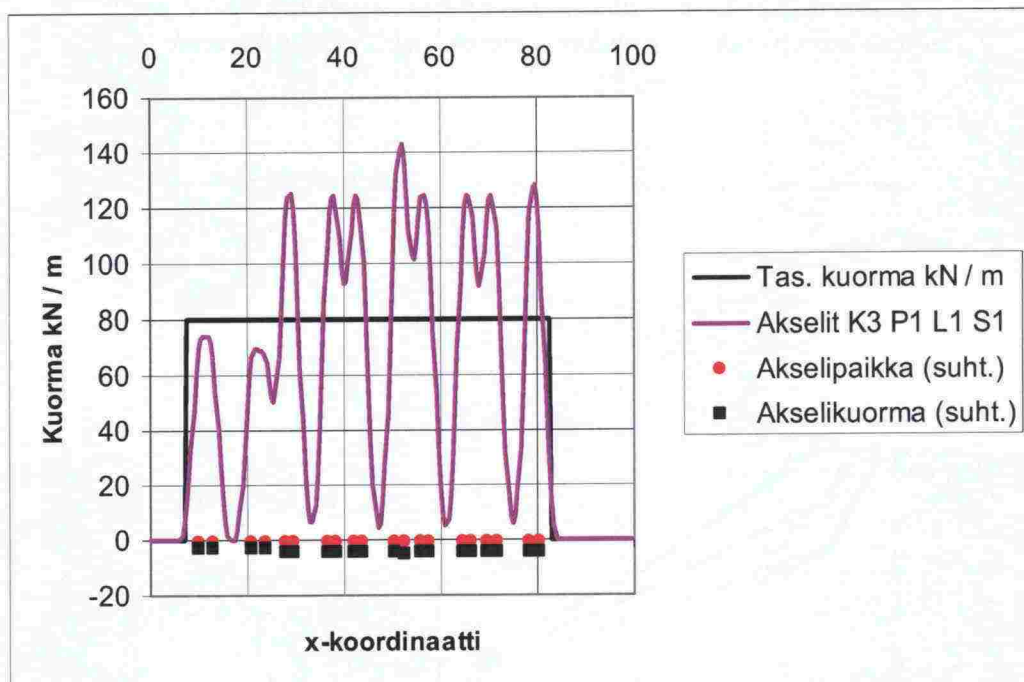
Kuva 27. Akselikuorman 278,5 kN aiheuttamien päätysvaikutusefektilä korjattujen rasisitusten ja RAMOn eri akselipainojen mukaisten mitoitusnauha (mitt. nauh.) suhde 80 kN/m nauhakuormaan.

7 AKSELIEN SYSÄYSKUORMIIN LIITTYVÄT TARKASTELUT

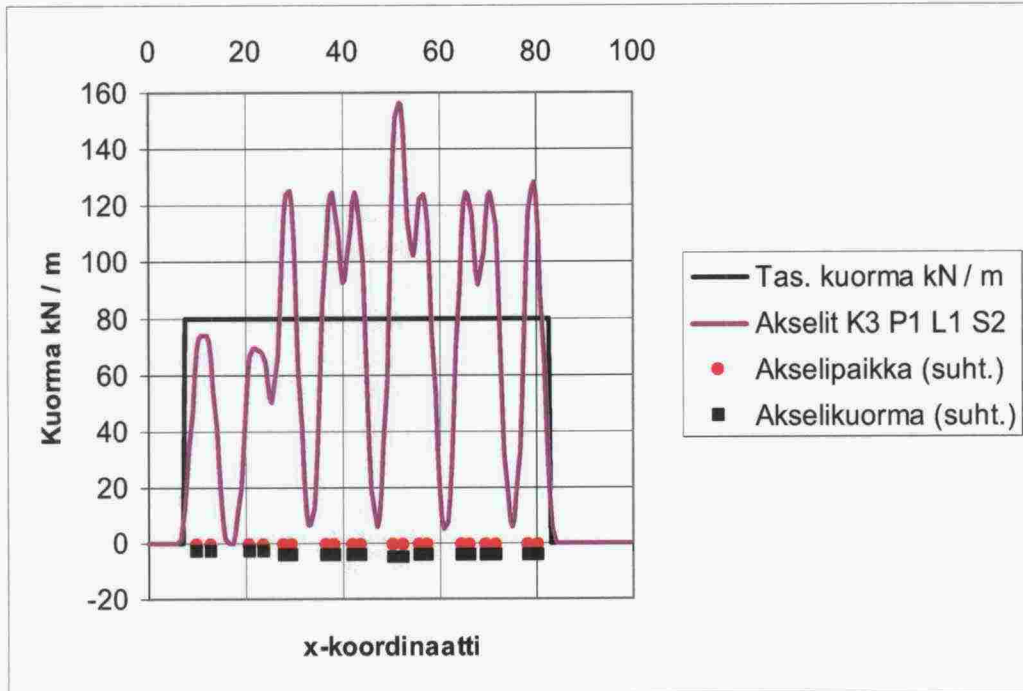
Sysäysvaikutus ilmenee liikkuvassa junassa esim. pyörien lovivaikutuksen tai radassa olevan epätasaisuuden johdosta. Liikkuvan junan kyseessä ollen rasitus maapohjassa ei välttämättä jakaudu samalla tavalla kuin paikoillaan seisovassa junassa. Stabiiliteettitarkastelua silmälläpitäen maapohjan vaste (leikkausmuodonmuutos, mobilisoitunut leikkauslujuus) on myös lyhytaikaisessa kuormitustilanteessa toinen kuin pitkäaikaisessa kuormitustilanteessa. Yksittäisen, suuremman akselikuorman – akseli-kohtainen sykäys – vaikutusta akselikuormien ja tasaisen kuormitusotaksuman väliseen suhteeseen tarkasteltiin kuormituskombinaatiolla, jossa kuormituksena käytettiin edellä suurimman suhteen antanutta akselikuormaa 287,5 kN ja matalinta pengertä, jossa suhteet myös yleisesti ovat suurimmillaan. Sysäyslisäksi oletettiin 25 % akseli-kuormasta eli sysäyskertoimeksi 1,25.

Tarkastelussa sysäyskertoimen mukainen kuorma asetettiin ensimmäisessä tarkastelutapauksessa yhdelle akselille (S1) ja toisessa tarkastelussa saman telin molemmille akseleille (S2). Kuormitustapaus S1 kuvaa mahdollista lovipyörää ja S2 vastaavasti radassa esiintyvää heittoa, jolloin molemmat telin akselit voivat aikaansaada samassa kohtaa kuormituslisän.

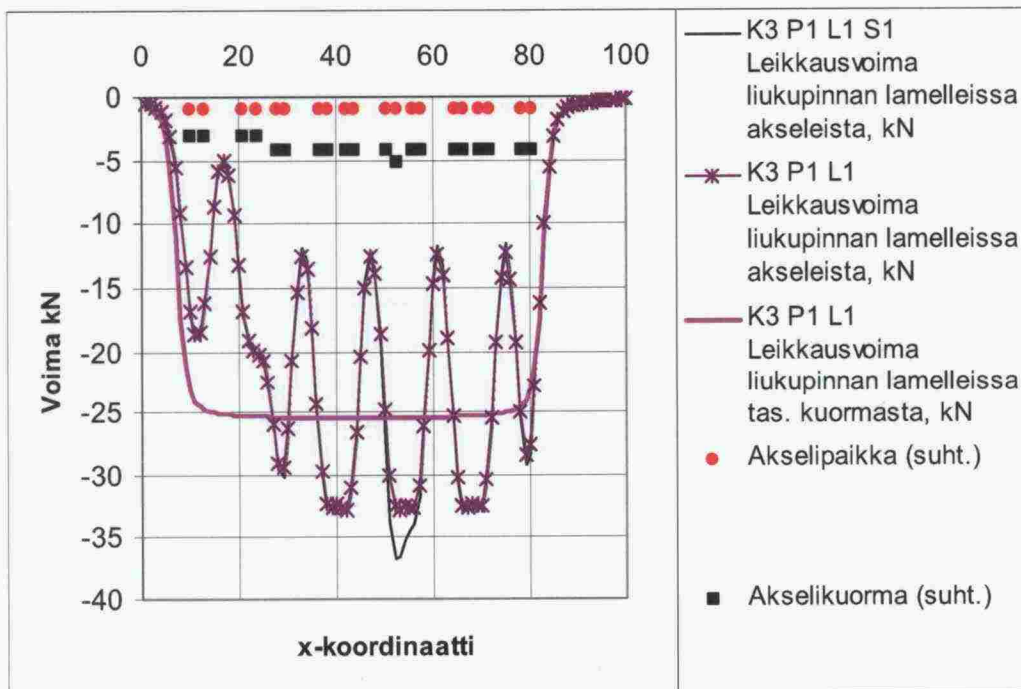
Sysäyskertoimen vaikutukset ovat havaittavissa sekä kuormituskuvaajissa kuvissa 28 ja 29, että liukupinnassa vaikuttavan leikkausvoiman kuvaajissa kuvissa 30 ja 31.



Kuva 28. Yhteen akseliin kohdistuvassa sysäyskerrointarkastelutapauksessa K3 P1 L1 S1 käytetyn tasaisen kuormituksen ja akseleista aiheutuvan kuormituksen jakautuma.



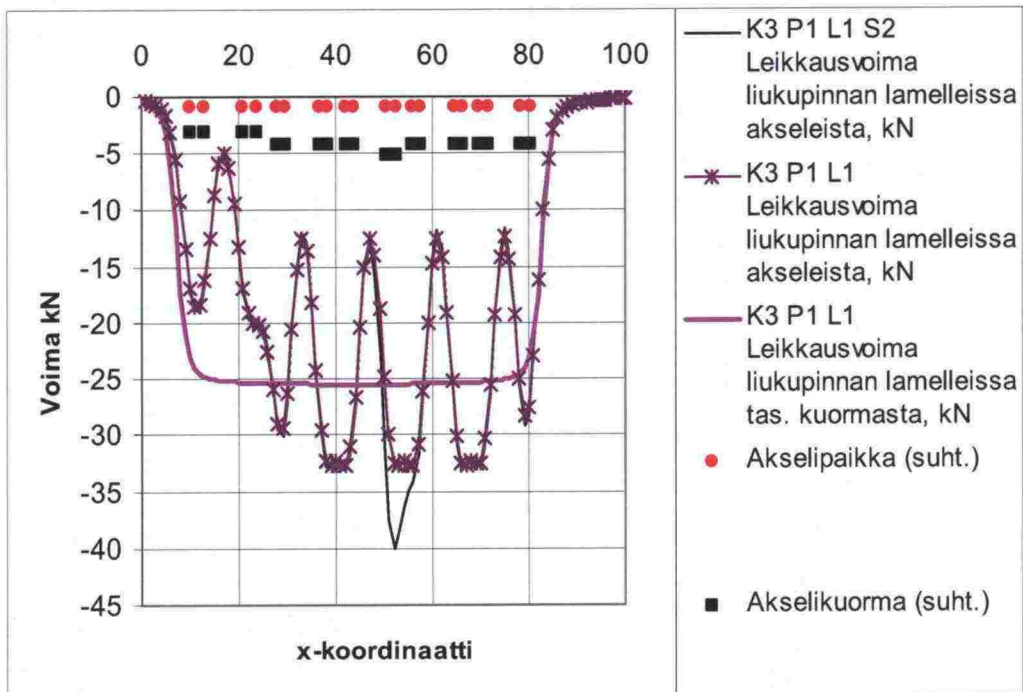
Kuva 29. Kahteen akseliin kohdistuvassa sysäyskerrointarkastelutapauksessa K3 P1 L1 S2 käytetyn tasaisen kuormituksen ja akseleista aiheutuvan kuormituksen jakautuma.



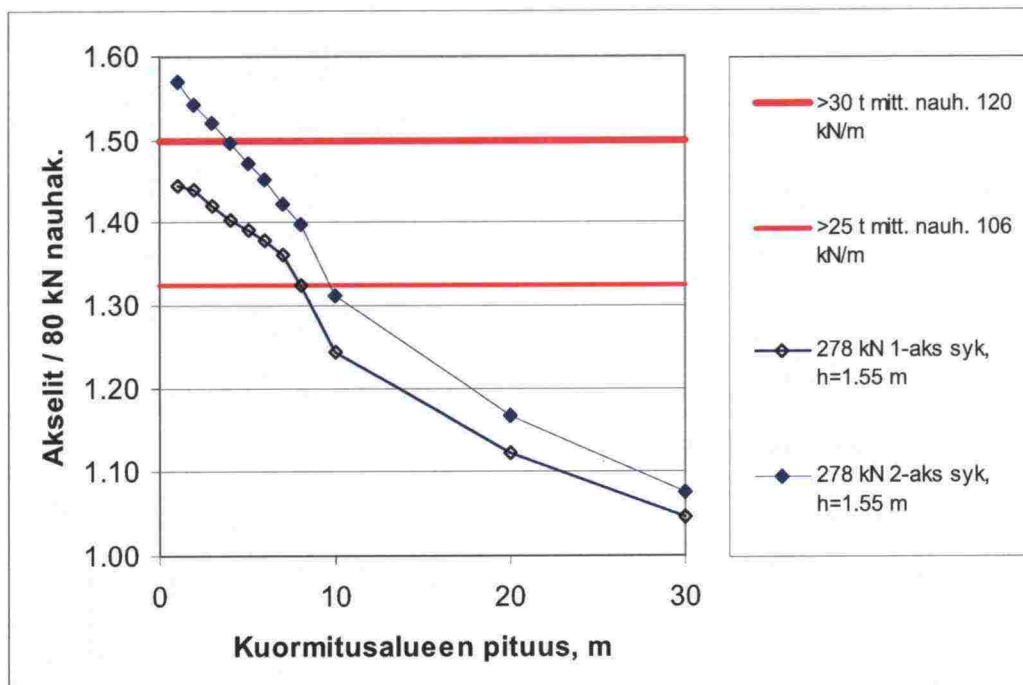
Kuva 30. Yhteen akseliin kohdistuvassa sysäyskerrointarkastelutapauksessa K3 P1 L1 S1 tasaisesta kuormituksesta ja akseleista aiheutuvasta kuormituksesta liukupintaan muodostuvat leikkausvoimat. Kuvassa on esitetty vastaavan tapauksen leikkausvoimat myös ilman sysäyskerrointa olevassa tarkastelussa.

Kuvista 31 ja 32 voidaan havaita, että laskentatulokset sysäyskerroimen omaavalla akselikuormalla (akselikuorma normaalisti 278,5 kN; sysäyskerroimen kanssa 348,1 kN) ylittävät sekä yli 25 t nauhakuorman arvon 106 kN/m että yli 30 t akseli-

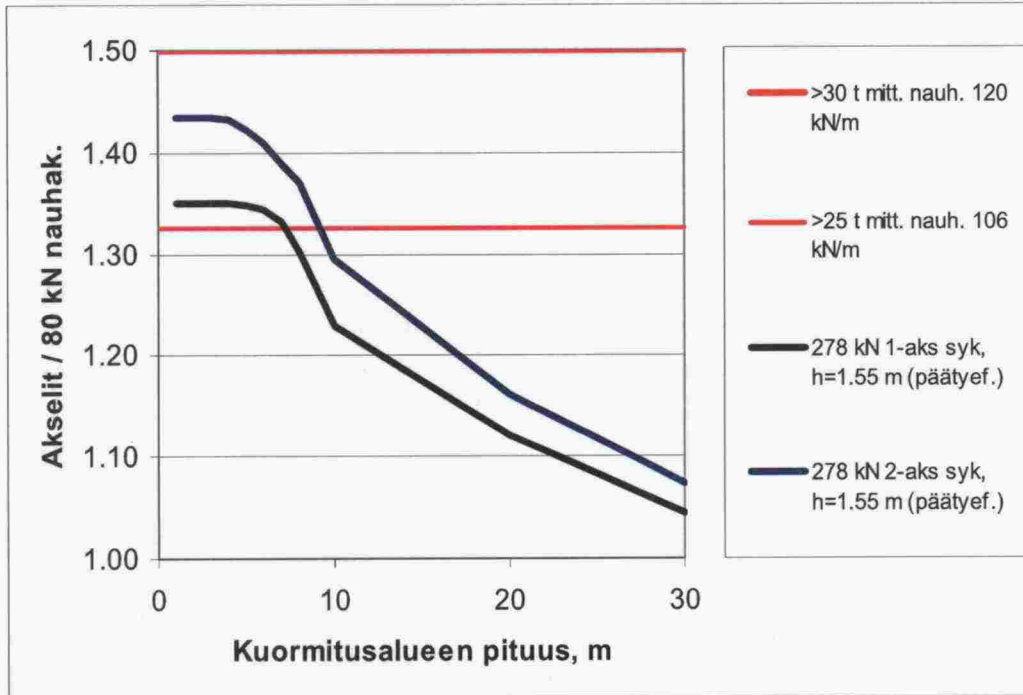
kuormilla käytettävän nauhakuorman arvon 120 kN/m. Yli 25 t akselinkuorman arvo ylittyy myös, kun laskentatuloksissa on huomioitu päätyvaikutusefekti.



Kuva 31. Kahteen akseliin kohdistuvassa sysäyskertoimentarkastelutapauksessa K3 P1 L1 S2 tasaisesta kuormituksesta ja akseleista aiheutuvasta kuormituksesta liukupintaan muodostuvat leikkausvoimat. Kuvassa on esitetty vastaavan tapauksen leikkausvoimat myös ilman sysäyskerrointa olevassa tarkastelussa.



Kuva 32. Yhteen ja kahteen akseliin kohdistuvien akselikuormien ja tasaisen kuormitusotaksuman mukaisen nauhakuorman lasketut suhteet liukupinnan radansuuntaisen pituuden funktiona.



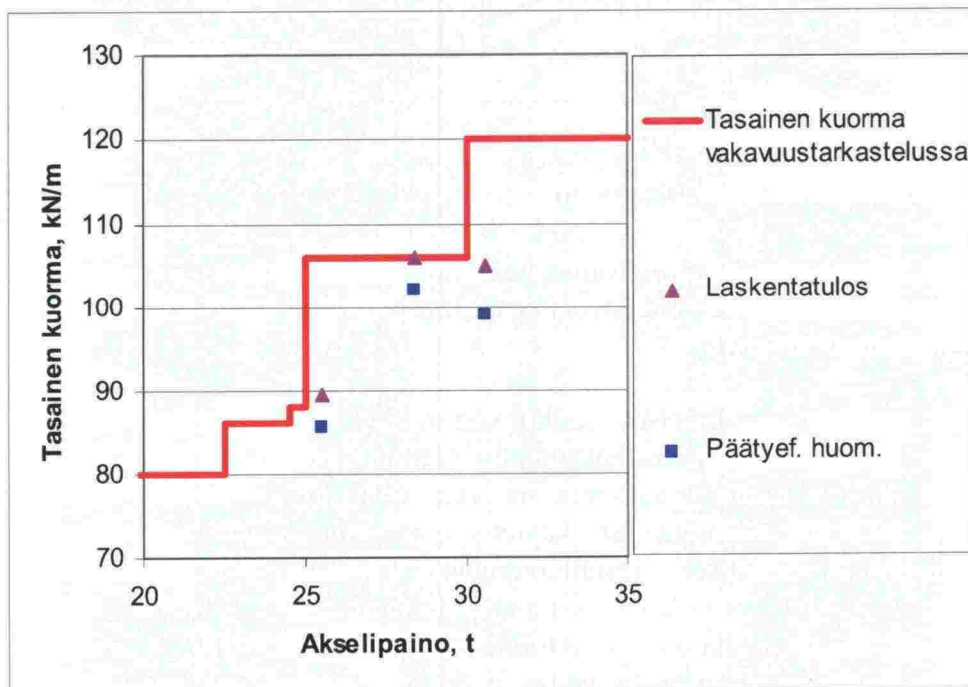
Kuva 33. Yhteen ja kahteen akseliin kohdistuvien akselikuormien ja tasaisen kuormitusotaksuman mukaisen nauhakuorman päätyvaikutusefektillä korjatut suhteet liukupinnan radansuuntaisen pituuden funktiona.

Tarkastelussa saadut suhteet ovat ilmeisesti jonkin verran liian suuret, koska vertailu on edelleen suoritettu tasaisella kuormitusotaksumalla saatuun arvoon nähden. Vaikka lisäkuorma yhden akselin sysäystapauksessa on vain 69,6 kN ja kahden akselin sysäystapauksessa 139,3 kN, aiheutuu tästä käytettyyn vertailukuormitukseen nähden esimerkiksi tasaisen kuormituksen vertailupituutena käytetyn 30 m matkalla 2,3...4,6 kN kuormituksen lisäys radan juoksumetriä kohden. Tämä selittää osaksi vielä 30 m mittaisella liukupinnalla olevaa kertoimen suuruutta (1,05...1,08). Toisaalta sysäyksessä pyörän kohtaan muodostuva voima ei kuitenkaan ole staattista, radalla lepäävää kuormaa, vaan se muodostuu vasta junan liikkeessä ja massan heilahtaessa epätasaisuuksista johtuen.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa saadut tulokset on esitetty pelkistettynä kuvissa 34...36. Kuviin on otettu mukaan ainoastaan kullakin akselikuormituksella eri pengerkorkeuksilla ja eri liukupintaolettamuksilla saatujen laskentatulosten ja laskettujen päätyvaikutusefektilä korjattujen tulosten maksimiarvot.

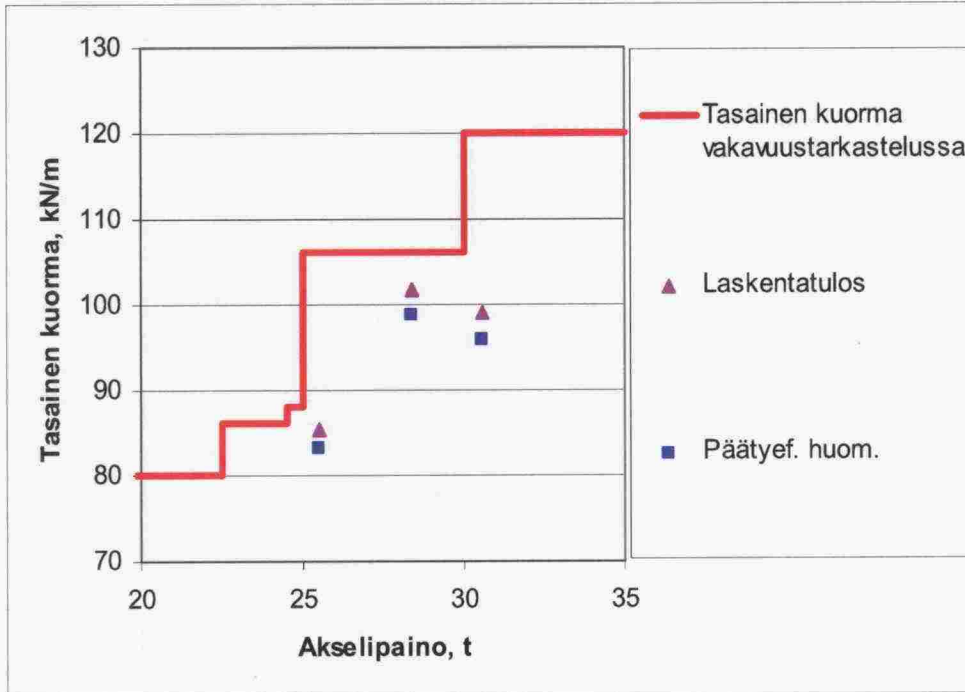
Kuvasta 34 voidaan havaita, että päätyvaikutusefekti huomioiden kaikissa tarkasteluissa käytetyillä kuormilla jäädään RAMOssa esitettyjen stabiliteettilaskennassa käytettävien laskentakuormitusportaiden alapuolelle. Pienimmällä akselipainolla ollaan kuitenkin lähinnä stabiliteettilaskennassa käytettävää nauhakuormaa.



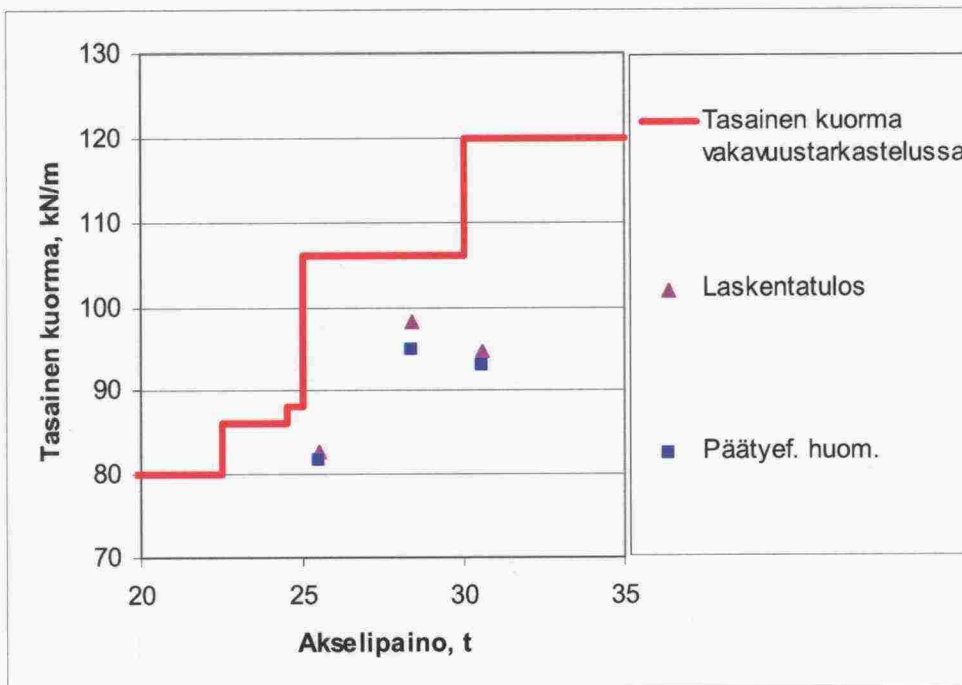
Kuva 34. Tarkastelussa saatujen alkuperäisten laskentatulosten mukainen maksimi kuorma ja päätyvaikutusefekti huomioiden saatu maksimi nauhakuorma yhdessä RAMOssa esitettyjen akselipainosta riippuvien nauhakuormien muodostamien kuormitusportaiden kanssa.

Kaikki edellä olevissa kuvissa esitetyt maksimiarvot esiintyivät, kuten olettaa saattaa, matalimmalla, 1,55 m paksuisella penkereellä. Kaikkien kuormitusten osalta maksimiarvot saavutettiin myös liukupintaolettamuksella L2, jolla myös varmuuskertoimet olivat pienimmät penkereen alta puuttuvan kuivakuoren johdosta. Erot eri liukupintaolettamuksien mukaisten tulosten välillä olivat melko pieniä. Sen sijaan pengerkorkeuden vaikutus oli jonkin verran suurempi. Kuvaa 34 vastaavat kuvaajat, joissa penkereiden korkeudet ovat 2,55 m ja 3,55 m, on esitetty kuvissa 35 ja 36. Kaikkien tarkastelutapausten lukuarvot on esitetty vielä taulukossa 8.

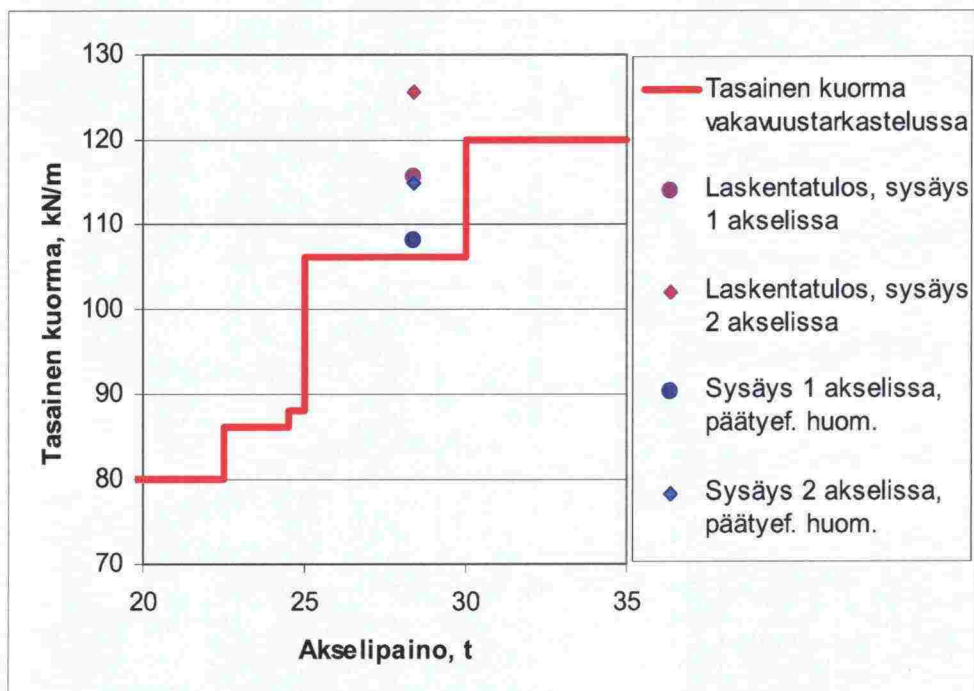
Sysäyskuormalla suoritettujen tarkastelujen tulokset on esitetty erillisinä kuvassa 37.



Kuva 35. Pengerkorkeus 2,55 m. Akselikuormista aiheutuvat maksiminauhakuormat ja RAMOssa esitetyt vakavuuslaskennassa käytettävien junakuormien kuormitusportaatt.



Kuva 36. Pengerkorkeus 3,55 m. Akselikuormista aiheutuvat maksiminauhakuormat ja RAMOssa esitetyt vakavuuslaskennassa käytettävien junakuormien kuormitusportaatt.



Kuva 37. Yhdessä tai kahdessa peräkkäisessä akselissa vaikuttavista sysäyskuormista aiheutuvat maksiminauhakuormat ja RAMOssa esitetyt vakavuuslaskennassa käytettävien junakuormien kuormitusportaot. Akseleissa vaikuttava staattinen kuorma on 287,5 kN ja käytetty sysäyskerroin 1,25 ($1,25 \cdot 278,5 = 348,1$ kN).

Taulukko 8. Eri akselikuormien aiheuttamien maksimirasitusten suuruus verrattuna tasaisen 80 kN/m nauhakuorman aiheuttamiin rasituksiin nähden eri pengerkorkeuksilla ja liukupintaotaksumilla.

Pengerkorkeus / liukupintaolettaamus	Päätyvaikutusefektillä korjatut arvot		
	K1, akselikuorma 250 kN	K2, akselikuorma 300 kN	K3, akselikuorma 278.5 kN
P1, h = 1.55 / L1	1.055	1.213	1.252
P1, h = 1.55 / L2	1.071	1.237	1.278
P1, h = 1.55 / L3	1.053	1.216	1.256
P2, h = 2.55 / L1	1.028	1.169	1.197
P2, h = 2.55 / L2	1.040	1.197	1.233
P2, h = 2.55 / L3	1.030	1.178	1.208
P3, h = 3.55 / L1	1.016	1.137	1.155
P3, h = 3.55 / L2	1.022	1.161	1.185
P3, h = 3.55 / L3	1.016	1.140	1.158

Edellä esitetyistä kuvista voidaan havaita, että akselikuormista maapohjaan aiheutuvat rasitukset ovat suurimpia matalimmalla penkereellä ja pienenevät jonkin verran pengerkorkeuden kasvaessa. Eri otaksuminen mukaisilla liukupinnoilla ei sen sijaan näytä olevan merkittävää vaikutusta rasituksen suuruuteen. Jonkin verran yllättävää on sen sijaan se, että akseleista aiheutuvat rasitukset eivät olleet suurimmillaan suurimmalla akselikuormalla 300 kN, vaan ne olivat suurimmillaan akselikuormalla 278,5 kN.

Suurimmalla akselikuormalla kuormitus jakautuu kuitenkin jonkin verran tasaisemmin. Suurimmalla akselikuormalla pyörien väli on 2,0 m (vrt. 1,8 m), telien väli 9,0 m (vrt. 8,65 m) ja koko vaunun pituus 15,0 m (vrt. 13,92 m).

Tuloksista voidaan havaita myös, että päätyvaikutusefektin vaikutus tuloksiin on melko pieni. Päätyvaikutusefekti voi kuitenkin syntyä ainoastaan sellaisissa tilanteissa, joissa liukupinnan osuuksien välissä liukupinnalla vaikuttavissa voimissa on eroja. Jos kahden vierekkäisen liukupinnan osuuden liukupinnalla vaikuttavat voimat ovat samansuuruiset, ei päätyvaikutusefektiä luonnollisestikaan voi syntyä. Efektin vaikutus pienenee syvemmälle siirryttäessä, koska kuormitus syvemmällä jakaantuu jo muutenkin tasaisemmin.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että tarkasteluissa esimerkkeinä käytetyillä kalustoilla akseleista maapohjaan aiheutuvat rasitukset ovat käytännössä, osittain akselikuormista määräytyvän mitoitusnauhakuorman tulkintavasta riippuen, mitoitusnauhakuorman tasolla tai sen alapuolella. Tämä koskee erityisesti matalia penkereitä. Korkeammilla penkereillä marginaalit ovat suurempia. Tarkastelussa saatuja tuloksia yleistäen marginaalit saattavat olla pienempiä myös tässä yhteydessä käytetyn akselikuorman vaihtelualueen, 250...300 kN, alapäässä kuin yläpäässä.

Sysäyskuormien vaikutusta on tarkasteltu esimerkinomaisesti yhdellä akselikuormatasolla matalalla penkereellä. Tarkastelussa yhdellä tai kahdella peräkkäisellä akselilla on käytetty suuruudeltaan 1,25 olevaa sysäyskerrointa. Mikäli sysäyskuorman vaikutusta arvioidaan tässä yhteydessä käytetyllä laskentamenettelyllä ja tuloksia arvioidaan vakavuuslaskennassa käytettävän staattiseen akselipainoon perustuvan nauhakuorman kriteerien mukaan, ylittävät saadut rasitukset akselipainon mukaisen nauhakuorman. Ylitykset ovat 2...8 % suuruusluokkaa. Siihen, onko käytetty sysäyskerroin realistinen ja siihen, mikä on maapohjan lujuus dynaamisen kuorman suhteen, ei oteta kantaa tässä selvityksessä. Voidaan kuitenkin todeta, etteivät nykyisen RAMOn mukaiset stabiliteettitarkasteluissa käytettävät viivakuormaoletukset sisällä merkittäviä sysäyksiä. Erityisen ongelmallisiksi voidaan todeta radan epätasaisuudesta johtuvat sysäykset, koska pitkillä raskaasti kuormitetuilla junilla kuormitukset kohdistuvat toistuvasti samassa maapohjakohdassa.

9 TARPEET NYKYISEN MITOITUSMENETELMÄN TÄSMENTÄMISEKSI JA SUOSITUKSET JATKOSELVITYKSIKSI

RAMOn osan 1 kappaleessa 1.43 on liikkuvan kaluston paino rajattu siten, että suurin sallittu metripaino on 8 t/m akselipainosta riippumatta. RAMOn osan 3 taulukon 3.7:2 mukaan vakavuuslaskennassa käytetään akselipainosta riippuvaa ”kuvitteellista” nauhakuormaa. Eli stabiliteettilaskennassa käytettävä nauhakuorma ei ole sama kuin todellinen junasta aiheutuva keskimääräinen nauhakuorma. Kappaleen 8 Johtopäätökset kuvasta 34 (matalan penkereen porraskuva) nähdään, että nykyisin käytössä oleva kuormitusotaksuma vastaa tarkasti kolmiulotteisen tarkastelun antamia kuormia. Eli pysähtyneen junan aiheuttaman staattisen kuorman aiheuttama rasitus vastaa hyvin nykyisen RAMOn osan 3 stabiliteettitarkasteluissa käytettäväksi edellytetyjä kuormitusotaksumia, eikä RAMOn osan 3 päivitystarvetta tältä osin ole.

RAMOn osan 3 junakuormaa käsittelevää osiota tulisi kuitenkin täsmentää seuraavasti:

- Sysäyskerrointa 1,0 käytetään vain penkereen stabiliteettilaskennassa (staattinen tila määräävä).
- Perusrakenteet, jotka käyttäytyvät luonnonmaapohjia jäyemmin, kuten tukiseinät, stabiloinnit yms. mitoitetaan käyttäen 10 % korotettua vakavuuslaskennan nauhakuormaa (taulukko 3.7:2), taikka sysäyskertoimella korotettua akselikuormaa.
- Lisätään sysäyskertoimen laskentakaava RAMOon.

Nykyisessä stabiliteettimitoituksessa lähdetään otaksumasta, että vaarallisin kuormitus tilanne syntyy pysähtyneen junan alle. Se, pitääkö tämä oletus paikkaansa, vaatii kuorman dynaamisuuden vaikutuksen selvittämistä sekä kuorman että maan lujuuden suhteen. Dynamiikan vaikutus kuormaan olisi luontevinta sisällyttää tarkasteluun käyttäen samaa sysäyskerrointa kuin muihinkin ratapengerrakenteisiin. Edellisessä RAMOn osan 3 versiossa oli esitetty julkaisun ”Track Part of the System Railway” /3/ mukainen empiiriseen aineistoon perustuva sysäyskertoimen kaava:

$$\varphi_v = 1 + n \cdot \left(1 + 0.5 \frac{v - 60}{K_i} \right), \text{ kun nopeus } v > 60 \text{ km/h.}$$

missä

v on junan nopeus [km/h]

n radan kunnosta riippuva kerroin 0.15...0.25

K_i matkustajajunilla 190 ja tavarajunilla 80

Kaava antaa normaalitilanteissa sysäyskertoimen arvoja 1,15...1,3.

RAMOn taulukon 3.7:2 laatiminen on perustunut Vilho Roosin, Pekka Vuolan ja Pauli Kolisojan tekemiin tarkistuksiin, jolloin pohjalla on ollut NBIU:n (Nordisk Banteknisk Ingenjörutbildning) koulutusaineisto. Aineistossa on ollut jonkinasteinen dynaamisen kuorman huomioiminen mukana (P. Vuola, suull. kommunikointi).

Yleisesti on tunnettua, että kuormitusnopeudella on vaikutusta saven lujuuteen. Se, kuinka paljon saven tai turpeen käytettävissä oleva lujuus on suurempi kuin vastaava

pitkäaikainen lujuus ja kuinka pitkäaikainen ja lyhytaikainen rasitustila ovat vakavuuden suhteen tarkasteltavissa yhdessä, vaatisi selvittämistä. Nykyisen RAMOn osan 3 kuormituksilla pohjamaan lujouden kasvu nopeita kuormituksia vastaan näyttäisi kattavan dynaamisen kuormituksen kasvusta aiheutuvat suuremmat jännitykset.

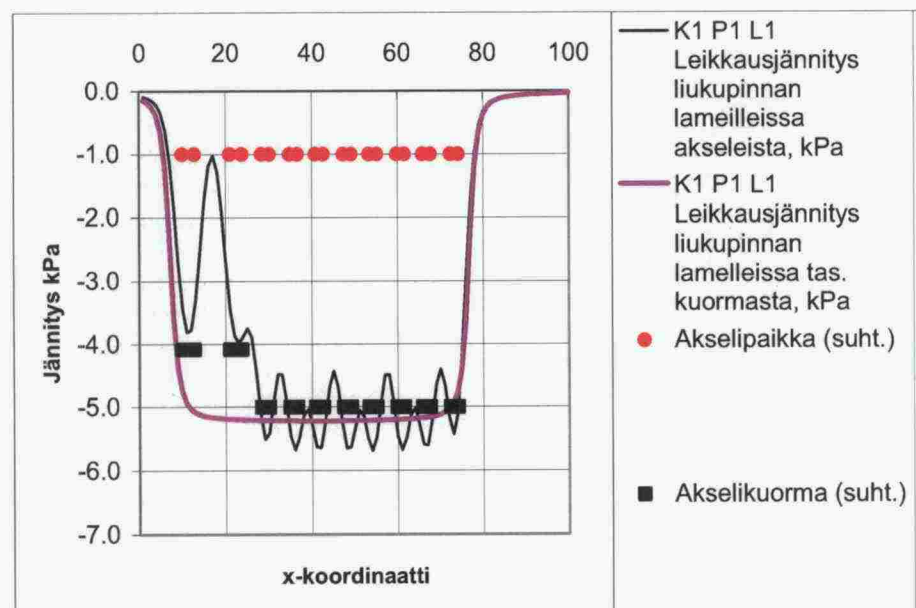
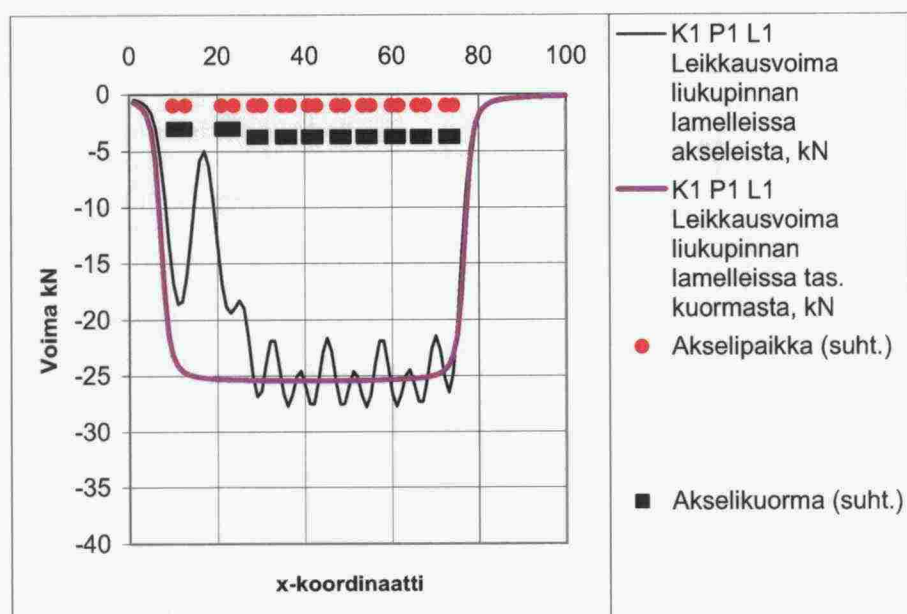
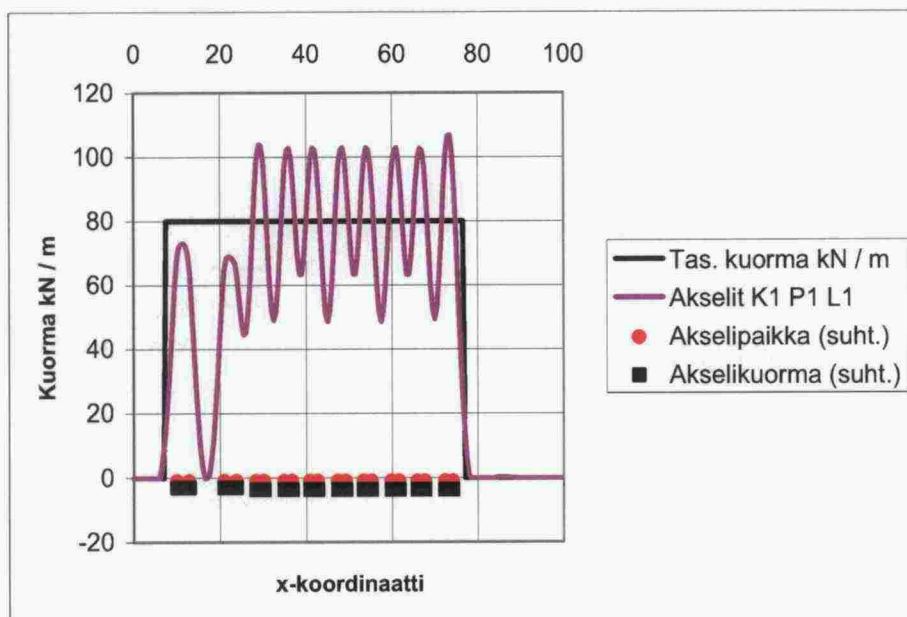
LÄHDELUETTELO

/1/ Bowles, J. E., Foundation analysis and design. Fourth edition. McGraw-Hill Publishing Company. 1988. 937 p. + app.

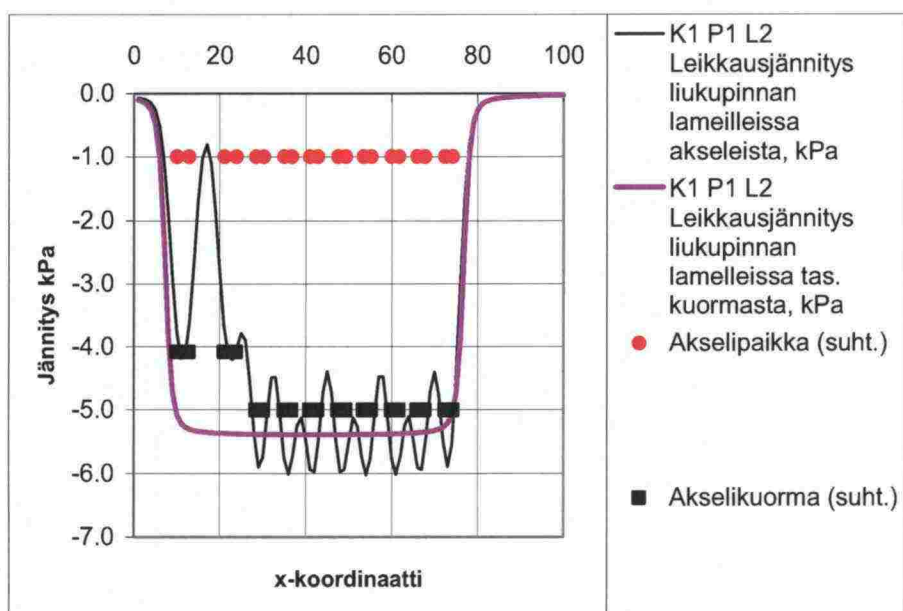
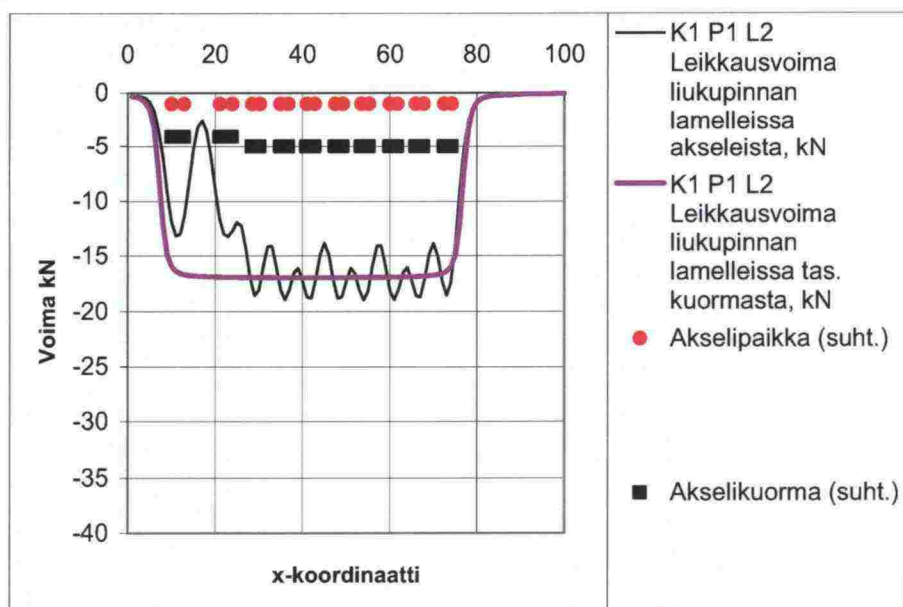
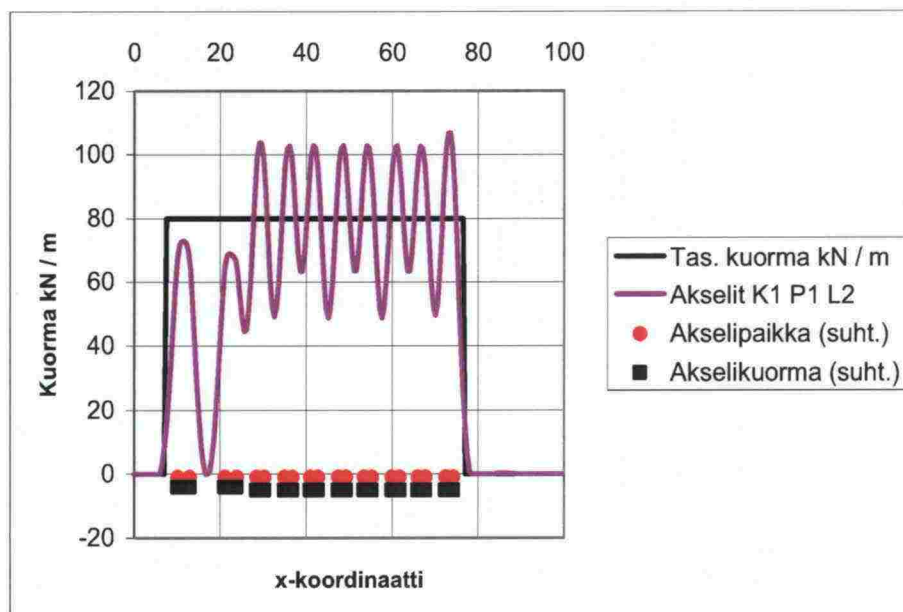
/2/ Poulos, H. G., Davis, E. H., Elastic solutions for Soil and Rock Mechanics, John Wiley & Sons Inc. 1974. 424 p.

/3/ Riessberger, K., Track Part of the System Railway.

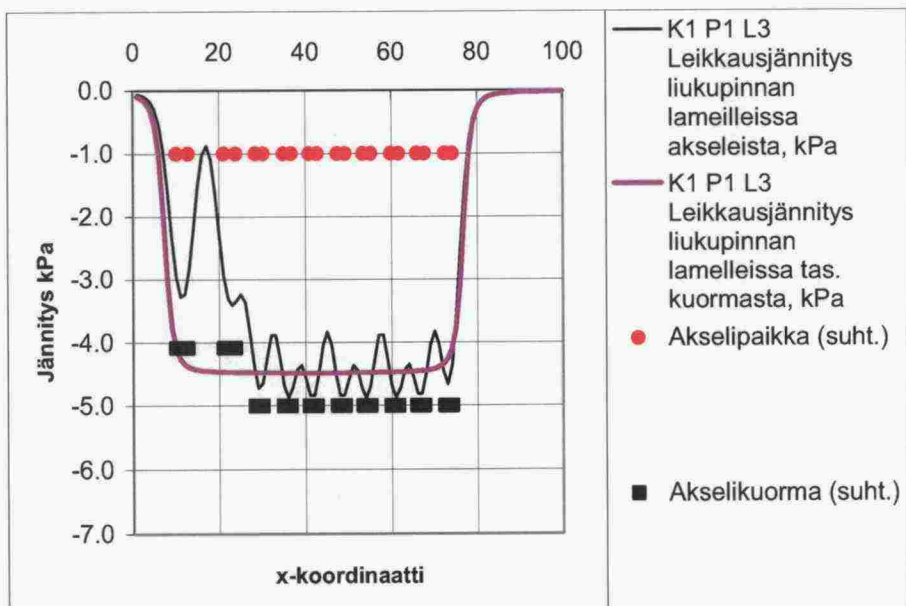
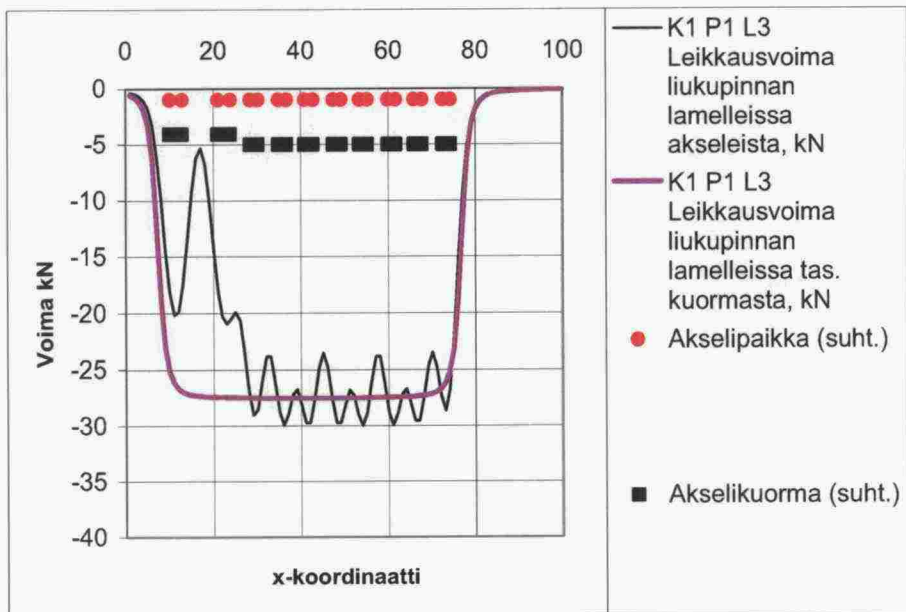
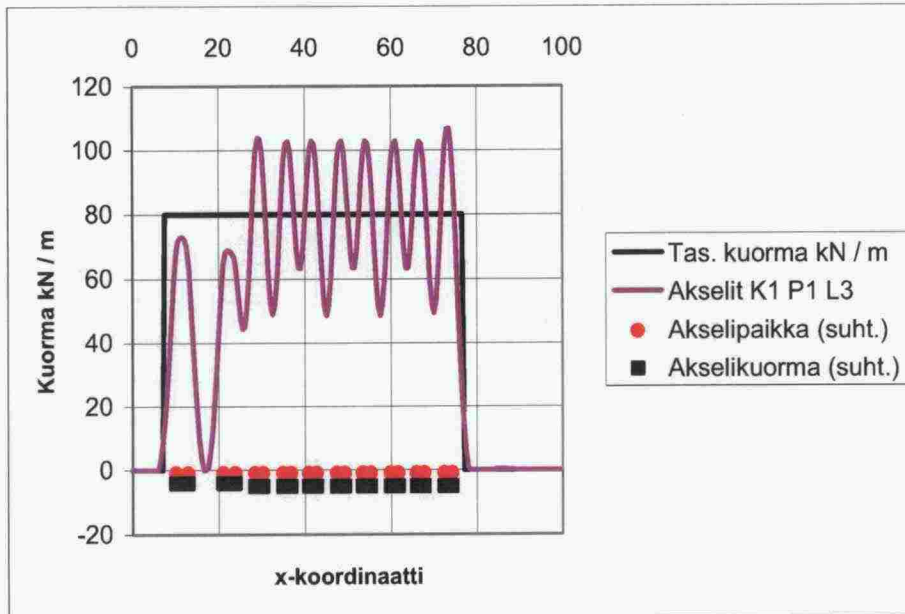
Tarkastelutapaus K1 P1 L1. Vaunujen akselikuorma 250 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



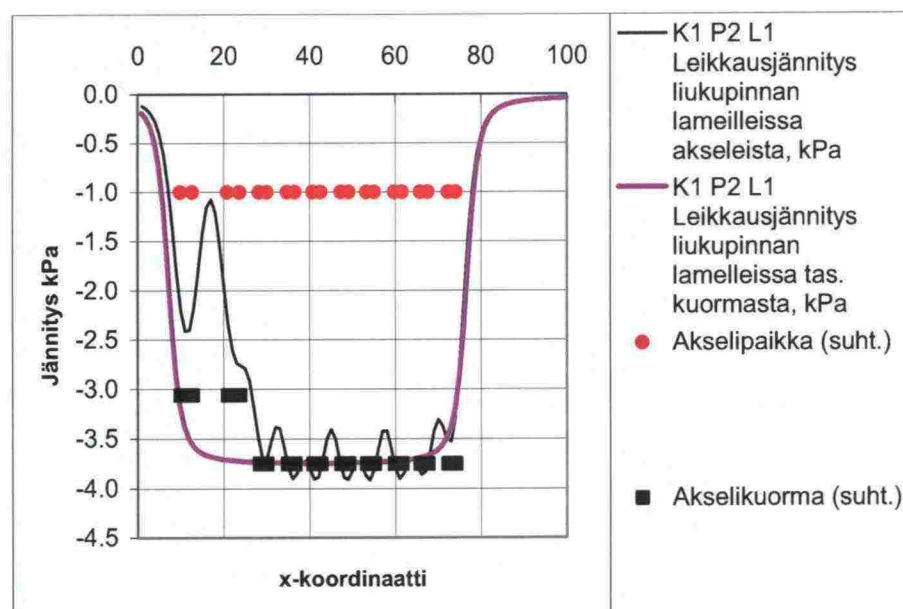
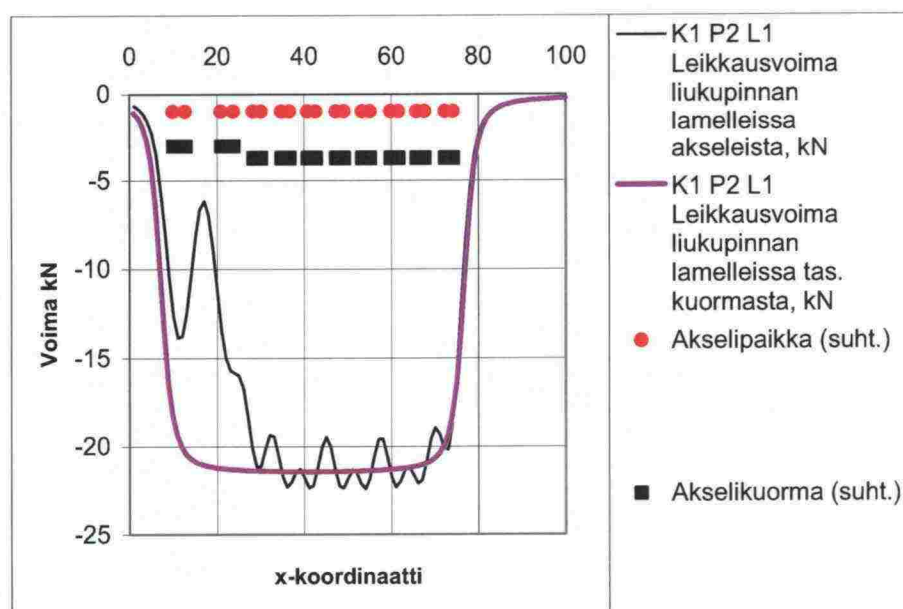
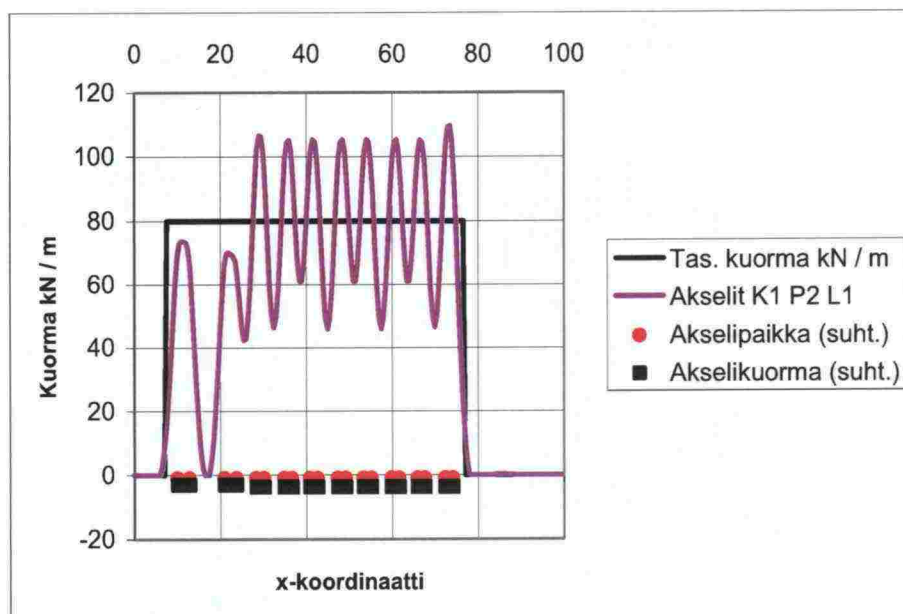
Tarkastelutapaus K1 P1 L2. Vaunujen akselikuorma 250 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



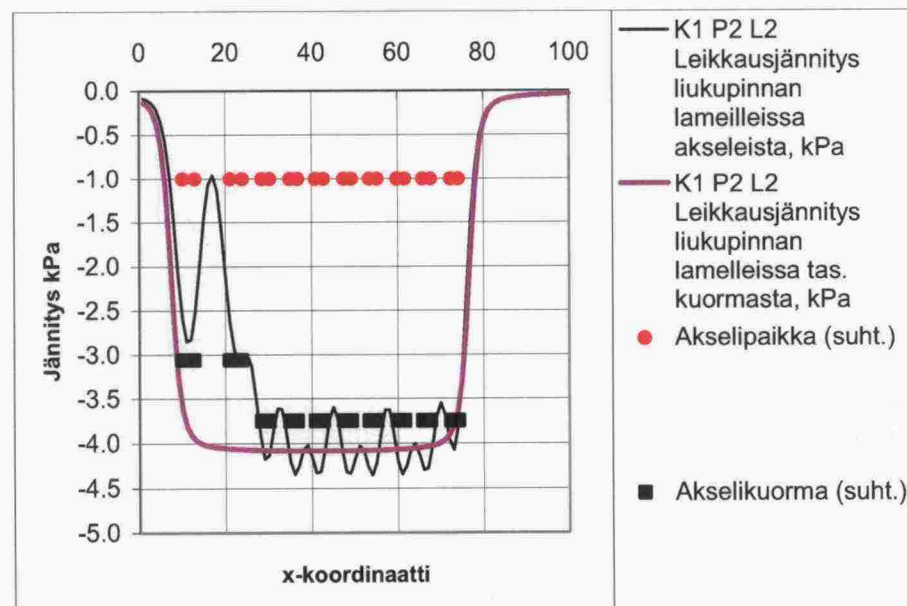
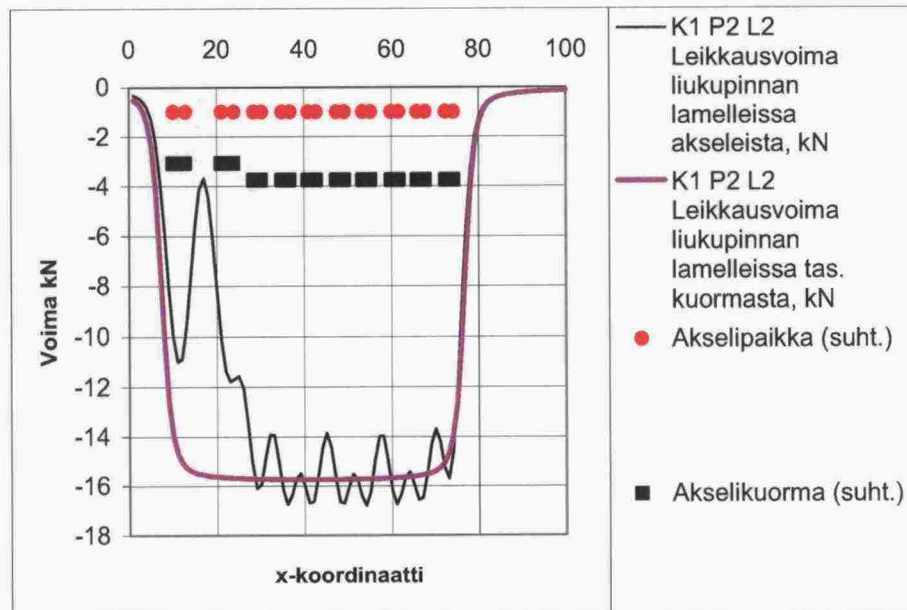
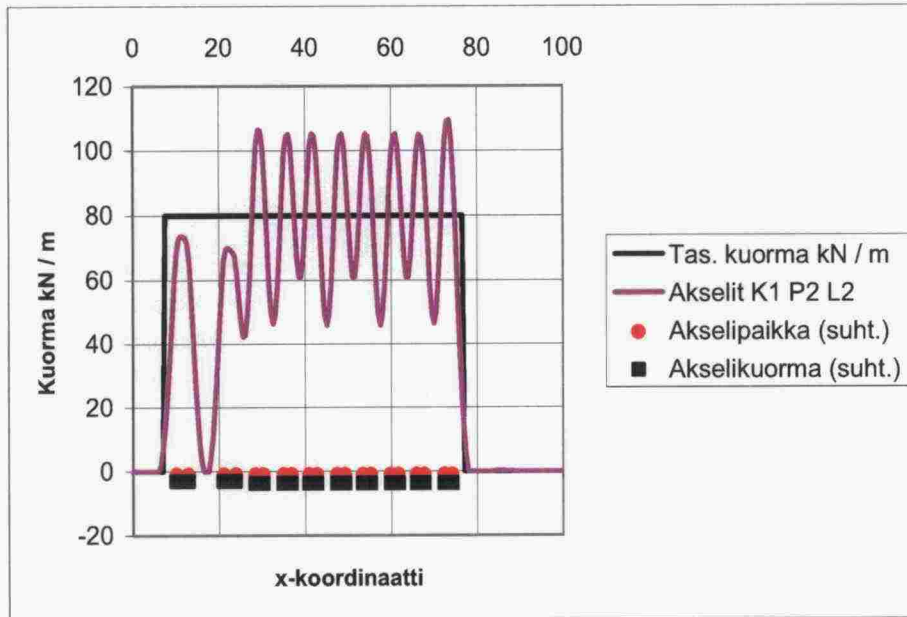
Tarkastelutapaus K1 P1 L3. Vaunujen akselikuorma 250 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



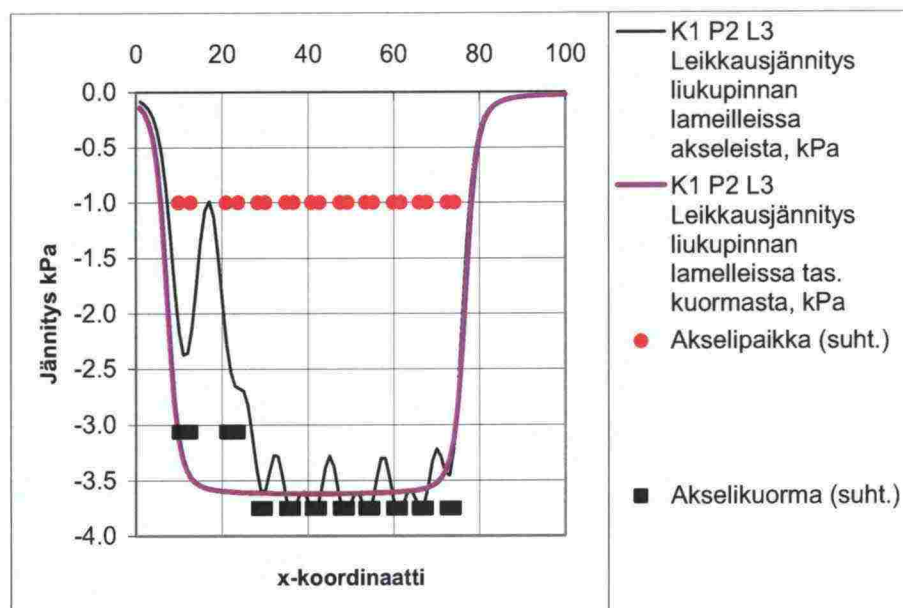
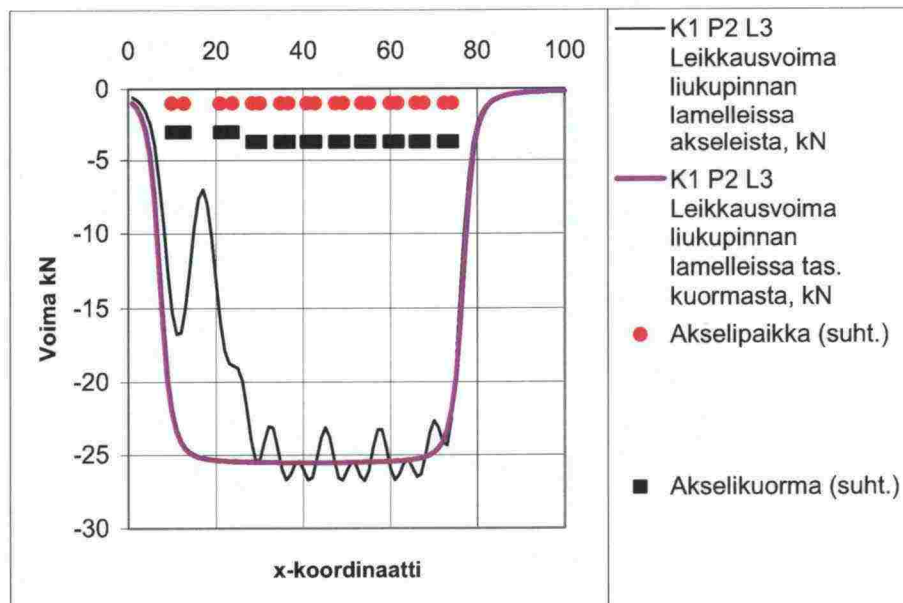
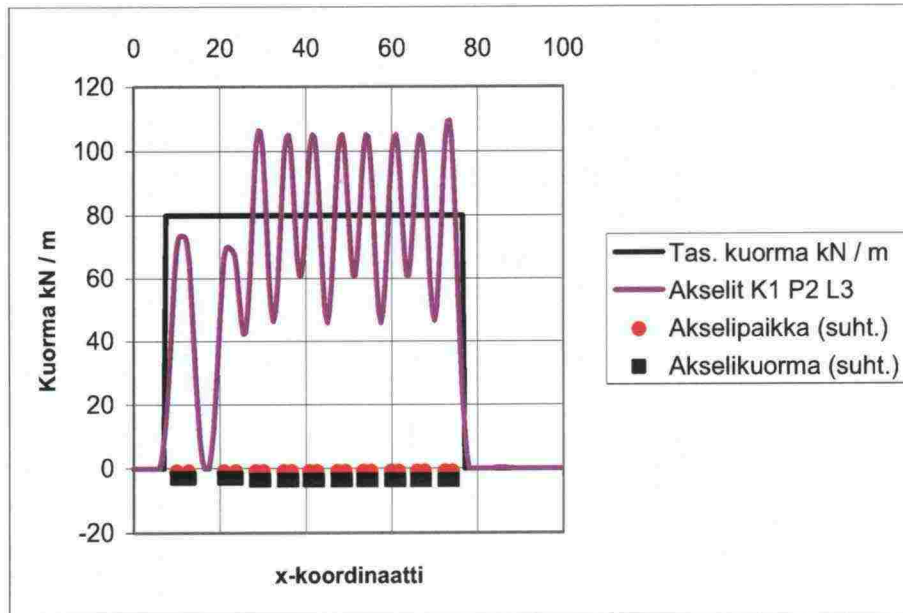
Tarkastelutapaus K1 P2 L1. Vaunujen akselikuorma 250 kN, pengerkorkeus 2,55 m.



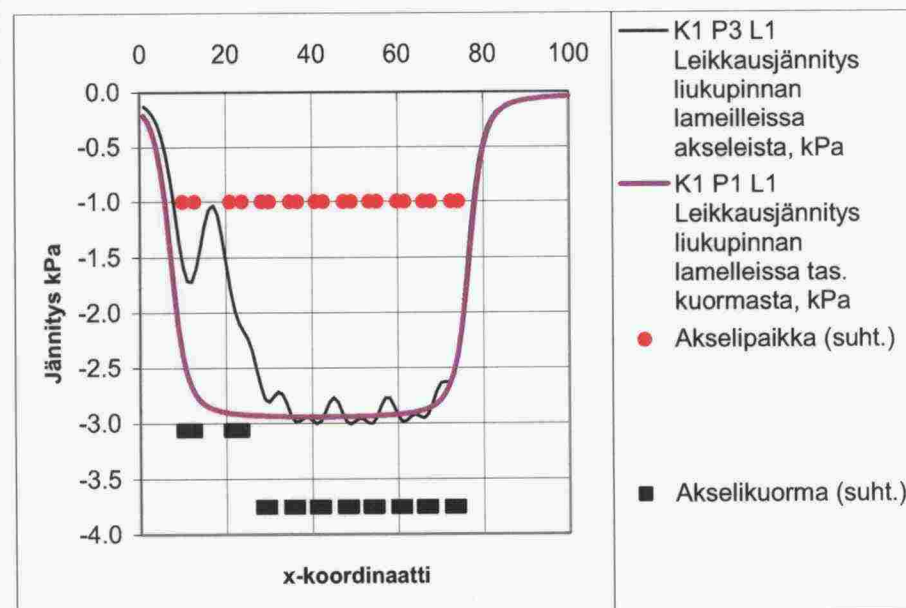
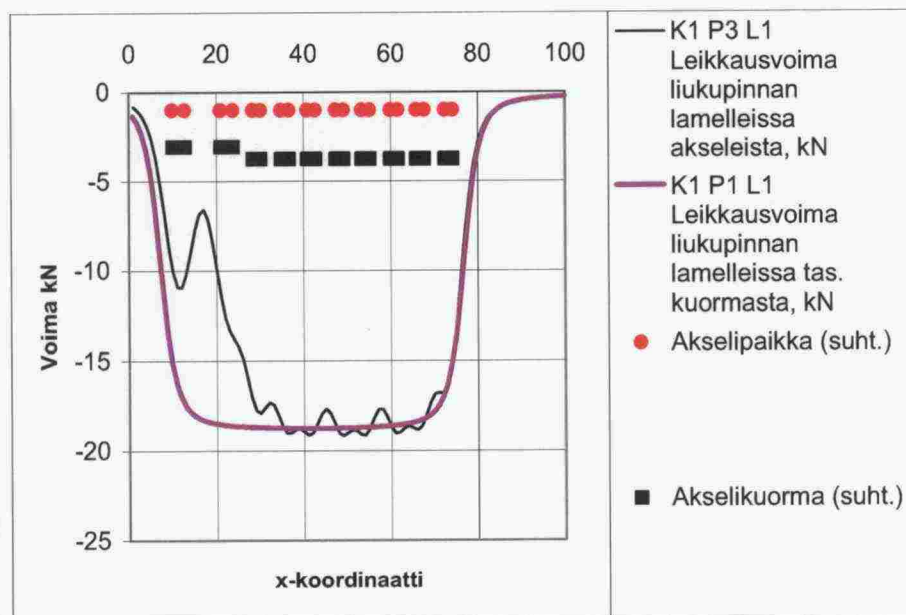
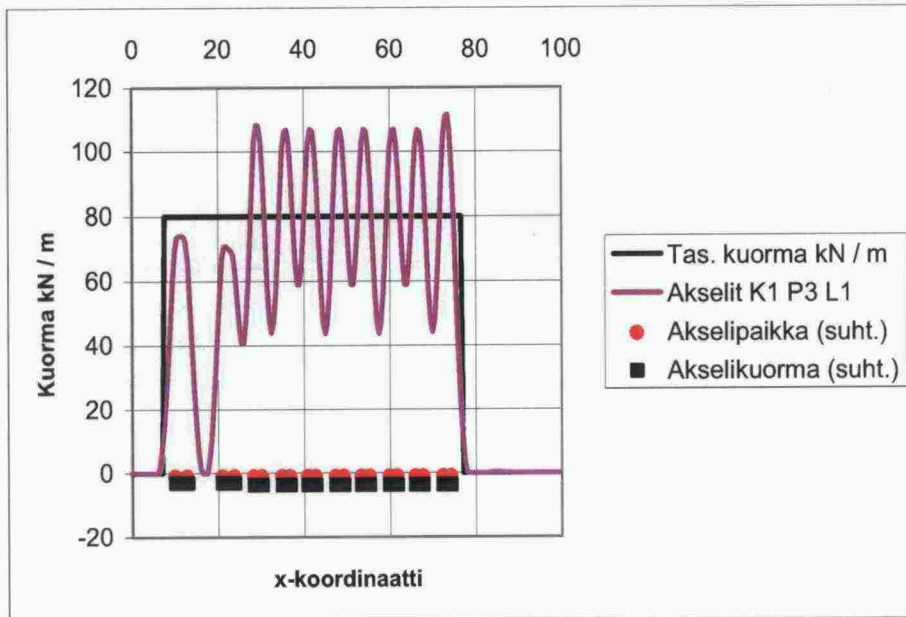
Tarkastelutapaus K1 P2 L2. Vaunujen akselikuorma 250 kN, pengerkorkeus 2,55 m.



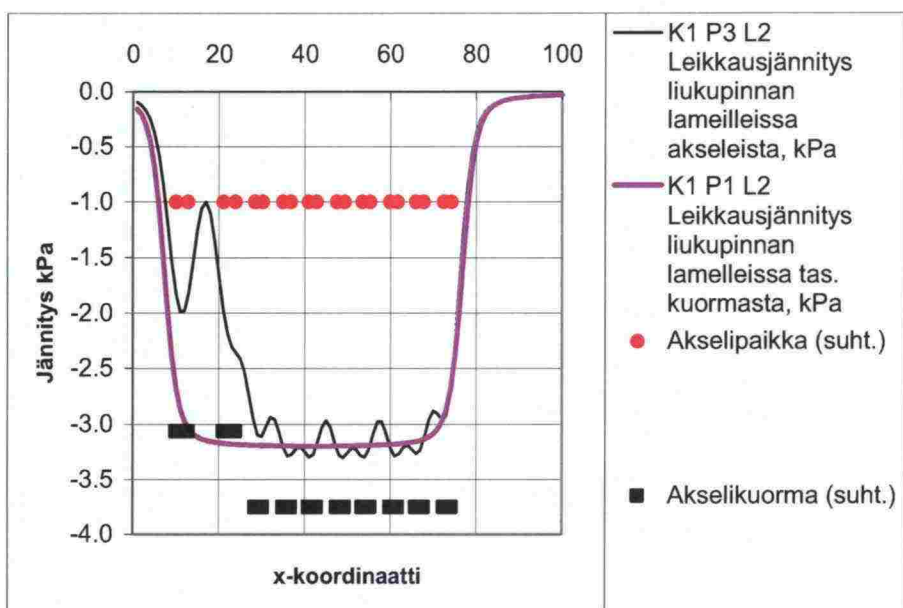
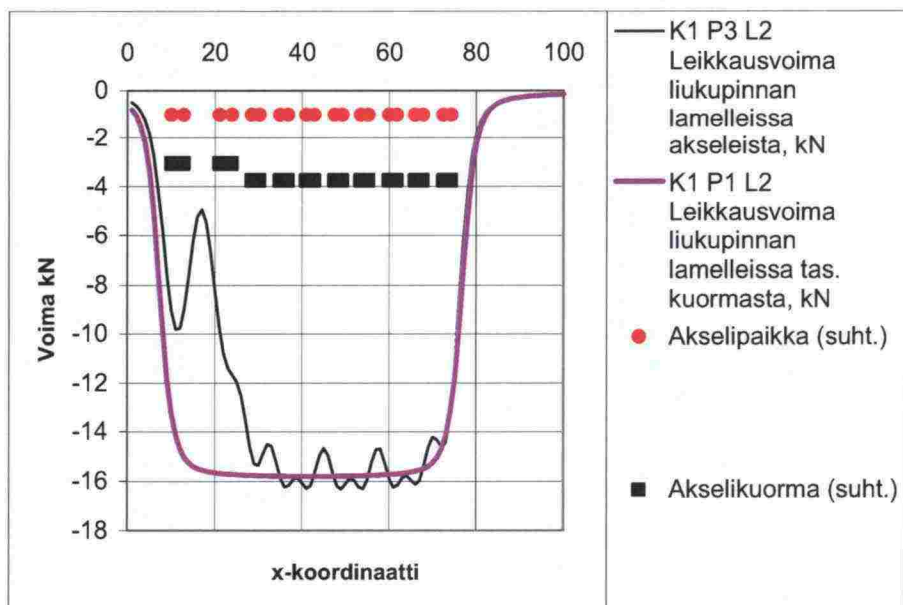
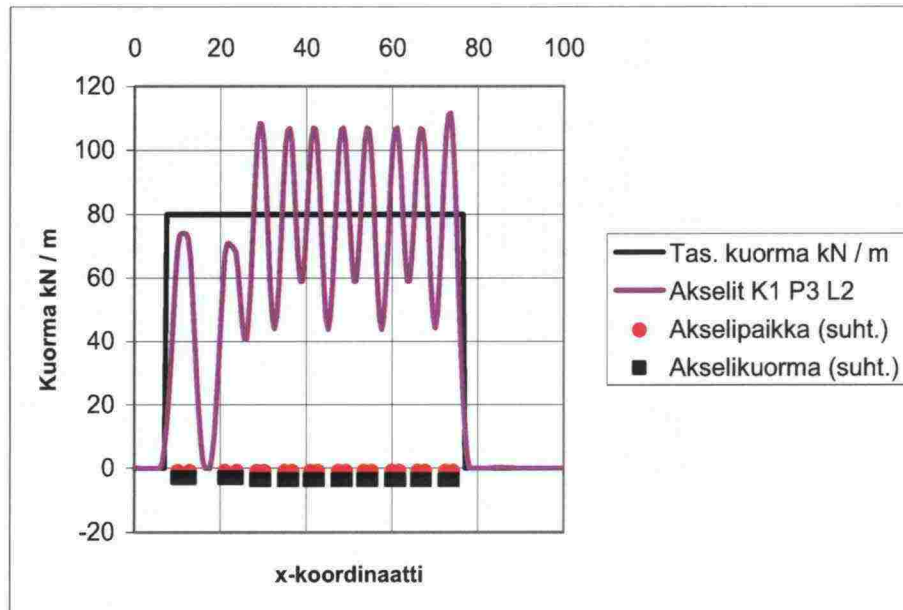
Tarkastelutapaus K1 P2 L3. Vaunujen akselikuorma 250 kN, pengerkorkeus 2,55 m.



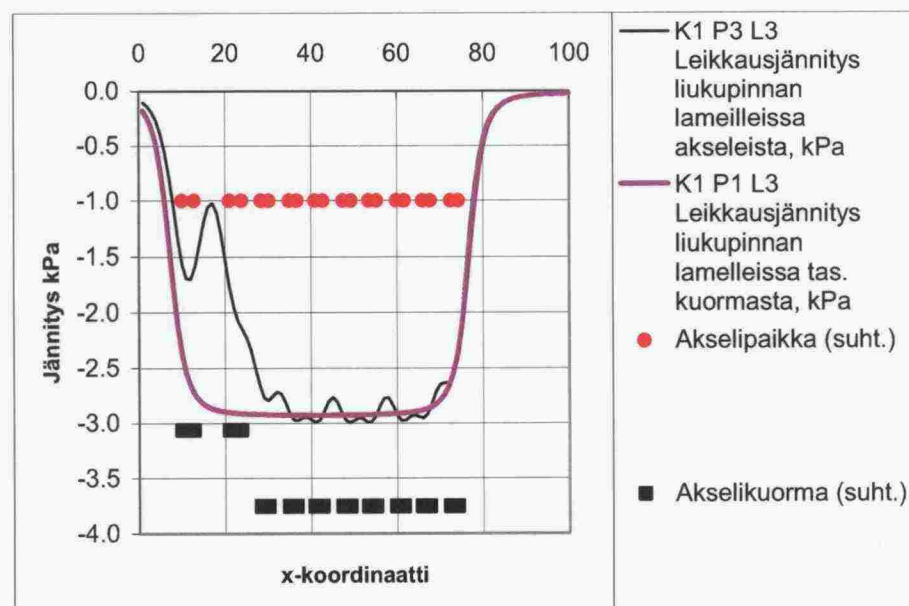
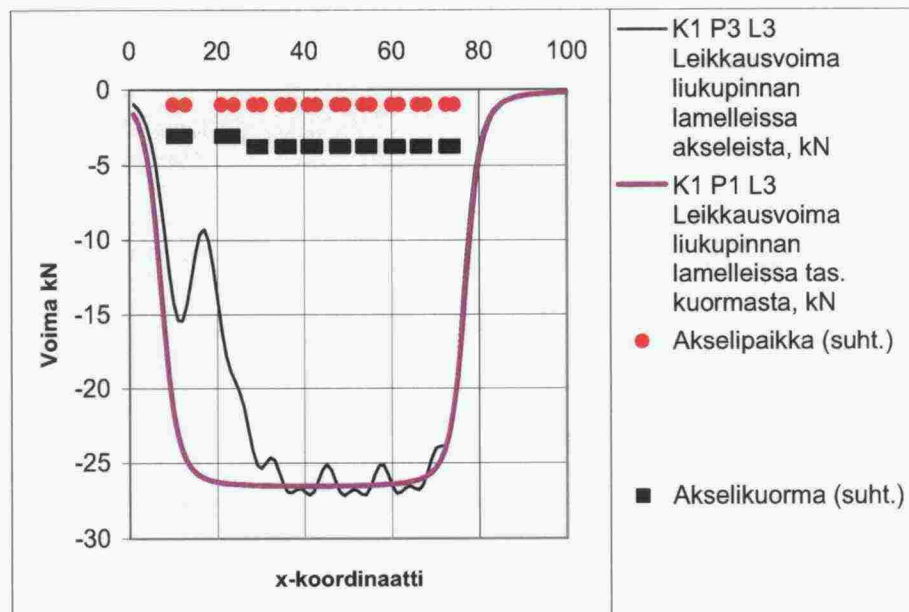
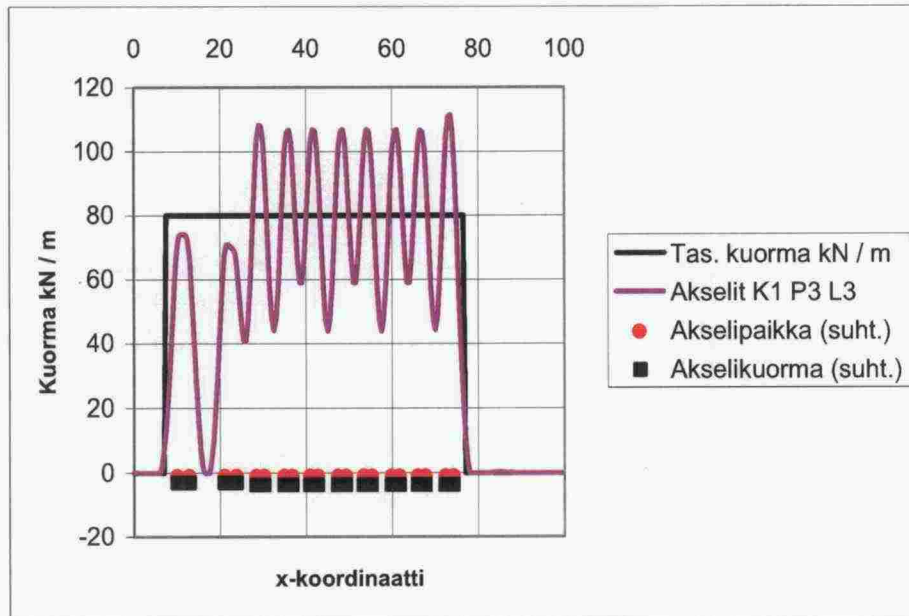
Tarkastelutapaus K1 P3 L1. Vaunujen akselikuorma 250 kN, pengerkorkeus 3,55 m.



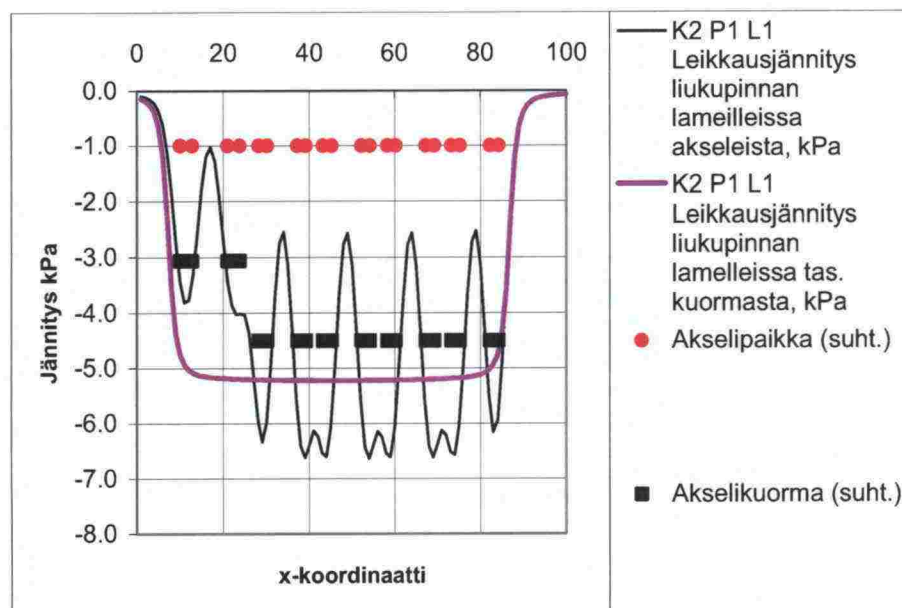
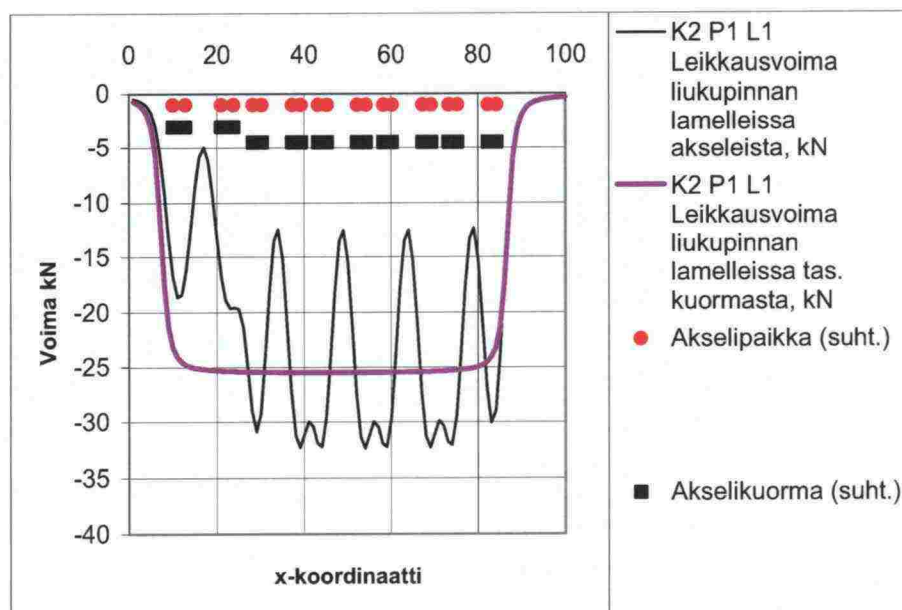
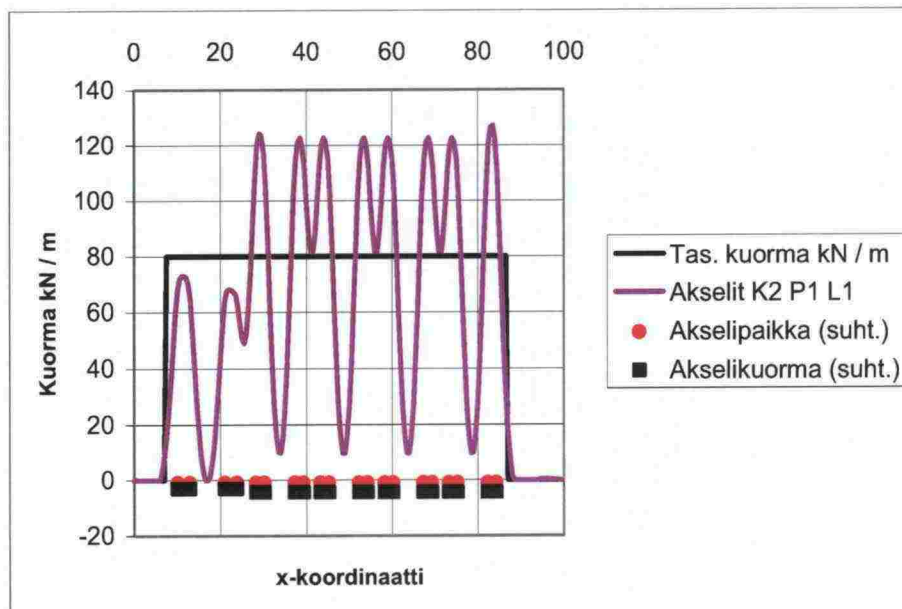
Tarkastelutapaus K1 P3 L2. Vaunujen akselikuorma 250 kN, pengerkorkeus 3,55 m.



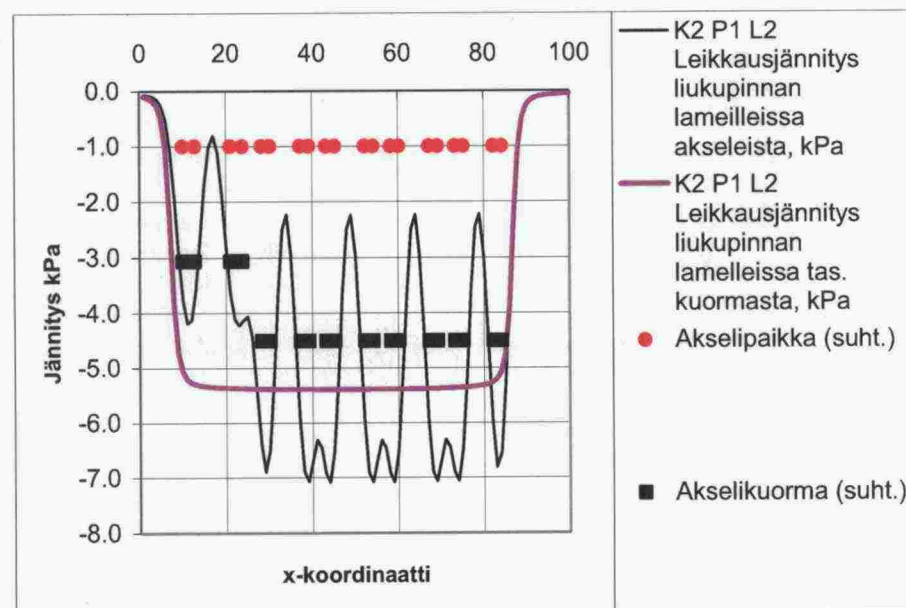
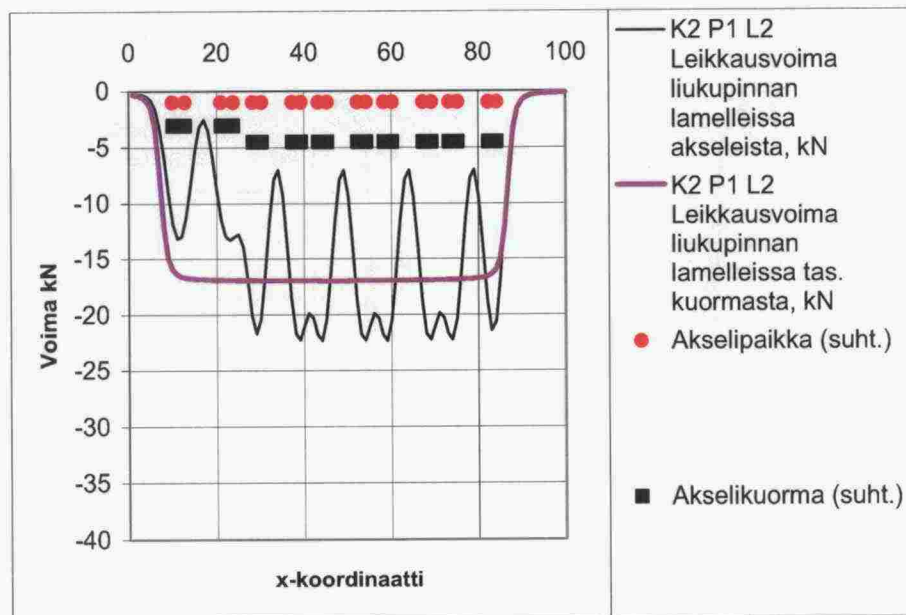
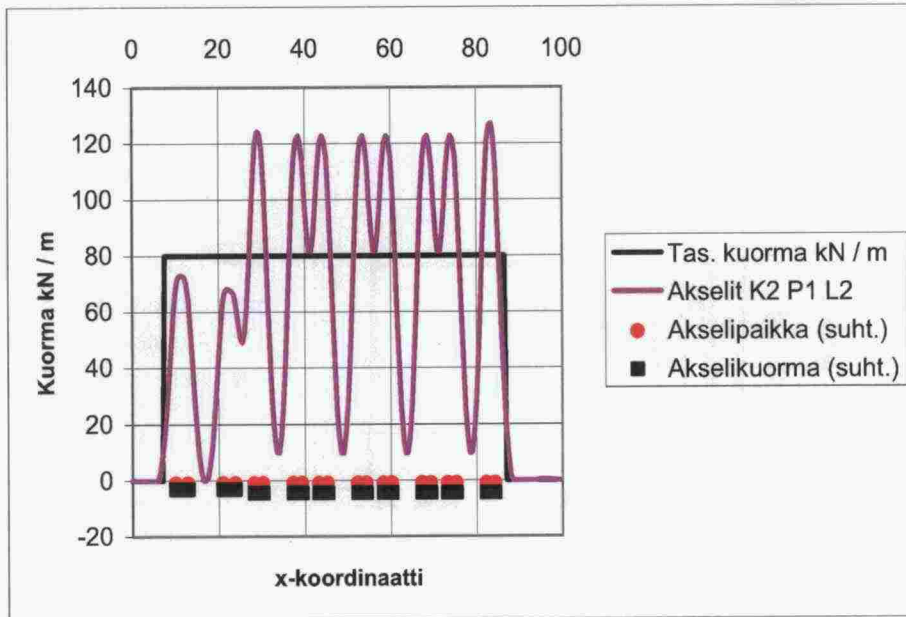
Tarkastelutapaus K1 P3 L3. Vaunujen akselikuorma 250 kN, pengerkorkeus 3,55 m.



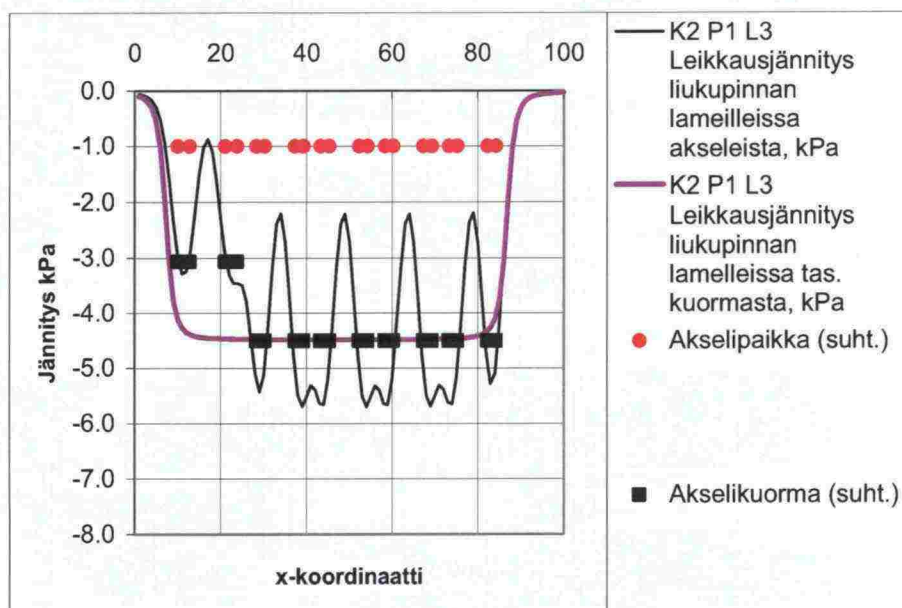
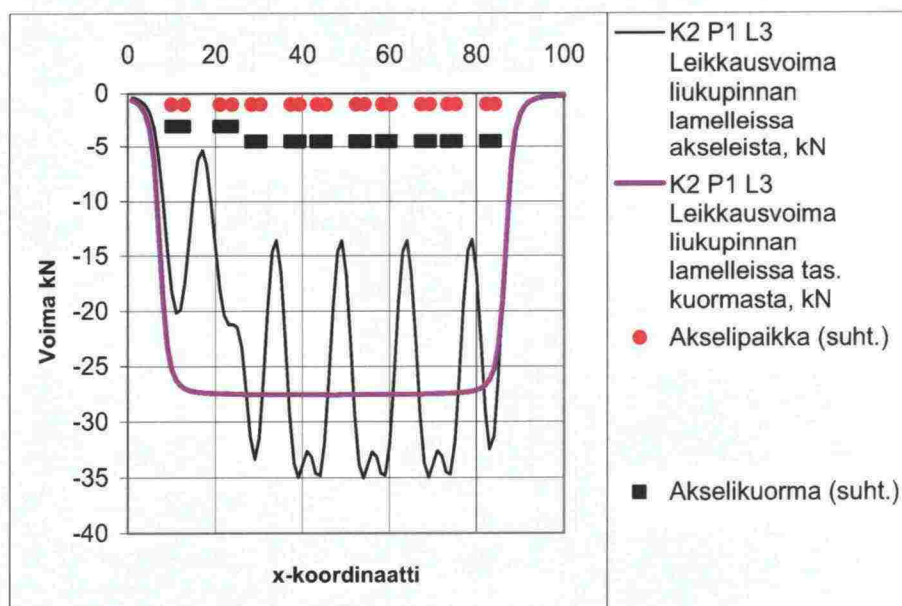
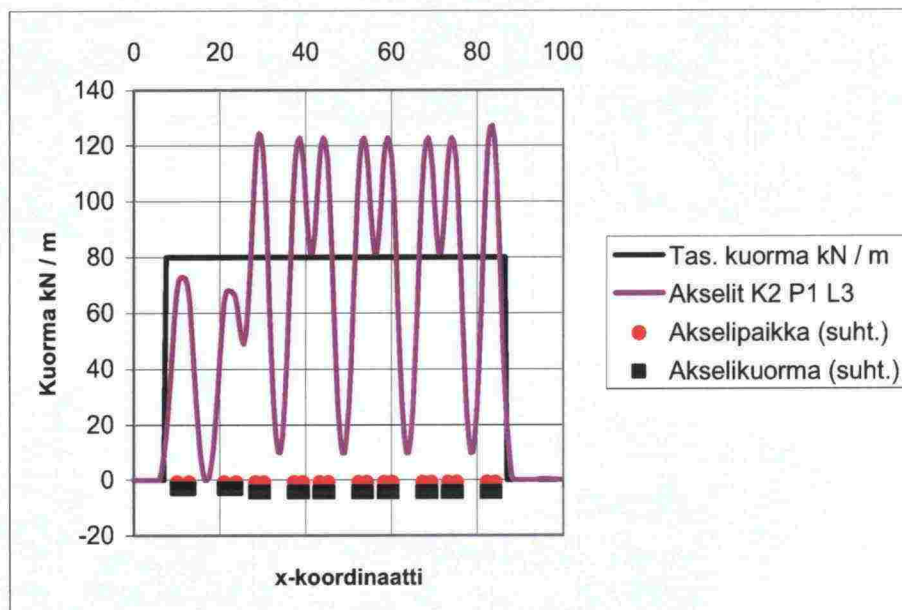
Tarkastelutapaus K2 P1 L1. Vaunujen akselikuorma 300 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



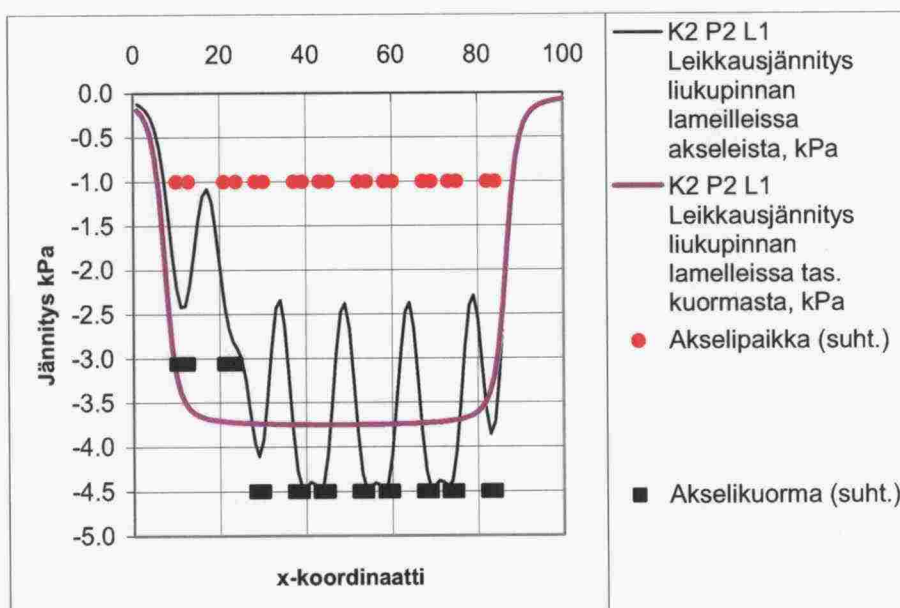
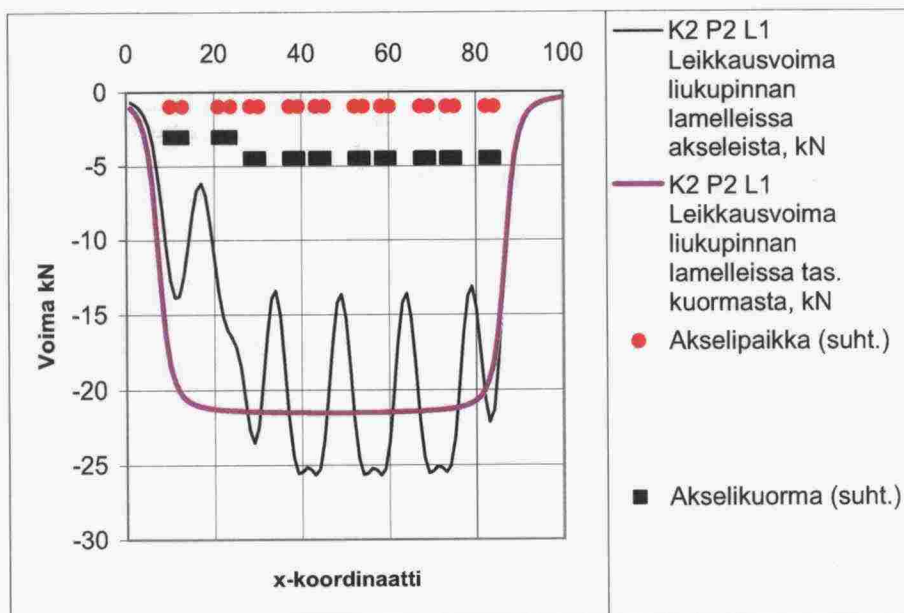
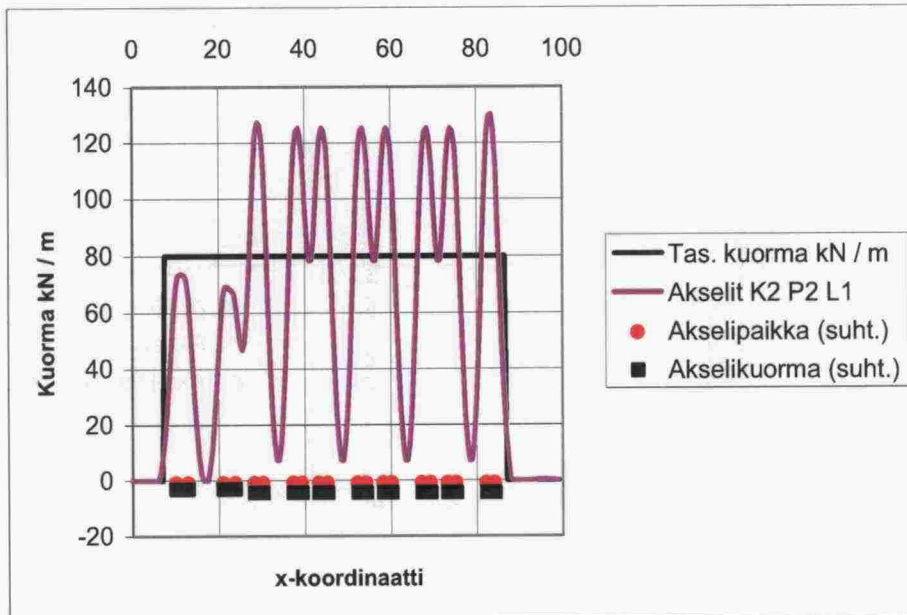
Tarkastelutapaus K2 P1 L2. Vaunujen akselikuorma 300 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



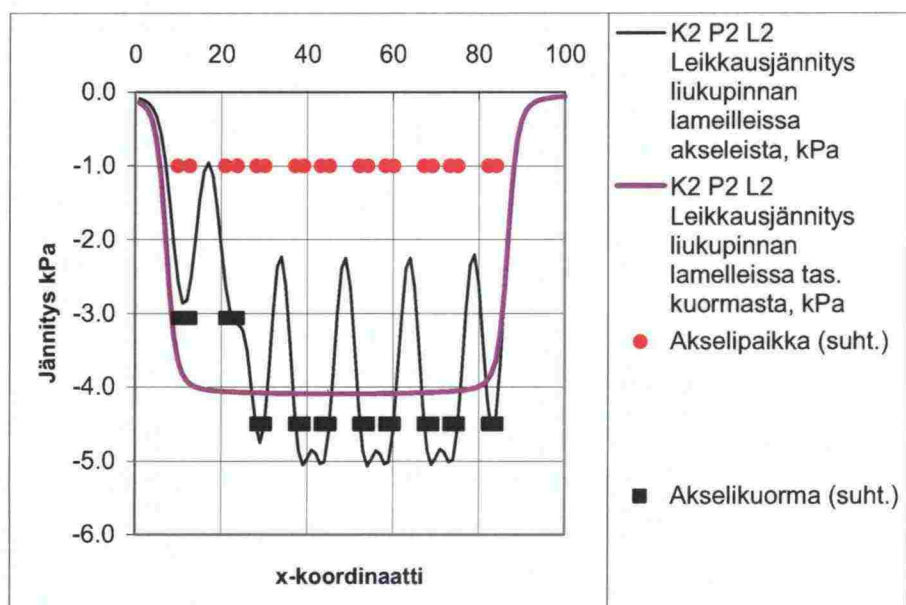
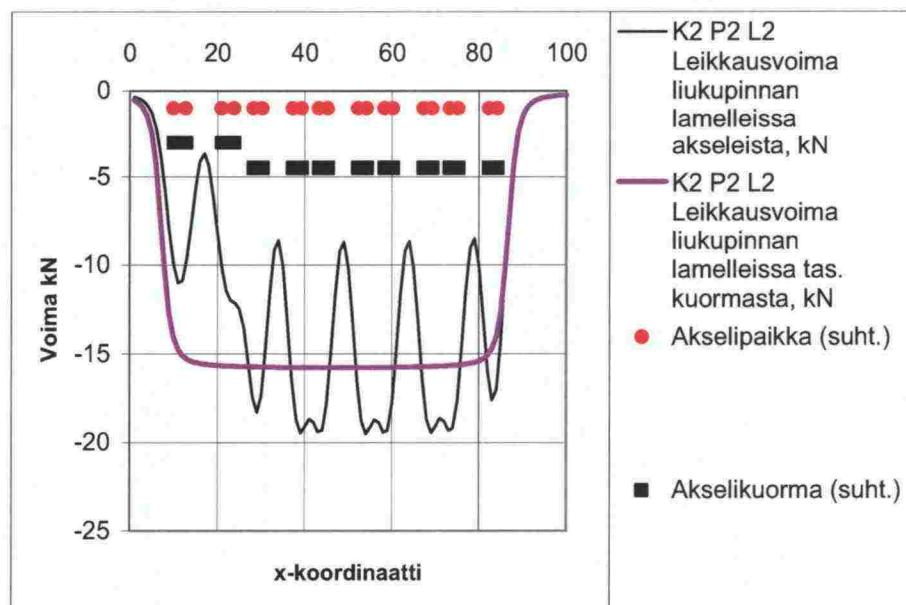
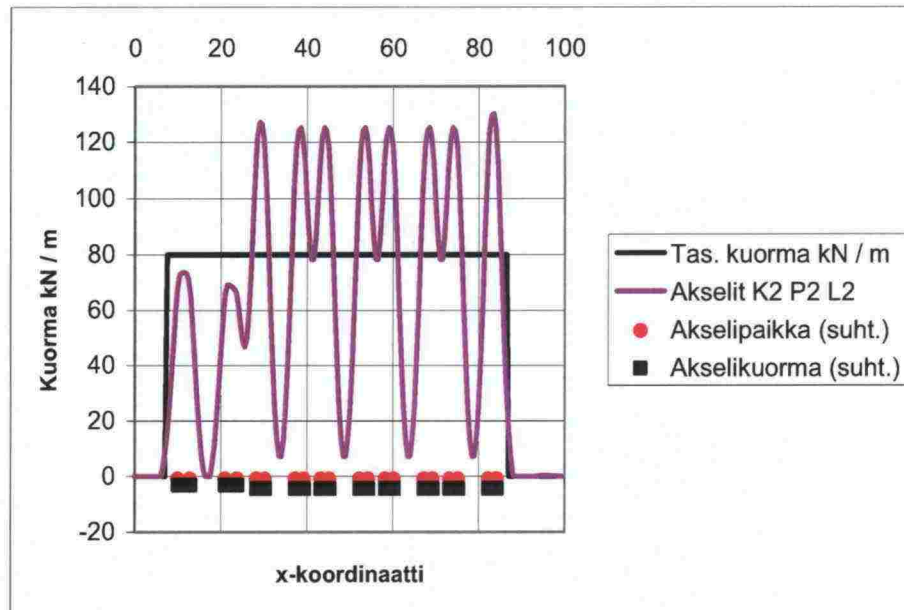
Tarkastelutapaus K2 P1 L3. Vaunujen akselikuorma 300 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



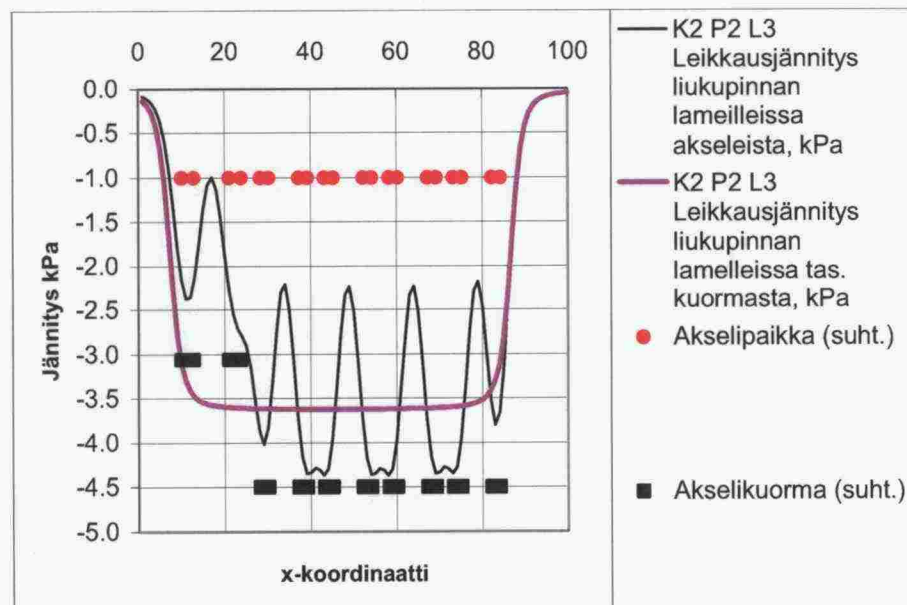
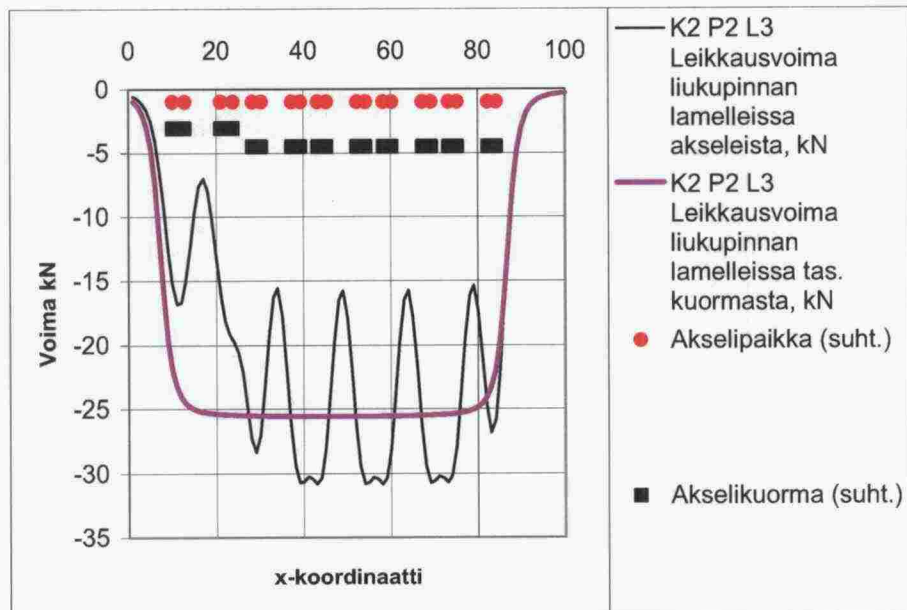
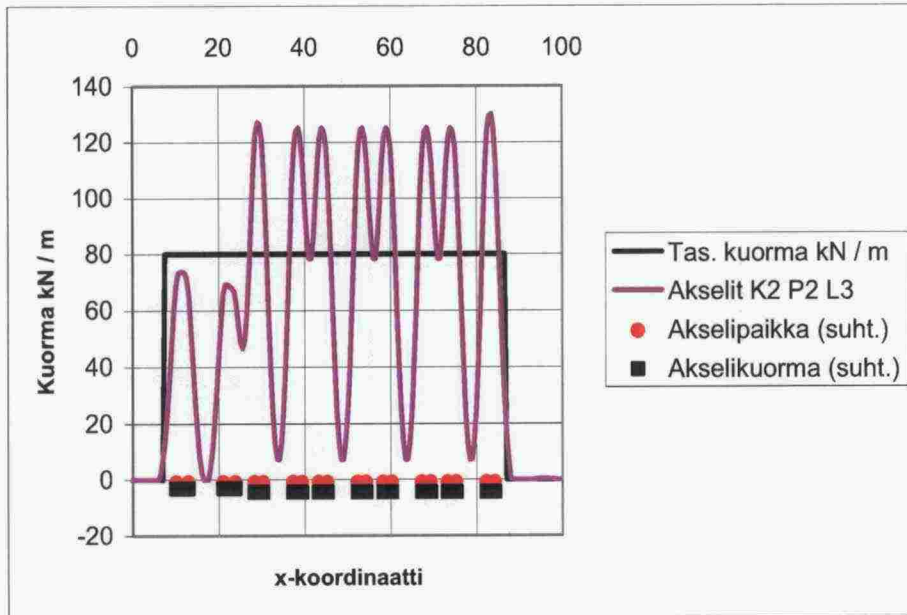
Tarkastelutapaus K2 P2 L1. Vaunujen akselikuorma 300 kN, pengerkorkeus 2,55 m.



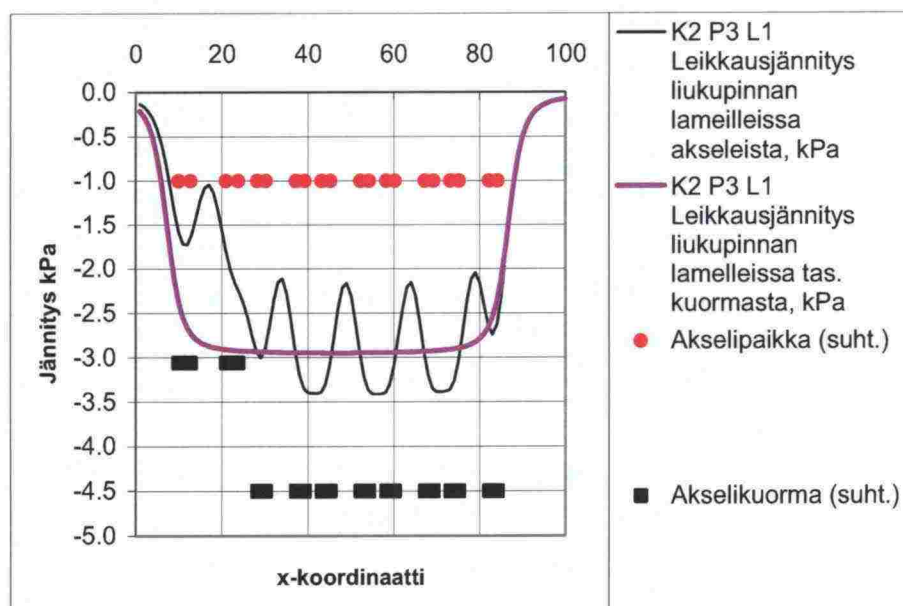
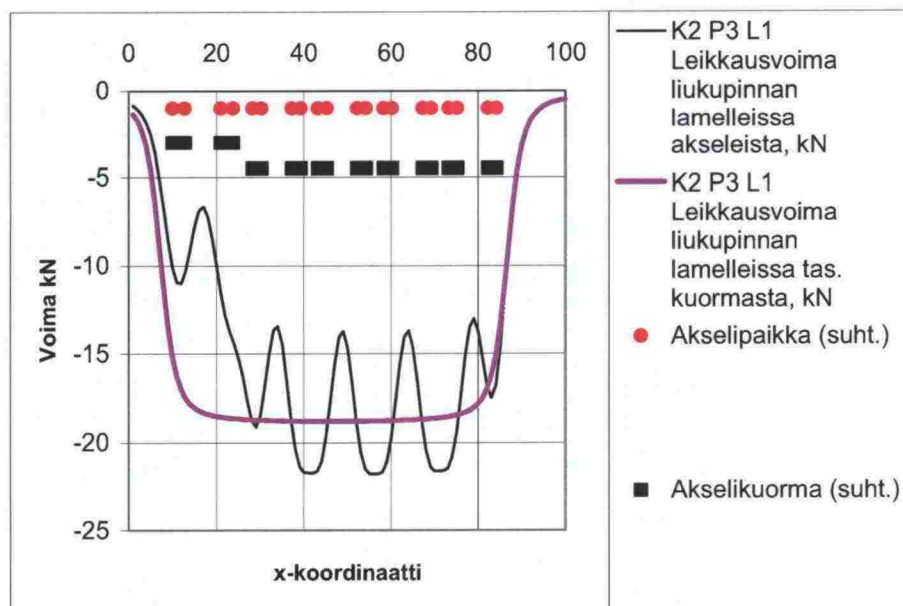
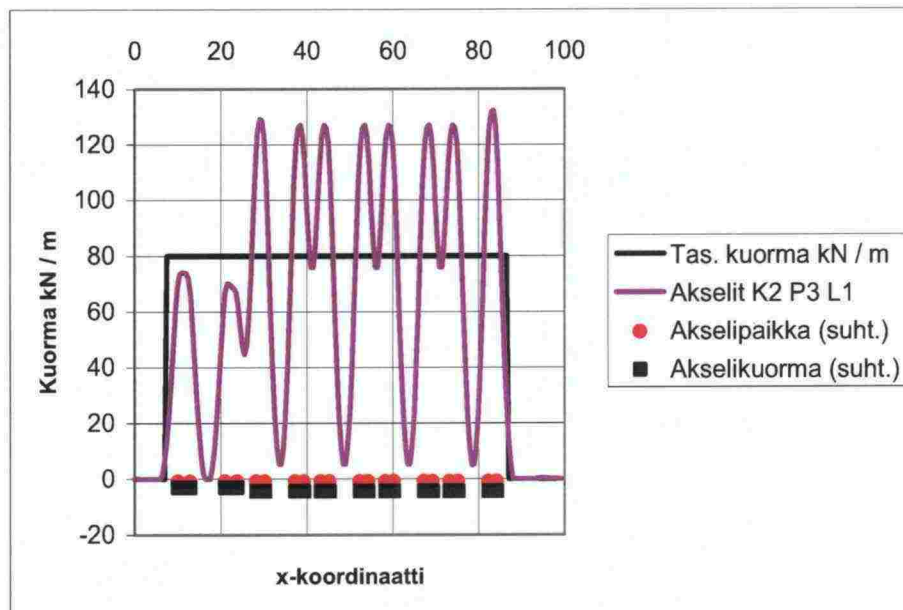
Tarkastelutapaus K2 P2 L2. Vaunujen akselikuorma 300 kN, pengerkorkeus 2,55 m.



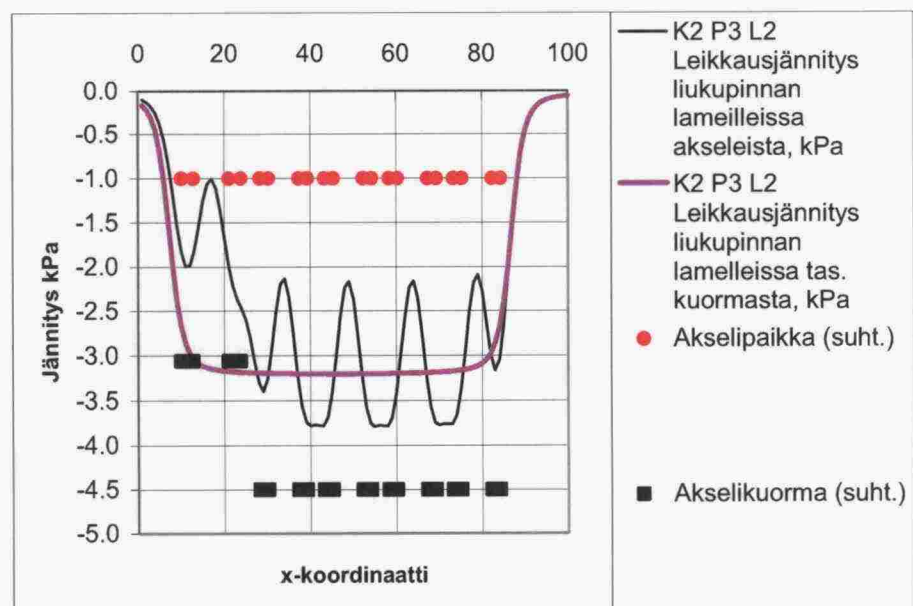
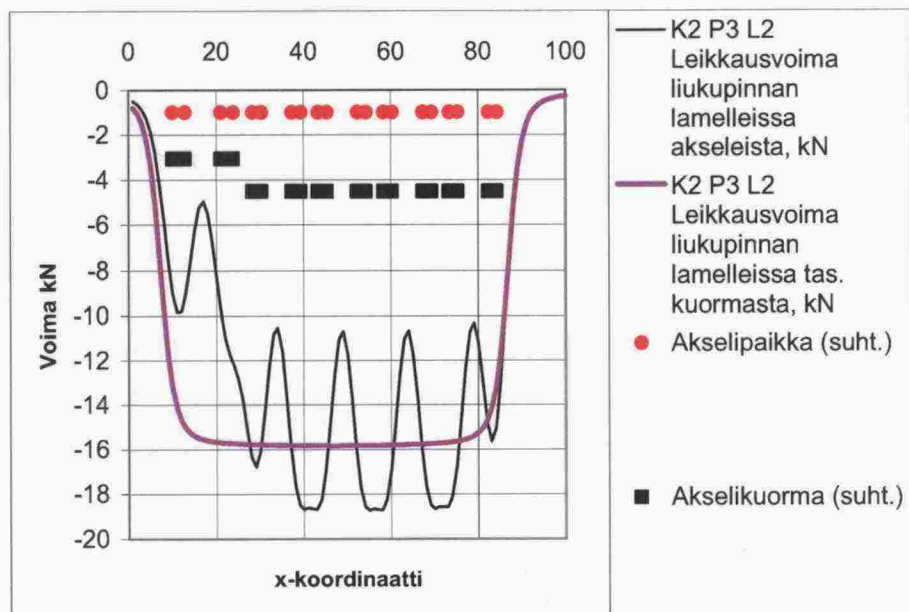
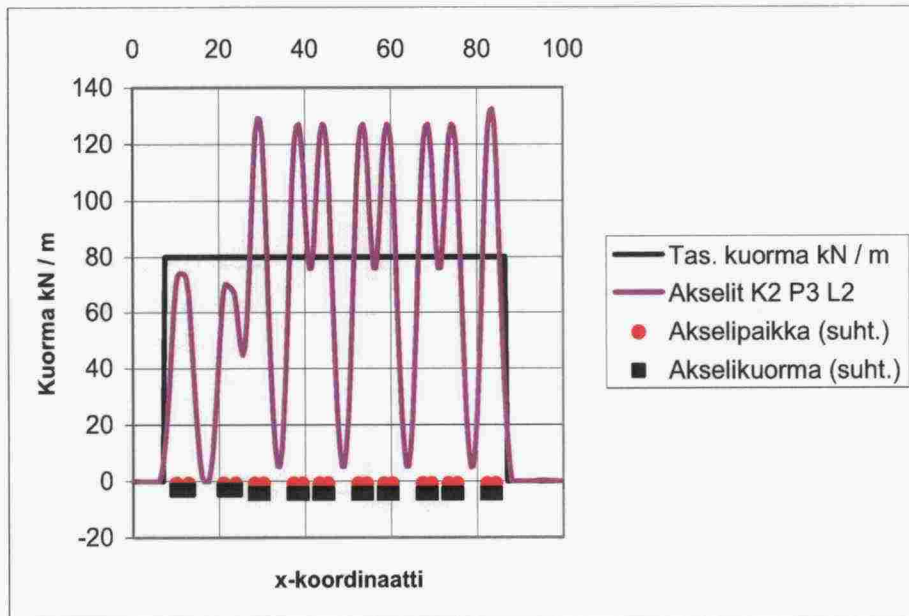
Tarkastelutapaus K2 P2 L3. Vaunujen akselikuorma 300 kN, pengerkorkeus 2,55 m.



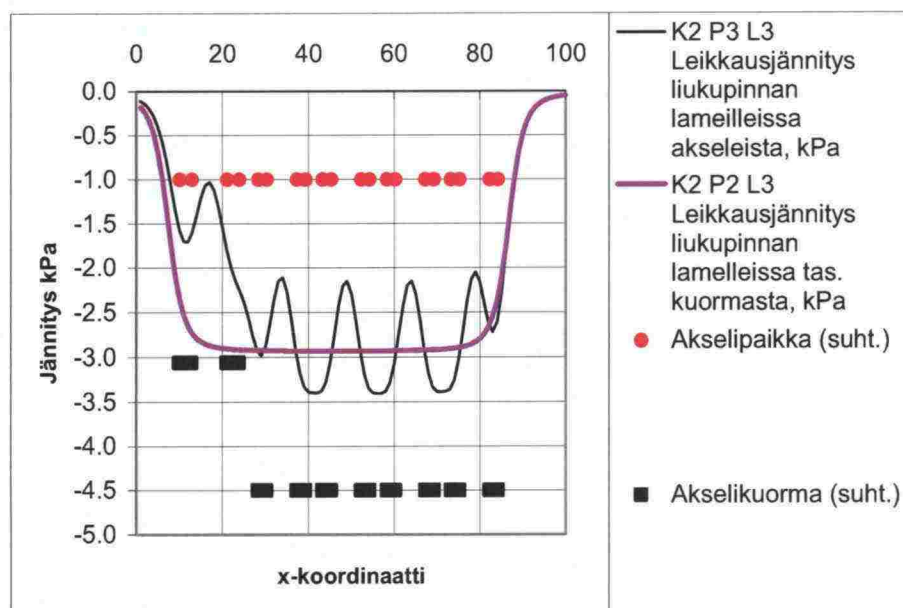
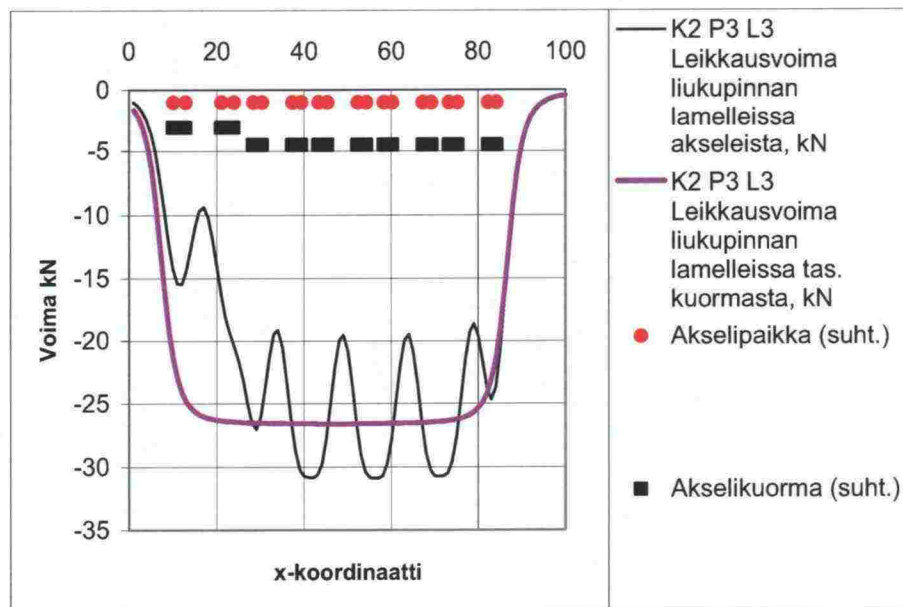
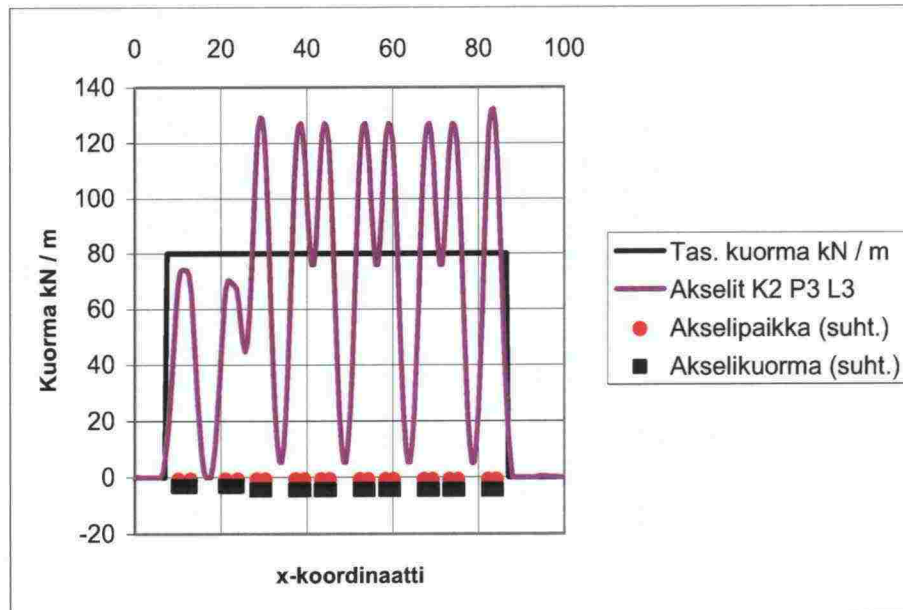
Tarkastelutapaus K2 P3 L1. Vaunujen akselikuorma 300 kN, pengerkorkeus 3,55 m.



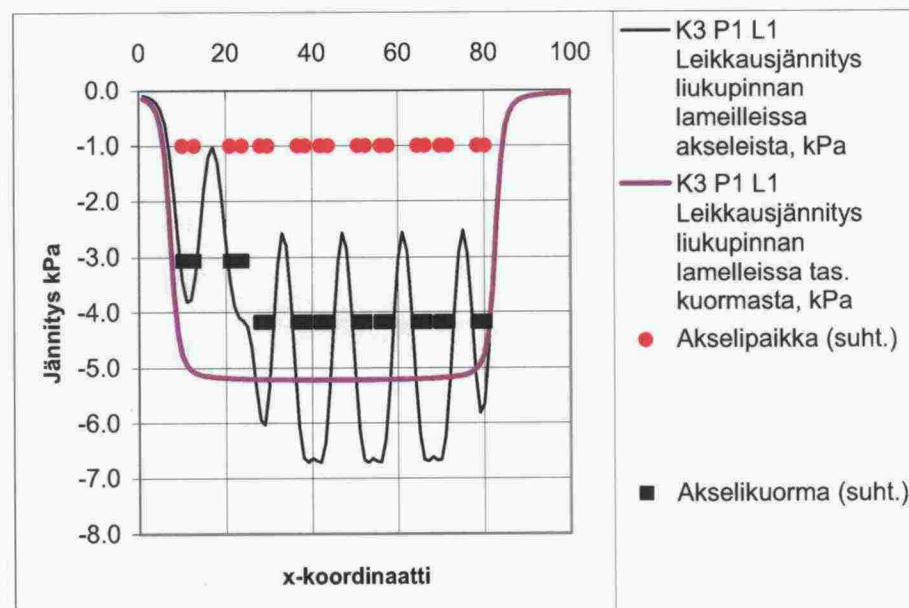
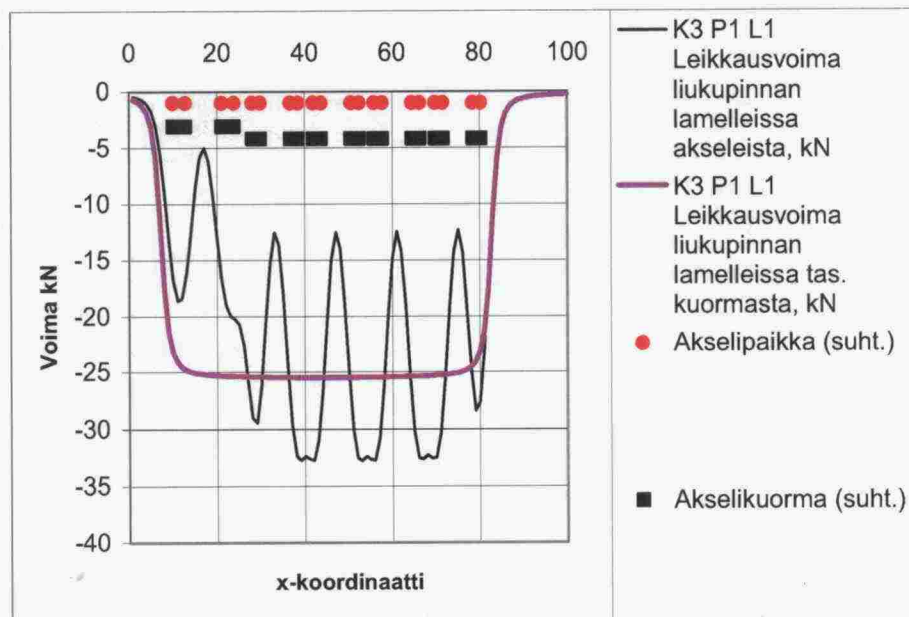
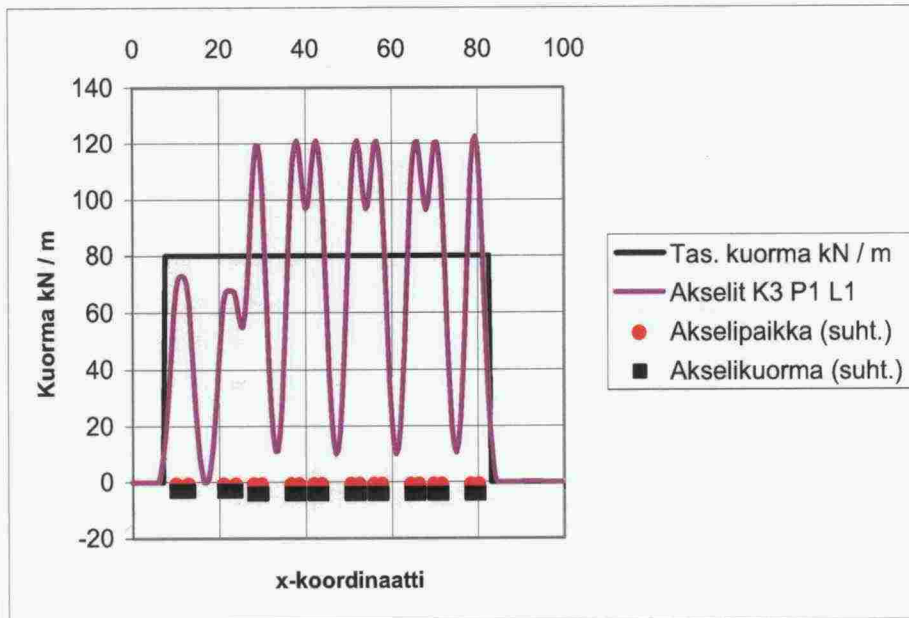
Tarkastelutapaus K2 P3 L2. Vaunujen akselikuorma 300 kN, pengerkorkeus 3,55 m.



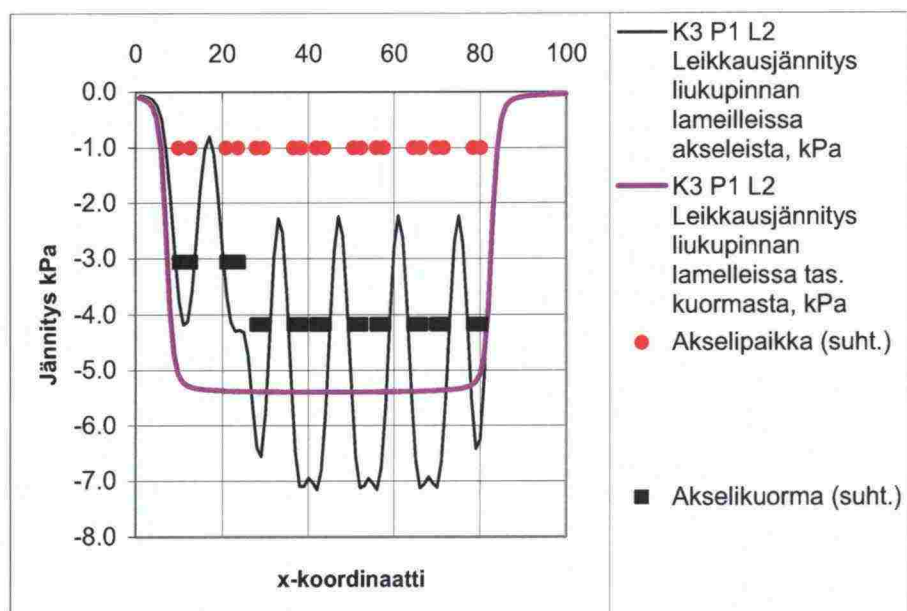
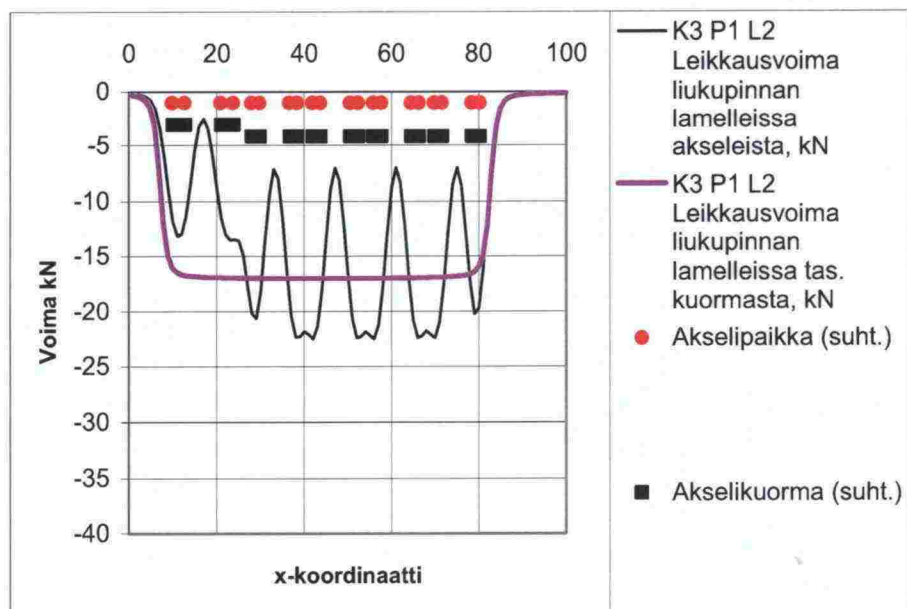
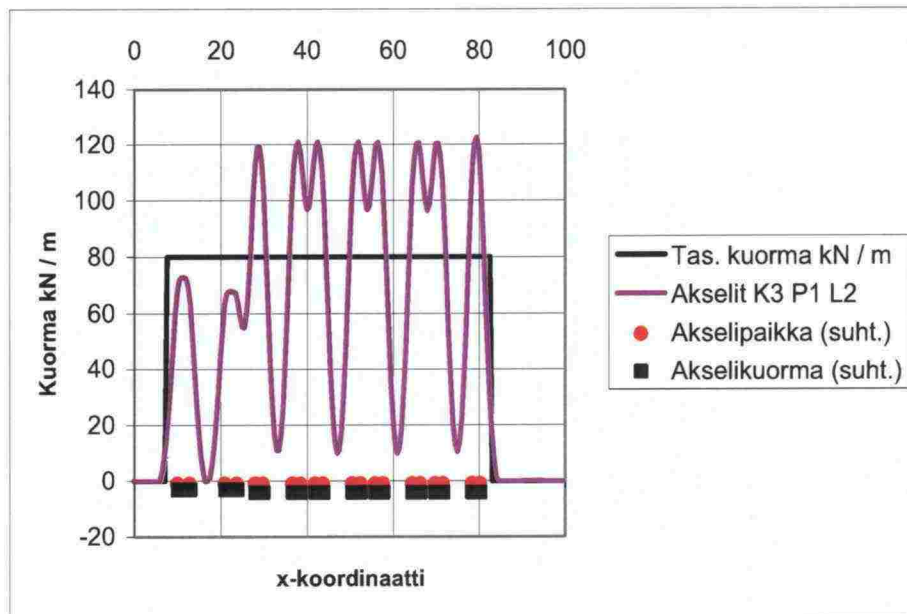
Tarkastelutapaus K2 P3 L3. Vaunujen akselikuorma 300 kN, pengerkorkeus 3,55 m.



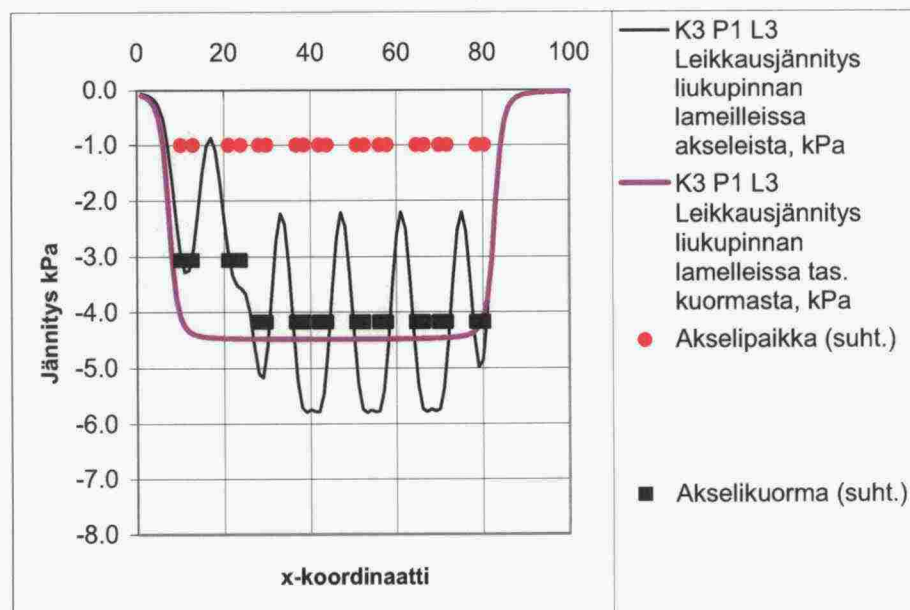
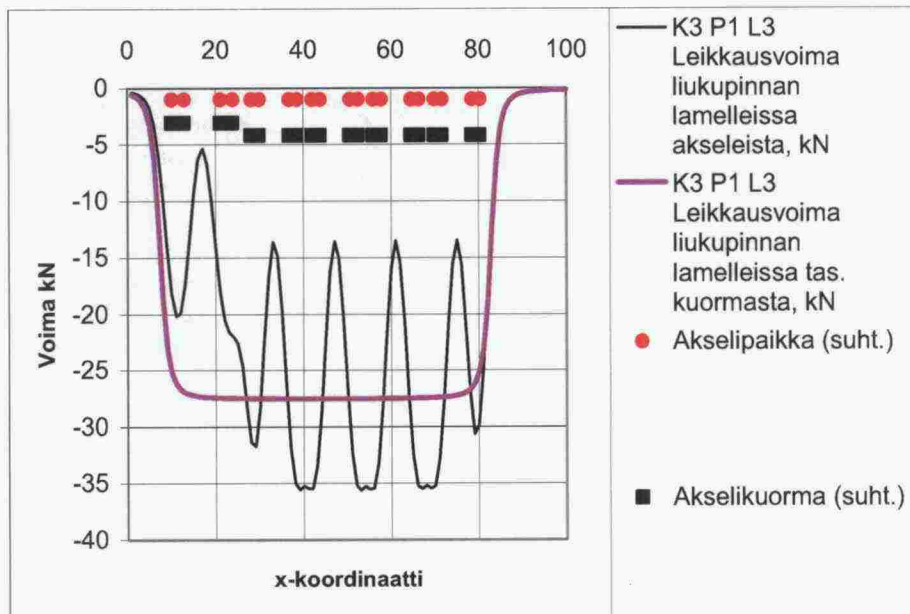
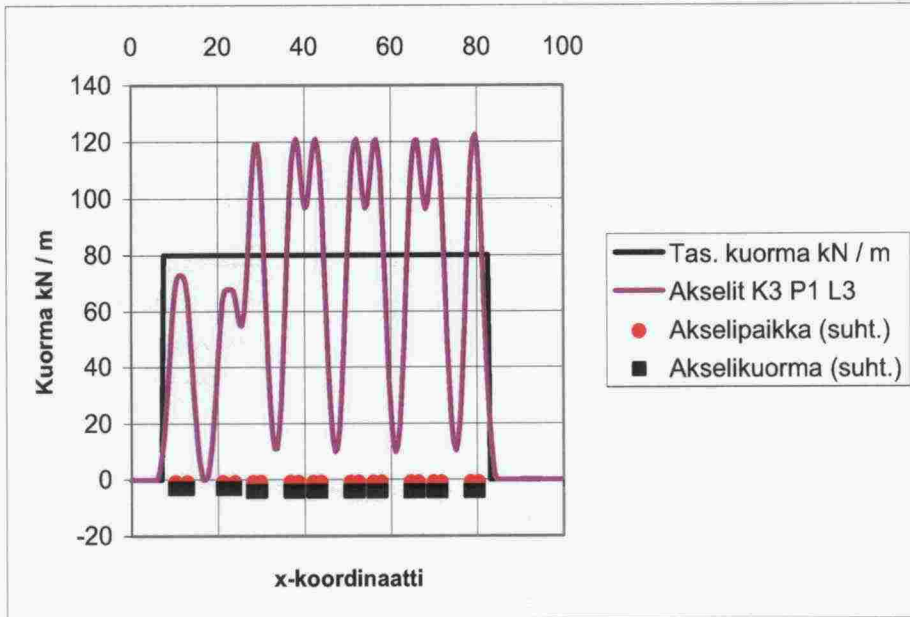
Tarkastelutapaus K3 P1 L1. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



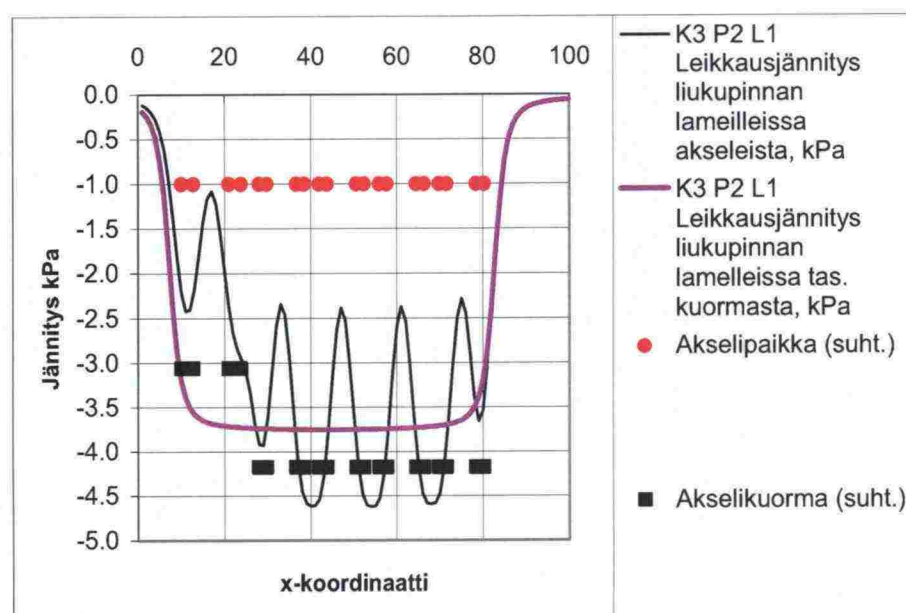
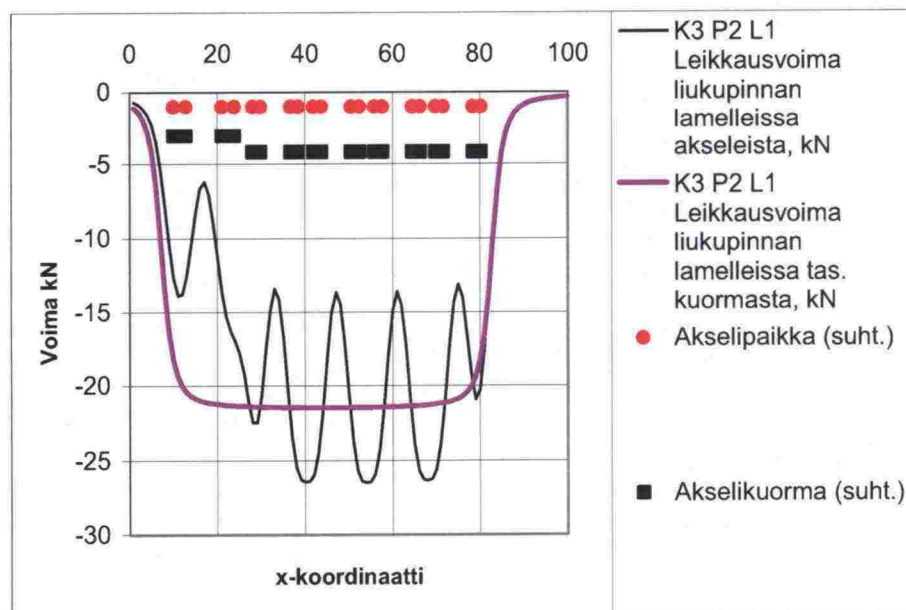
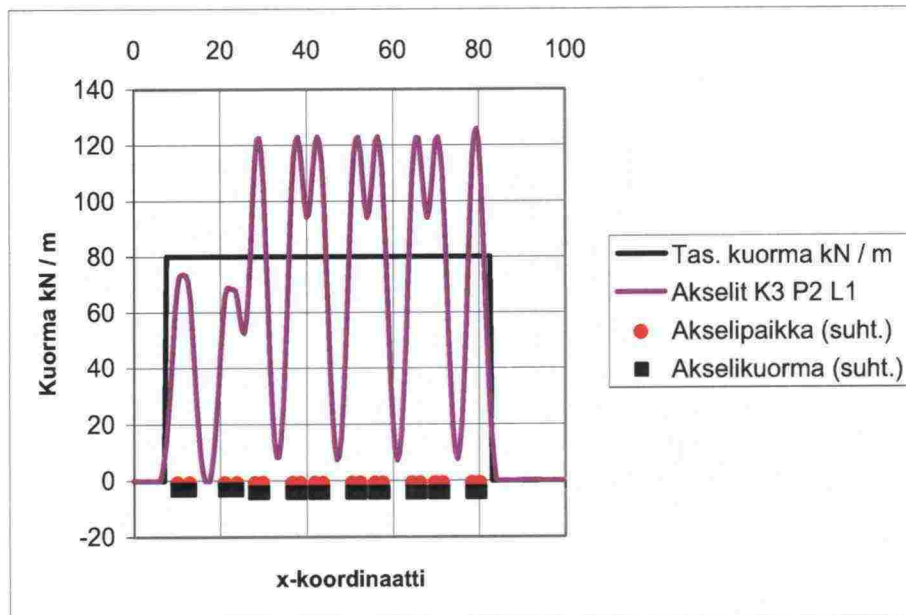
Tarkastelutapaus K3 P1 L2. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



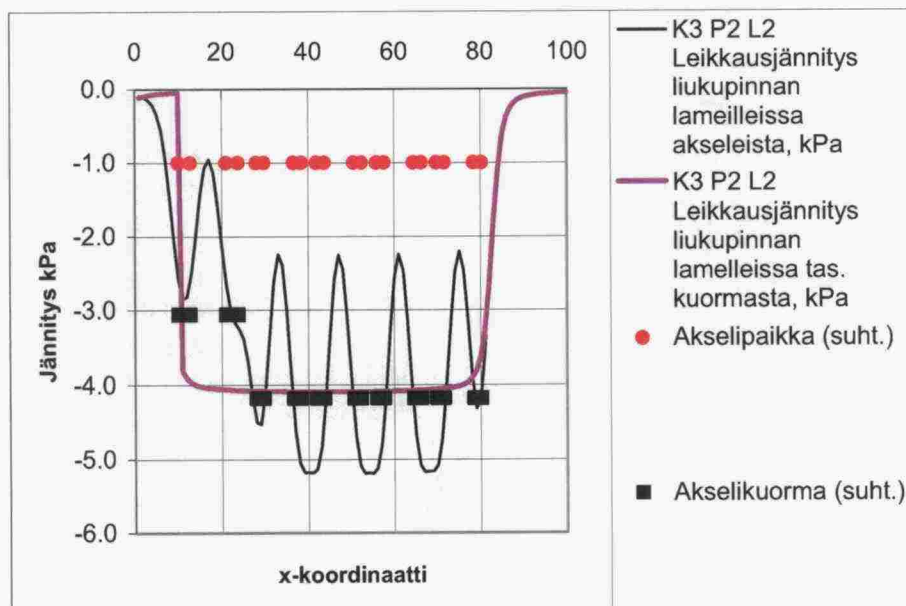
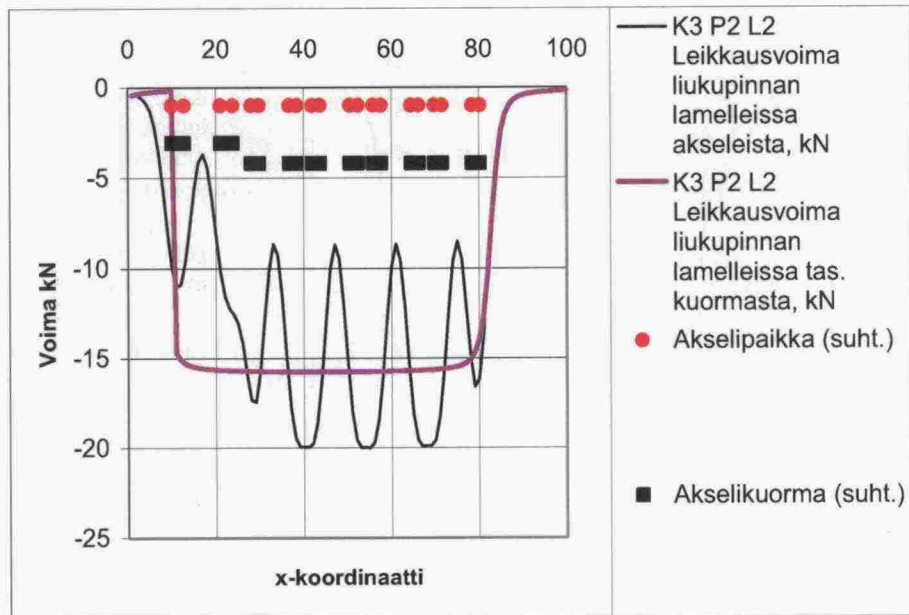
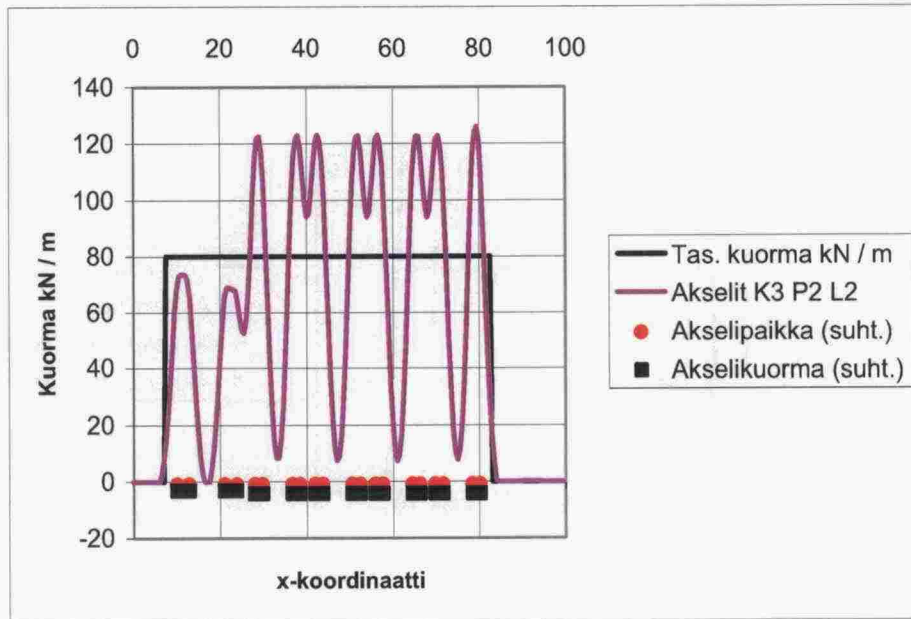
Tarkastelutapaus K3 P1 L3. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



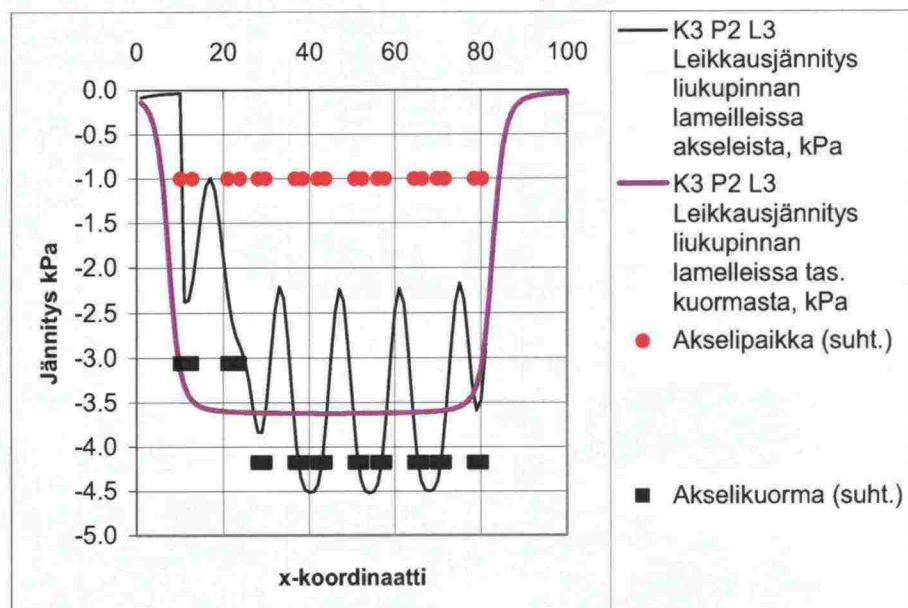
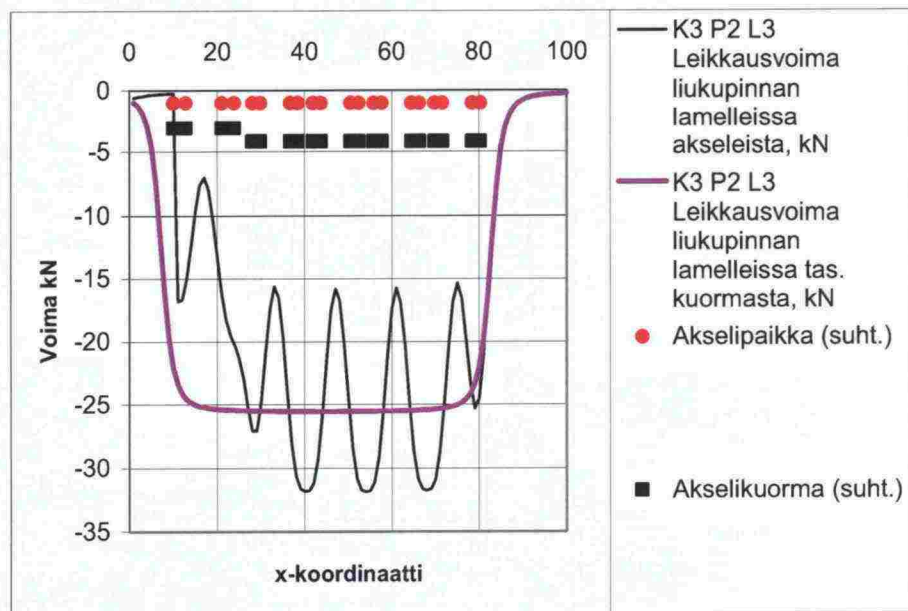
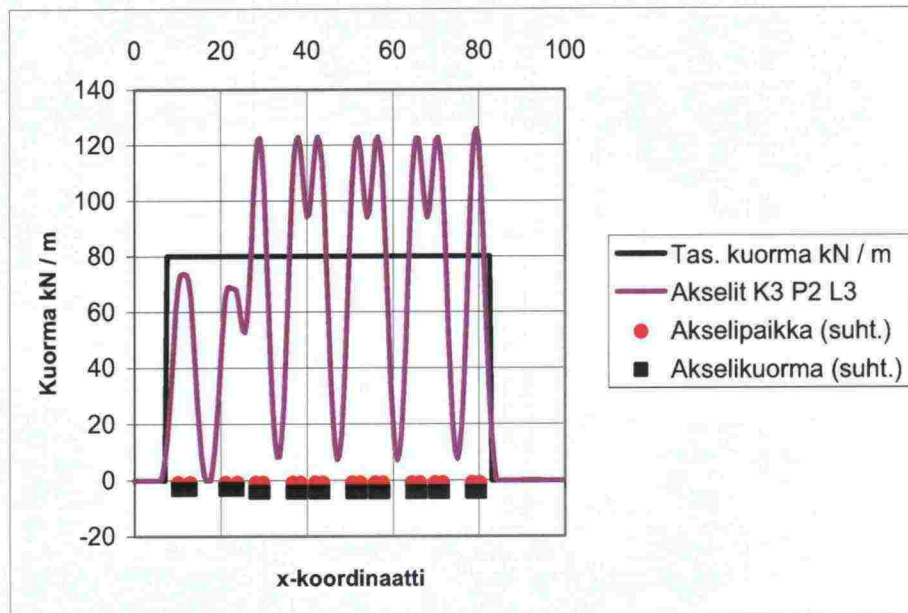
Tarkastelutapaus K3 P2 L1. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, pengerkorkeus 2,55 m.



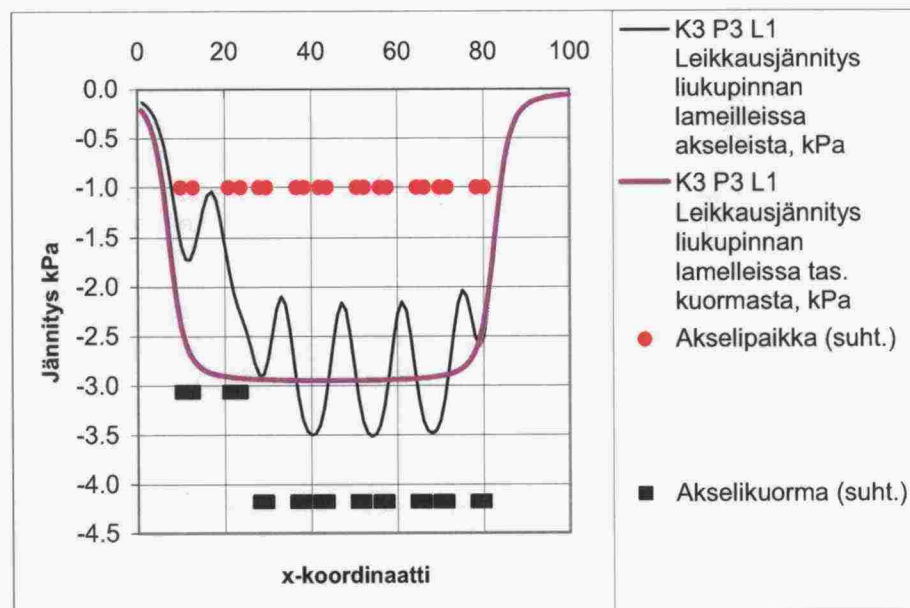
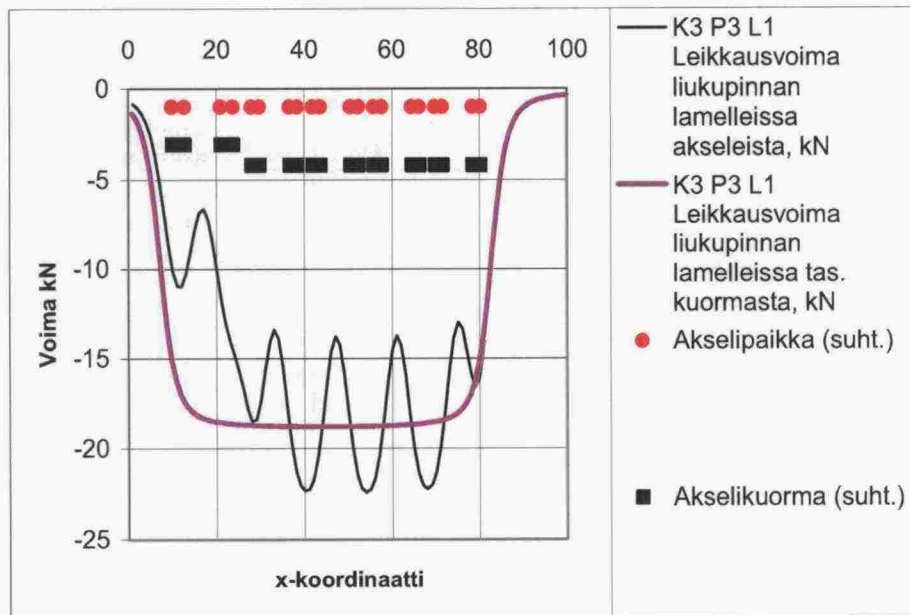
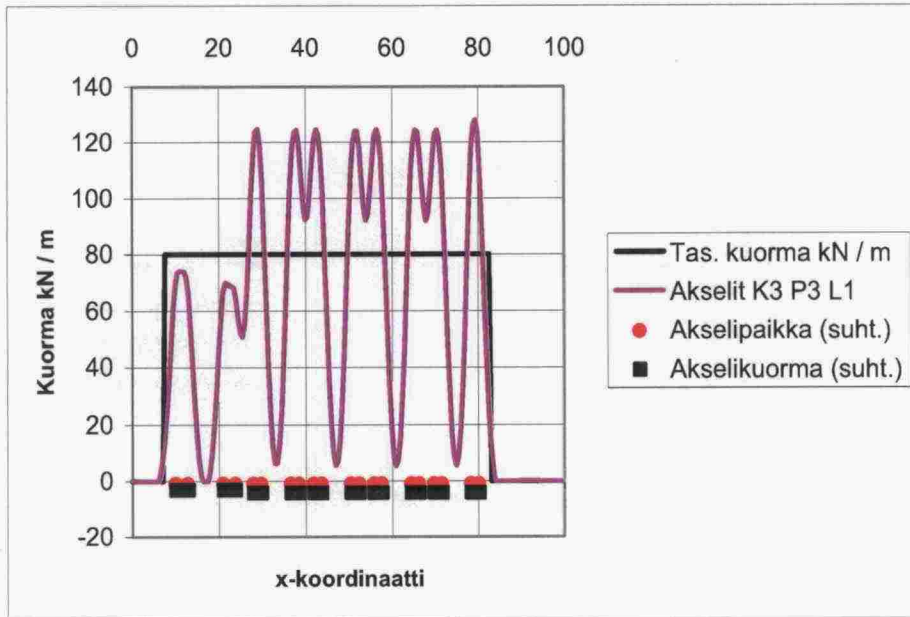
Tarkastelutapaus K3 P2 L2. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, pengerkorkeus 2,55 m.



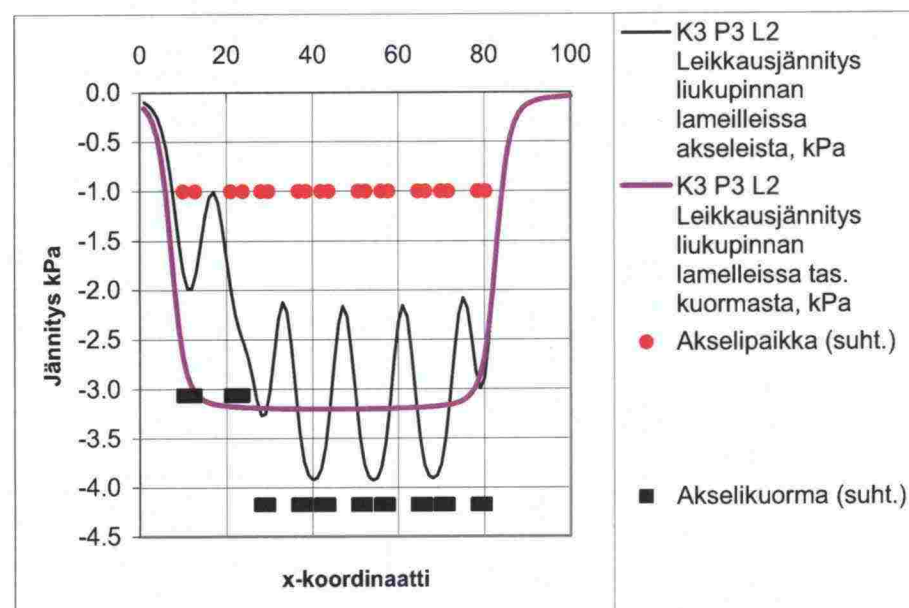
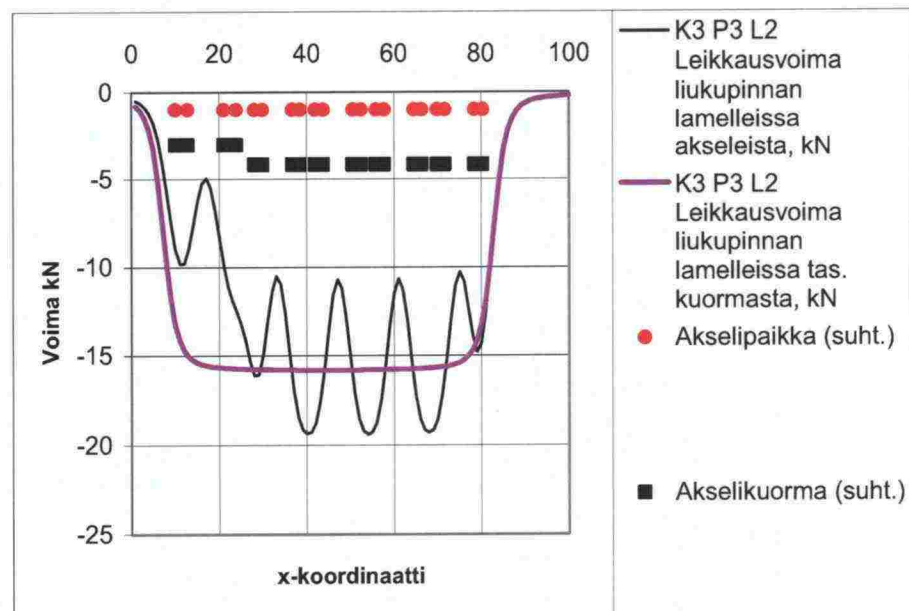
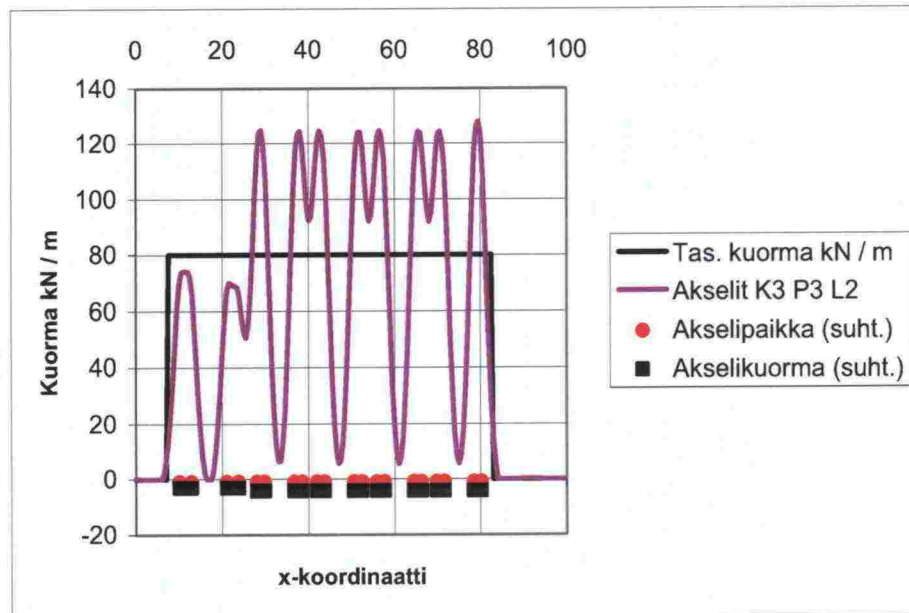
Tarkastelutapaus K3 P2 L3. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, pengerkorkeus 2,55 m.



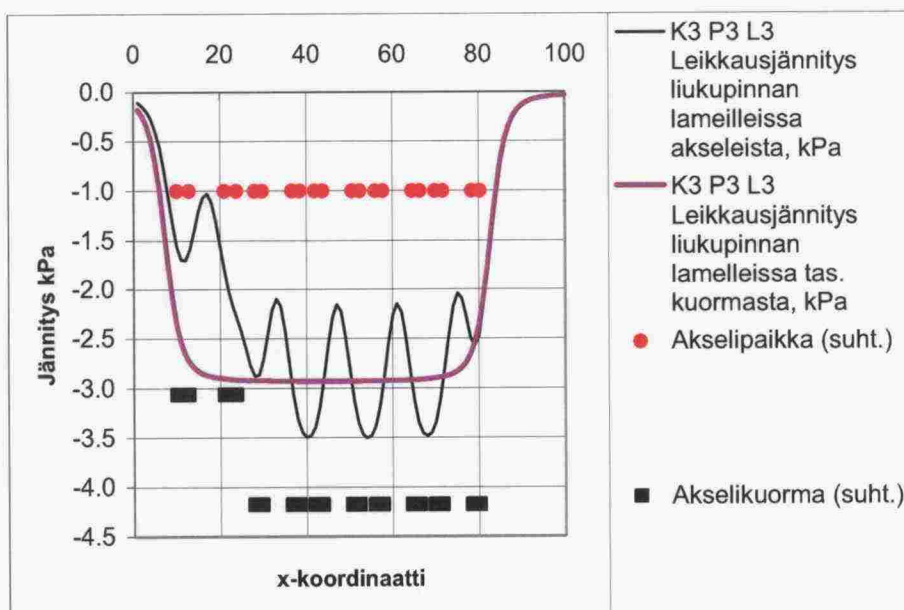
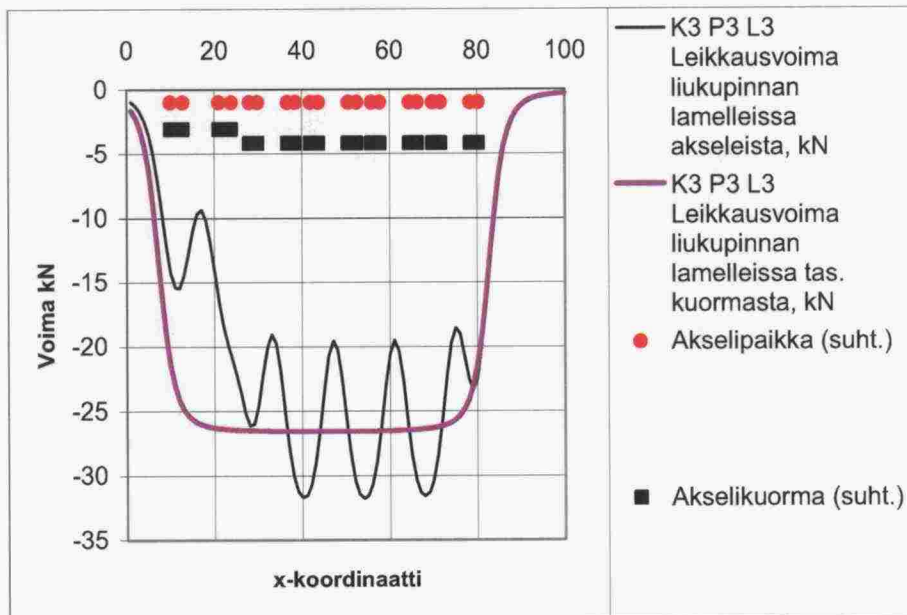
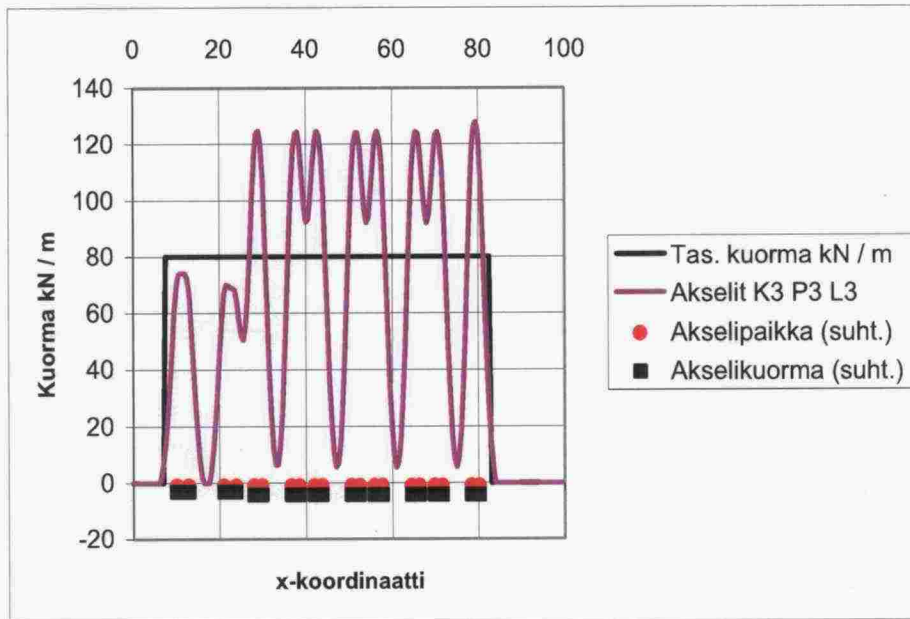
Tarkastelutapaus K3 P3 L1. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, pengerkorkeus 3,55 m.



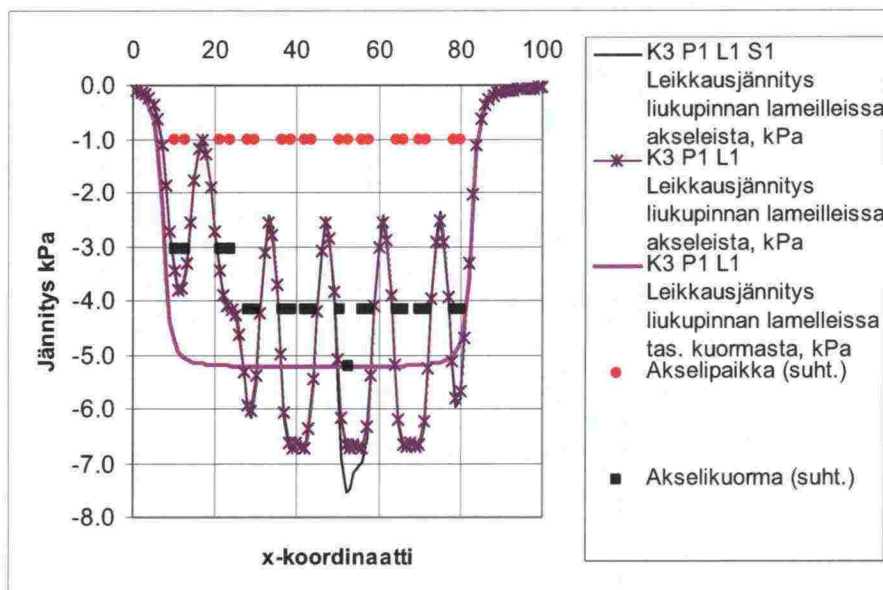
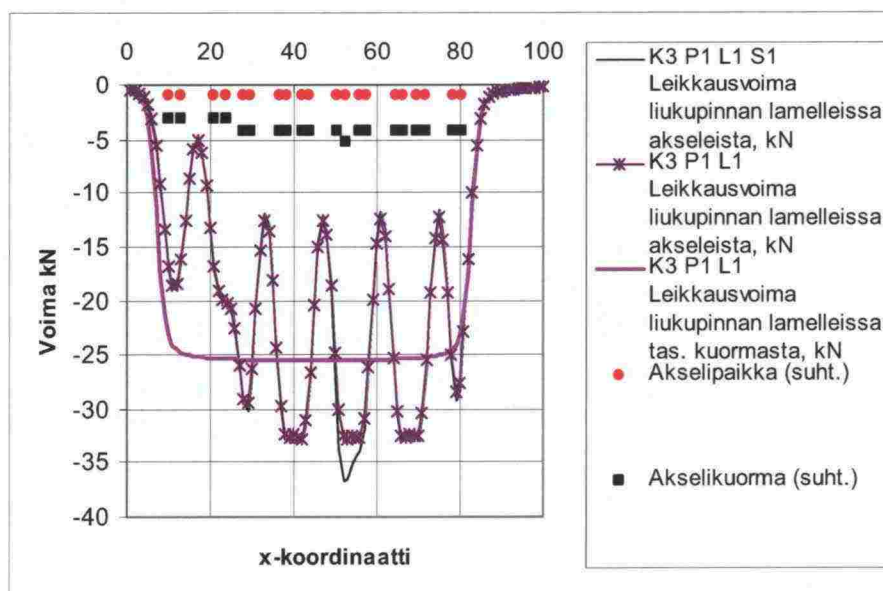
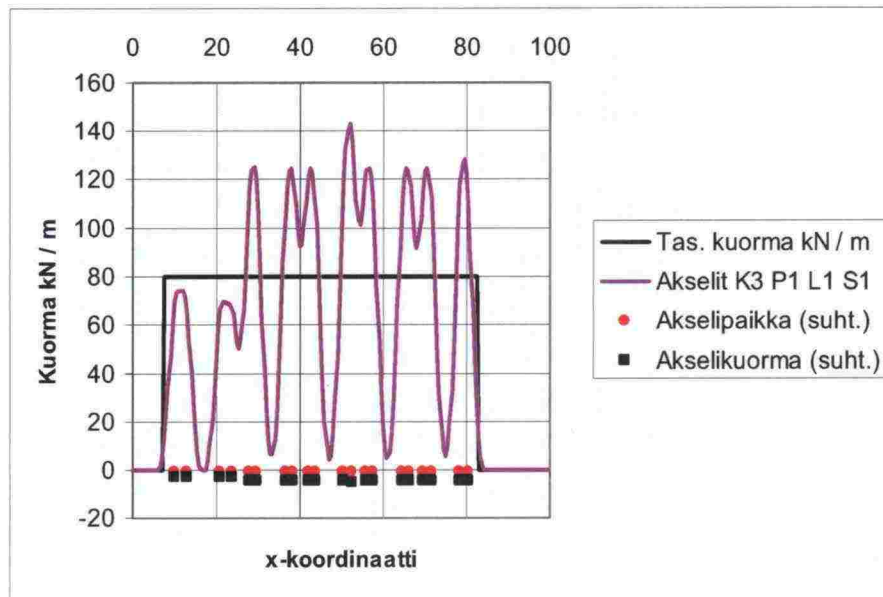
Tarkastelutapaus K3 P3 L2. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, pengerkorkeus 3,55 m.



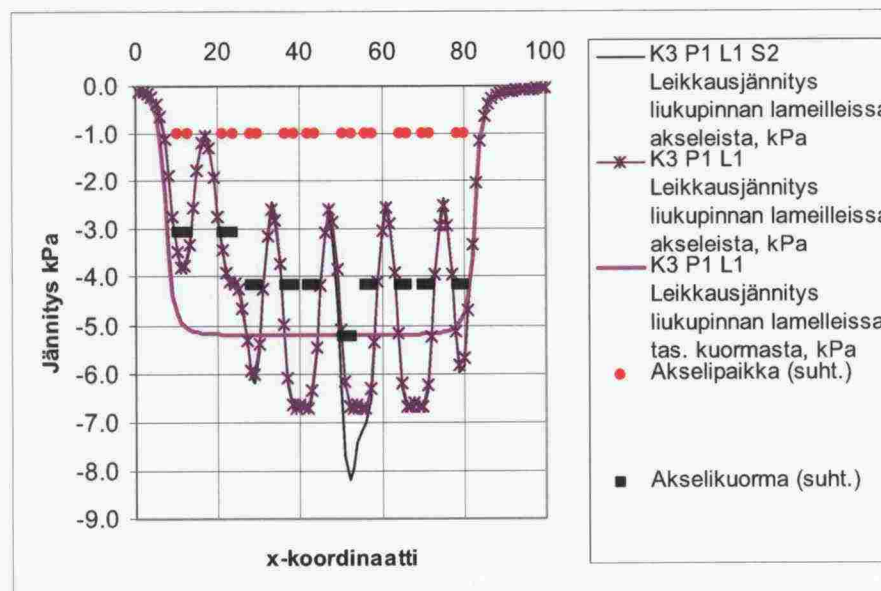
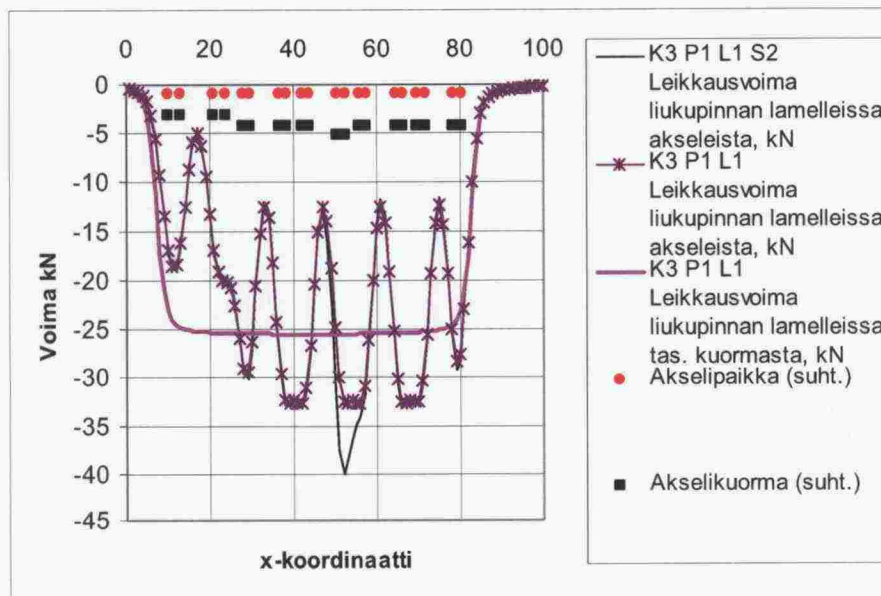
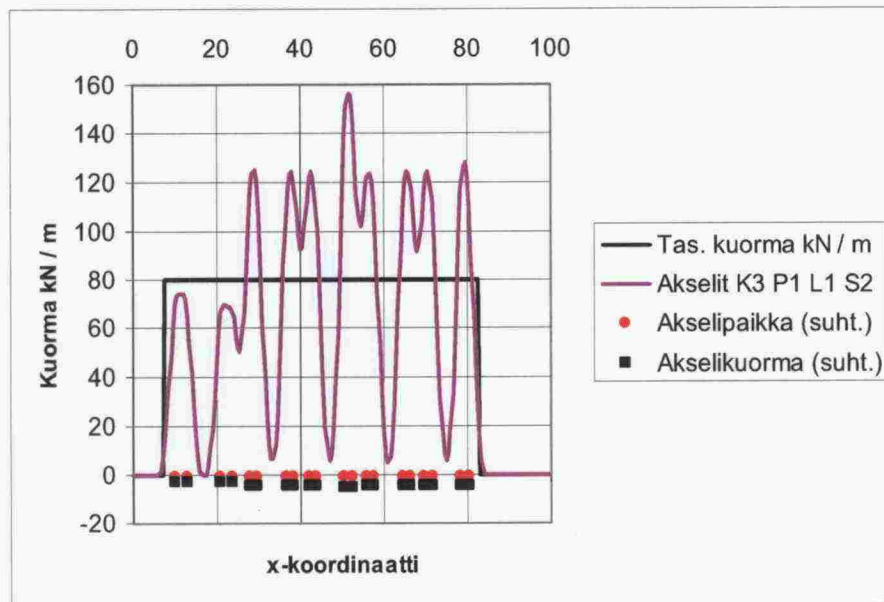
Tarkastelutapaus K3 P3 L3. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, pengerkorkeus 3,55 m.



Sysäyskuormatarkastelu K3 P1 L1 S1. Sysäyskerroin 1.25 akselissa numero 12 veturin suunnasta laskettuna veturin akselit mukaan luettuna. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, sysäyskuormalla 348,1 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



Sysäyskuormatarkastelu K3 P1 L1 S2. Sysäyskerroin 1,25 akselleissa 11 ja 12 veturin suunnasta laskettuna veturin akselit mukaan luettuna. Vaunujen akselikuorma 278,5 kN, sysäyskuormalla 348,1 kN, pengerkorkeus 1,55 m.



RATAHALLINTOKESKUKSEN JULKAISUJA A-SARJASSA

- 1/2002 Ratarakenteen routasuojaus
- 3/2002 Rautatietasoristeysten turvaamis- ja poistostrategia 2020
- 4/2002 Rautateiden maanvaraiset pylväsperustukset, lisensiaatintutkimus
- 5/2002 Raiteentarkastus ja siinä ilmenevien virheiden analysointi välillä Kirkkonummi–Turku
- 6/2002 Kerava–Lahti-oikoradan sosiaalisten vaikutusten arviointi
- 7/2002 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2025
- 8/2002 Puomillisten tasoristeysten turvallisuus
- 9/2002 Vartioimattomien tasoristeysten turvallisuus
- 10/2002 Ratarumpututkimus, mallinnus
- 1/2003 Katsaus Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoimintaan
- 2/2003 Instrumentation and Modelling of Railway Culverts
- 3/2003 Rautatieliikenteen onnettomuuksien ja vaaratilanteiden raportoinnin kehittäminen
- 4/2003 Henkilöliikenneasemien esteettömyyskartoituksen tuloksia
- 1/2004 Tavaraliikenteen ratapihavisio ja -strategia 2025
- 2/2004 Rautateiden kaukoliikenteen asemien palvelutaso ja kehittämistarpeet
- 3/2004 Rautatieinfrastruktuurin elinkaarikustannukset
- 4/2004 Murskatun kalliokiviaineuksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa
- 5/2004 Radan kulumisen rajakustannukset vuosina 1997 – 2002
- 6/2004 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997 – 2002
- 7/2004 Ratakapasiteetin jakamisen vaatimukset ja liikenteen suunnittelun tila
- 8/2004 Stabiliateetiltaan kriittiset ratapenkereet, esitutkimus
- 9/2004 Ratapenkereitten leveys ja luiskakaltevuus, esitutkimus
- 10/2004 Lähtökohtia ratapihojen kapasiteetin mittaamiseen
- 1/2005 Sähköratamaadoitusten perusteet – suojarakenteet, rakennukset ja laiturirakenteet
- 2/2005 Kerava–Lahti-oikoradan ennen-jälkeen vaikutusarviointi, ennen-vaiheen selvitys
- 3/2005 Ratatietojen kuvaaminen – ratatietokanta ja verkkoselostus
- 4/2005 Kaakkois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
- 1/2006 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämisstrategia
- 2/2006 Rautatie ja sen vaarat osana lasten ympäristöä
- 3/2006 Matkustajainformaatiojärjestelmien arviointi Tampereen, Toijalan ja Hämeenlinnan rautatieasemilla
- 4/2006 Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen
- 5/2006 Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading
- 6/2006 Research and Development Strategy of the Finnish Rail Administration
- 7/2006 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman lähtökohdat ja vaikutustarkastelut
- 8/2006 Vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjaus
- 9/2006 Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys
- 10/2006 Radan stabiliateetin laskenta, olemassa olevat penkereet Kirjallisuustutkimus ja laskennallinen tausta-aineisto
- 11/2006 Rautatieinfrastruktuurin kehitystarpeet suuryksikkökuljetusten yleistyessä
- 12/2006 Pasilan aseman esteettömyyskartointi ja toimenpideohjelma
- 1/2007 Akselipainon noston tekniset edellytykset ja niiden soveltuminen Luumäki–Imatra-rataosuudelle
- 2/2007 Radan kulumisen rajakustannukset 1997 – 2005
- 3/2007 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997 – 2005



**RATAHALLINTOKESKUS
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN**

Julkaisija:
Ratahallintokeskus
Keskuskatu 8, PL 185, 00101 Helsinki
puh. 020 751 5111, fax 020 751 5100
www.rhk.fi

ISBN 978-952-445-183-3 (nid.)
ISBN 978-952-445-184-0 (pdf)
ISSN 1455-2604