

TIEN JATKUVAN PAINUMAPROFIILIN LASKENTA PIKSELIMALLILLA



Jouko Törnqvist
Rainer Laaksonen
Markku Juvankoski
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Pauli Vepsäläinen
Matti Lojander
Jonni Takala
TKK Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto
Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio

Alkusanat

Tien pohja- ja päällysrakenteet –tutkimusohjelman (TPPT) lopputulosten tavoitteena on ennistä kestävämpien uusien ja perusparannettavien kestopäällystettyjen teiden rakentaminen siten, että myös rakenteiden vuosikustannukset alenevat. TPPT-ohjelmassa kehitettiin tierakenteiden mitoitusta (TPPT-suunnittelujärjestelmä). Suunnittelujärjestelmään kuuluvissa mitoitushjeissa ja menetelmäkuvauksissa esitetään ne menettelytavat ja keinot, joita käyttäen tierakenne voidaan kohdekohtaisesti suunnitella ja mitoittaa. TPPT-suunnittelujärjestelmään sisältyy myös päällysrakenteen elinkaarikustannustarkastelu, jonka suorittamiseksi esitetään menettelytapa.

Suunnittelujärjestelmälle on ominaista, että tierakenteen mitoitus tapahtuu paikkakohtaisilla tiedoilla ja parametreilla (liikenne, ilmasto, pohjamaa, käytettävät rakennemateriaalit, vanhat rakenteet). Mitoituksessa käytettävien pohjamaata ja rakennemateriaaleja koskevien parametrien määrittäminen tapahtuu ensisijaisesti laboratoriokokeilla tai maastossa tehtävin mittauksin ja tutkimuksin. Myös muiden mitoituksessa tarpeellisten lähtötietojen hankinnassa ja ongelmakohtien tai muutoskohtien paikannuksessa käytetään maastossa ja tiellä tehtäviä havaintoja ja mittauksia.

Suunnittelujärjestelmään kuuluvat oleellisena osana sitä täydentävät suunnittelun ja mitoituksen lähtötietojen hankintaa käsittelevät ”menetelmäkuvaukset”. Esitettävät menetelmät ja menettelytavat on todettu käyttökelpoisiksi käytännön havaintojen ja kokeiden perusteella.

TPPT-ohjelman tuloksena laaditaan myös yhteenveto ohjelmaan sisältyneistä, mitoitushjeiden laadinnassa hyväksikäytetyistä koerakenteista sekä yhteenveto tien rakennekerrosten materiaaleista ja niiden valintaan vaikuttavista tekijöistä.

Tämän ”Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pikselimallilla” menetelmäkuvauksen ovat laatineet Jouko Törnqvist, Rainer Laaksonen ja Markku Juvankoski VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta sekä Pauli Vepsäläinen, Matti Lojander ja Jonni Takala TKK:n Rakennus- ja ympäristötekniikan osaston Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriosta. Menetelmäkuvauksen sisältö on käyty läpi yhdessä tielaitoksen asiantuntijoiden kanssa.

Joulukuussa 2001

Markku Tammirinne

Sisällysluettelo

1.	JOHDANTO	3
2.	PAINUMALASKENNAN LÄHTÖTIE TOJEN MÄÄRITTÄMINEN	4
2.1	Suunnittelujärjestelmän painumalaskennan erityispiirteitä	4
2.2	Alustavat tarkastelut ja tutkimukset	7
2.3	Tarkennettu tulkinta	9
2.4	Alustava painumatarkastelu	12
2.5	Täydentävät pohjatutkimukset ja laboratoriotutkimukset	13
2.6	Painumalaskennan reunaehdot	15
3.	PAINUMALASKENTA	16
3.1	Painuman hallinta	16
3.2	Jako homogeenisiin osuuksiin	17
3.3	Pikselimallin muodostamisparametrit	19
3.4	Painuman laskenta TSARPIX -ohjelmalla	23
3.5	Lopullinen painumalaskenta	27
4.	KIRJALLISUUS	28
5.	LIITTEET	28

1. JOHDANTO

Tässä raportissa on käsitelty TPPT-suunnittelujärjestelmän mukaista painumalaskentaa. Painumalaskenta poikkeaa monilta osiltaan tavanomaisesta painuman laskennassa noudatettavasta käytännöstä. Uudistukset koskevat sekä painumalaskennan lähtötietojen hankintaa että itse painuman konkreettista laskentamenettelyä.

TPPT-suunnittelujärjestelmässä tien painumalaskelmassa tarvittavat lähtötiedot hankitaan ensijaisesti sähköisellä vastusluotauksella (maavastusluotaus). Sähköisellä vastusluotauksella saatu maapohjan ominaisvastuskuvaus muunnetaan vesipitoisuusavaruudeksi, jota käytetään tien painumalaskennassa. Itse laskenta suoritetaan TPPT:ssä kehitetyllä tällaisten lähtötietojen käyttöön perustuvalla TSARPIX-laskentaohjelmalla.

Olennessa tavoite painumalaskentamenettelyn kehittämisessä on ollut painuman lähtötietojen jatkuva kuvaus ja painumien laskentan jatkuvana profiilina etenkin tien pituussuunnassa. Tavanomaisia pistekohtaisia painumalaskelmia voidaan edelleen, ja menetelmän käyttöön oton alkuvaiheessa on syytäkin, suorittaa tarkistusmielessä.

Sähköinen vastusluotaus on vain yksi ainetta rikkomattomista, geofysikaalisista menetelmistä, joilla voidaan saada tietoa maapohjan ominaisuuksien kuvaamiseksi jatkuvana. Menetelmää käytettäessä on huomioitava, että sähköinen vastusluotaus ei ole ns. rajapintamenettely (kuten esim. maatulka, seisminen luotaus), vaan luonteeltaan diffuusin rakennekuvauksen tuottava menetelmä. Toisin sanoen mittaustuloksissa ei suoraan nähdä rajapintoja, vaan menetelmän tuloksena saadaan tasoitettuja vastusarvoja. Eri maarakennekerrosten paikantamistarkkuus riippuu mm. käytettävästä elektrodivälistä.

Sähköisellä luotauksella on kuitenkin mahdollista, toisin kuin esimerkiksi maatulkaluotauksella, saada informaatiota myös hyvin vesipitoisten maakerrosten alapuolelta ja siten tunnistaa esimerkiksi savikerroksen alapuolisten tiiviiden maakerrosten tai kalliopinnan sijainti. Mikäli näiden tiiviiden maakerrosten sähköjohtavuuserot ovat hyvin pieniä, ei maakerroksia kuitenkaan aina pystytä erottamaan kalliosta. Painumalaskentamenettelyssä maavastusluotauksella käytetään ensivaiheessa kokoonpuristuvien maakerrosten painumaherkkyyserojen tunnistamiseen sekä näiden kerrosten erottamiseen kokoonpuristumattomista maakerroksista. Mahdolliset kokoonpuristuvien kerrosten sisään jäävät rajapinnat, kuten vettä johtavat kerrokset, tunnistetaan muilla pohjatutkimusmenetelmillä. Muita pohjatutkimusmenetelmiä käytetään myös painumalaskennassa tarvittavien muiden lähtötietojen hankintaan ja painumaominaisuuksien paikkakohtaiseen tarkentamiseen.

Sähköistä luotauksella sellaisenaan tai vesipitoisuuksiksi tulkittuna voidaan hyödyntää tielinjan pohjasuhdekuvauksen muodostamisessa, vaikka painumia ei alunperinkään olisi vielä tarkoitusta laskea luotauksen lähtötietojen hyödyntämiseen soveltuvalla laskentaohjelmalla. Tuloksia voidaan normaalin tutkimuskäytännön ohessa käyttää myös esim. kairauspisteiden sijainnin valinnassa tai pistevälin tihentämisessä / kasvattamisessa. Ilman sähköiseen luotaukseen perustuvaa painumalaskentaakin on todenmukainen, jatkuva maapohjan kuvaus jo käytännössäkin koettu hyödylliseksi. Ilman erityistä painumalaskentaohjelmaa vesipitoisuuksiksi muutetuista luotauksen tuloksista on aina mahdollista laskea painuman suuruusluokka pistekohtaisesti esim. tavanomaisella vesipitoisuuteen perustuvalla painumalaskennan menetelmällä. Itse TSARPIX -ohjelmassa painuman laskennassa ei kuitenkaan käytetä vesipitoisuusmenetelmää, vaan maapohjan vesipitoisuustiedot muutetaan tangenttimoduulimenetelmän parametreiksi. Kummankin menetelmän soveltuvuutta ja erityispiirteitä on tarkasteltu mm. viitteessä /1/.

TPPT-suunnittelujärjestelmän painuman laskentamenettely (TSARPIX-ohjelma) perustuu jatkuvan maastomallin muodostamiseen ns. pikselimallina. Pikselimallissa maan painumaomi-

naisuuksia kuvaavat lähtötiedot saadaan toisaalta sähköisestä vastusluotauksesta ja toisaalta sitä täydentävistä pohjatutkimuksista. Maastomalli muodostuu tasotapauksessa (tien pituussuunnassa tai tien poikkisuunnassa) pienistä suorakaide-elementeistä, joissa elementti-kohtaisista painumaominaisuuksista pääosa määritetään sähköisestä vastusluotauksesta muodostettavan vesipitoisuustomografian avulla. TSARPIX-ohjelmalla painumat tarvittaessa voidaan laskea haluttaessa hyvin tiheästi, esimerkiksi 1 metrin välein.

2. PAINUMALASKENNAN LÄHTÖTIETOJEN MÄÄRITTÄMINEN

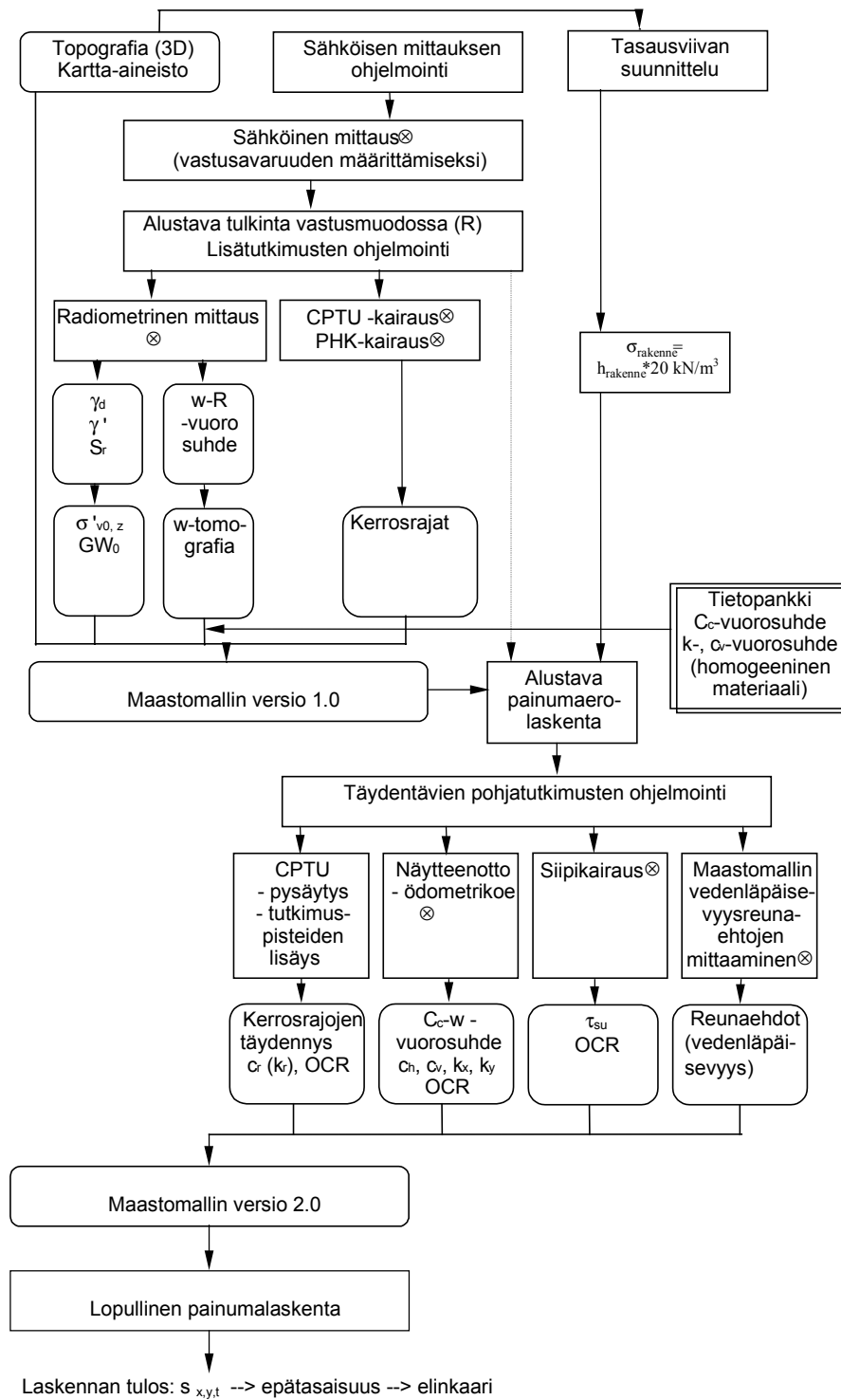
2.1 Suunnittelujärjestelmän painumalaskennan erityispiirteitä

Painuman laskennan lähtötietojen hankinta TPPT-suunnittelujärjestelmässä poikkeaa huomattavasti tavanomaisesta tämänhetkisestä käytännöstä. Olennaisin muutos on lähtötietojen jatkuva kuvaus, jonka luomiseen käytetään maapohjan ominaisvastusjakautuman mittaavaa sähköistä mittausmenettelyä. Painuman suuruusluokka pistekohtaisesti tarvitaan lisäksi jo tien suunnittelun varhaisessa vaiheessa ja aiemmin kuin mihin TPPT-suunnittelujärjestelmä varsinaisesti sijoittuu tiehankkeen suunnittelussa.

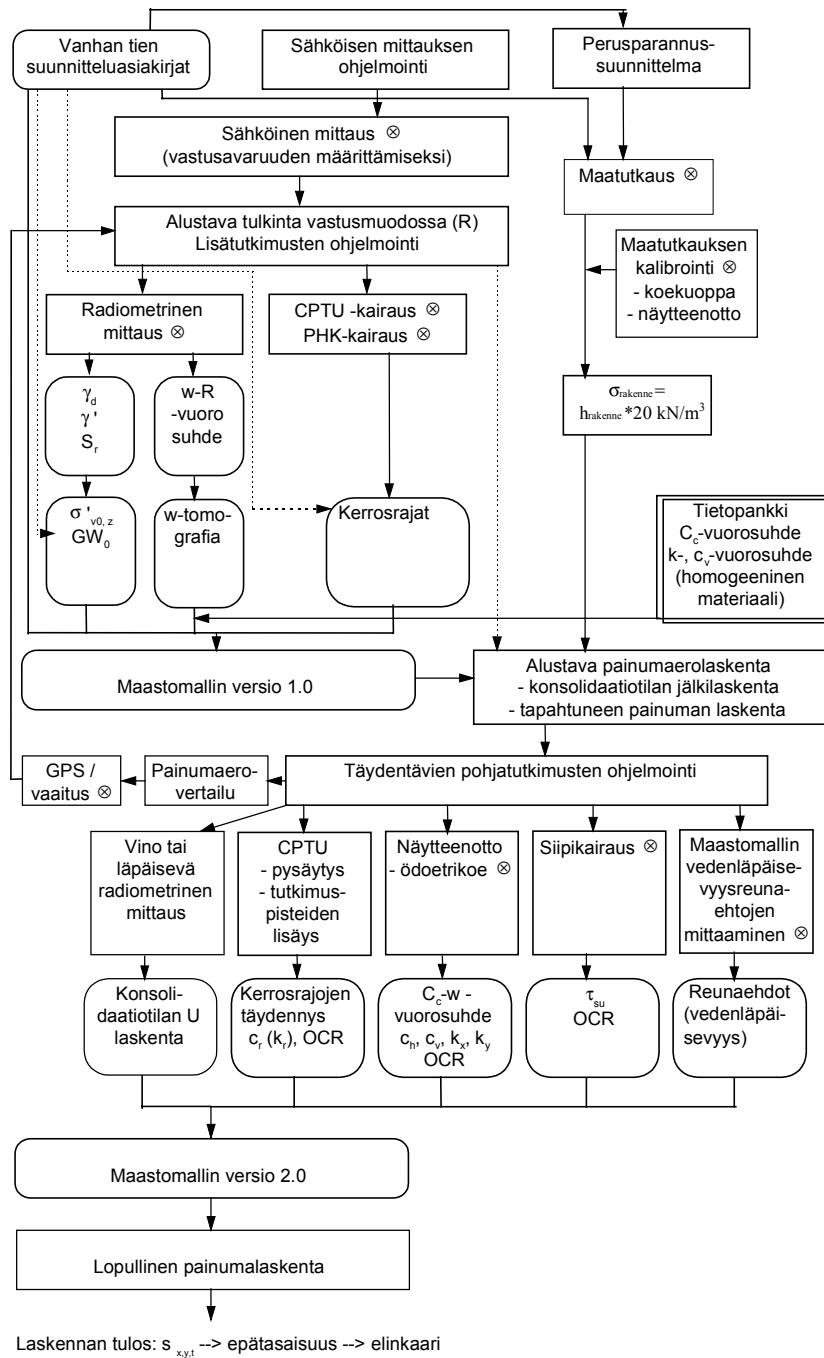
Tässä luvussa on käsitelty myös painumalaskennan periaatetta ja alustavaa painumalaskentaa, koska lähtötietojen hankinta ja uuden tien alustava painumalaskenta muodostavat yhdessä iteratiivisen prosessin. Uuden tien painumalaskenta on esitetty prosessikaaviona kuvassa 1. Tässä menetelmäkuvauksessa on käsitelty verrain laajasti myös sähköisen maa-vastusluotauksen suorittamista, vaikka se onkin käsitelty yksityiskohtaisesti menetelmäkuvauksessa TPPT 9 "Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa".

Tien painumalaskenta peruskorjattavalla, jo olemassa olevalla tiellä on esitetty prosessikaaviona kuvassa 2. Vanhan tien painumalaskenta sisältää pääsääntöisesti samat vaiheet kuin uudenkin tien painumalaskenta. Lisätehtäviä aiheutuu kuitenkin mm. olemassa olevan kuorituksen, jo tapahtuneen painuman ja konsolidoitumisasteen laskennasta.

Tien painumalaskennassa tarvittavat parametrit ja niiden määritysmenetelmät laboratoriossa ja kentällä uusille ja jo olemassa oleville teille on esitetty taulukossa 1.



Kuva 1. Pohjasuhteiden määrittäminen laboratorioissa ja kentällä uusille rakenteille. ⊗-merkillä varustettujen menetelmien menettelytapaohjeet on esitetty taulukossa 1.



Kuva 2. Pohjasuhteiden määrittämenetelmät laboratoriossa ja kentällä parannettaville rakenteille. ⊗-merkillä varustettujen menetelmien menettelytapaohjeet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Rakenteen painumakestävyysparametrien arviointi- ja määrittämenetelmät laboratorioissa ja kentällä uusille ja vanhoille rakenteille.

Parametri	Määrittäys- tai arviointitapa	Menetelmä
vesipitoisuus, w	sähköinen maavastusluotaus & radiometrinen luotaus / näytteenotto ja vesipitoisuusmäärittäys laboratorioissa	- TPPT 9 - TPPT 10 - Kairausopas III / SGY ja GLO-85 / SGY
kerrosrajat, maalaji, OCR	CPTU-kairaus, näytteenotto ja rakeisuus- ja vesipitoisuusmäärittäys laboratorioissa	- TPPT 11 - Kairausopas III / SGY ja GLO -85 /SGY
pystysuora vallitseva jännitys, σ'_{vo}	radiometrinen luotaus: kuivatilavuuspaino γ_d , kyllästetyn maakerroksen rajapinnan taso GW_0	- TPPT 10
kyllästetyn maakerroksen rajapinnan taso GW_0	w-avaruus (sähköinen maavastusluotaus & radiometrinen luotaus)	- TPPT 9 - TPPT 10
yliekonsolidoitumissuhde OCR konsolidaatiojännitys σ_c	siipikaira, CPTU-kaira	- TPPT 9
konsolidaatiokerroin c_v	CPTU-kaira, dissipation test	- TPPT 9
painumaparametrit $M^*(m, \beta)$ kokoonpuristuvuuskerroin C_c	yleiset vuorosuhdet $w \Leftrightarrow M(m, \beta)$	- RITA-tietokanta / TKK
pystysuoran jännityksen lisäys $\Delta\sigma_c$ tien alla	radiometrinen mittaus, siipikairaus	- TPPT 10
konsolidaatiojännitys σ_c , C_c painumaparametrit $M^*(m_1, \beta_1, m_2, \beta_2)$ konsolidaatiokerroin c_v vedenläpäisevyyskerroin, k	ödometrikoe	- standardi - CRS - kokeen valinta ja suoritusohjeet (CRS -> $M^*(C_c, m, \beta)$, OCR, c_v , k) - standardiödometrikoe - TC 250 PT 2
rakenteen paksuus H_0	maatutka & kalibrointi koe-kuopalla, autokairalla, tms.	- Maatutkaluotaus / SGY
toteutunut painuma h_t	suunnitelma (historia) – GPS- korkeustasomittaus tai $GPS_1 - GPS_2$	- TPPT 14
painumanopeus dh/dt		
läpäisevyysreunaehdot	läpäisevyysreunaehdokoe	- TPPT12

2.2 Alustavat tarkastelut ja tutkimukset

TPPT -suunnittelujärjestelmän painumalaskentaa varten maapohja ominaisuuksineen kuvataan jatkuvana. Maapohjan ominaisuuksien jatkuva kuvaaminen on kuitenkin tarpeen vain sellaisten tielinjan alueiden osalta, joilla on odotettavissa yli 50 mm painumia 10...20 vuoden aikana. Toisin sanoen vastusmittausten suorittamistarpeen paikantamiseksi tehdään painuman alustava arviointi maapohjan kokoonpuristuvuuteen (painumaherkkyyteen) perustuen.

Alustavassa arvioinnissa mitattavat kohteet valitaan uuden tien painumatarkasteluja varten alustavasti maaston topografiaan ja geologiseen syntyhistoriaan perustuen. Alustavaa tietoa topografiasta voidaan saada ilmakuvista, kartta-aineistosta (topografiakartta) ja maastokäynneillä. Ensijaisesti luotettava topografiatieto hankitaan tarvittavilta kohdilta vaaitsemalla tai GPS-mittauksella. Vaaituspisteet sijoitetaan maastoon 10...20 metrin välein tien pituussuunnassa. Poikkisuunnassa vaaitaan leikkauksessa vähintään kolme pistettä. Vaai-

tuksen tai GPS-mittauksen yhteydessä tielinja paalutetaan maastoon (esim. Menetelmäkuvaus TPPT 14 Routanousun ja painuman mittaus). Paalutusta tarvitaan myös sähköisen luotauksen sitomiseksi maastoon.

Topografiatietojen perusteella muodostetaan käsitys pehmeikköjen sijoittumisesta tielinjalla ja suoritetaan tähän tietoon pohjautuen sähköisen luotauksen ohjelmointi. Mittausohjelma sidotaan tien paalulukuun tai xyz-koordinaatistoon. Maaston vaihtelun perusteella määritetään tarvittavat mittauksen levitykset, mittauksen syvyysulottumat ja tarvittava mittaustarkkuus (Menetelmäkuvaus TPPT 9 Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa). Topografiatietojen perusteella suoritetaan myös tien tasausviivan suunnittelu liikenteellisistä lähtökohdista. Tasausviivan korkeuden perusteella määritetään rakenteesta maapohjaan aiheutuva kuormitus olettaen materiaalien tilavuuspainoksi 20 kN/m^3 . Mikäli suunnittelua jatkettaessa tierakenteesiin valitaan selvästi tilavuuspainoltaan kevyempiä tai raskaampia materiaaleja, tilavuuspaino-olettamusta korjataan.

Uuden tielinjauksen sähköinen luotaus suoritetaan tien keskilinjalla. Tarvittaessa on otettava huomioon tielinjauksen maastokäytävän pohjasuhteiden vaihtelevuus myös poikkisuunnassa ja mahdollisten rinnakkaisten pituussuuntaisten mittaustulosten tarve. Mittaustulosten sijoittamista on tarkasteltu lähemmin Menetelmäkuvaus TPPT 9 "Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa".

Vanhan tien painumalaskennan lähtötietoina tarvittava tieto maaston pinnan muodoista (topografista) saadaan ensisijaisesti vanhan tien suunnitteluasiakirjoista (tie- ja rakennussuunnitelmat ym.). Näistä selviää yleensä myös muita painumalaskennan alkuvaiheessa tarpeellisia ja hyödynnettävissä olevia tietoja, kuten pohjavedenpinnan sijainti ja kerrosrajat. Suunnitteluprosessissa tarvitaan myöhemmin lähtötietona myös tien pinnan korkeustaso. Korkeustaso voidaan määrittää myös jo tässä vaiheessa GPS-mittauksella, mikä on suositeltavin vaihtoehto, tai vaaitsemalla (Menetelmäkuvaus TPPT 14 Routanousun ja painuman mittaus). GPS-mittaus suoritetaan tiheämmin kuin uuden tien linjalla. Tienpinnan GPS-mittaus suositellaan tehtäväksi autolla ajaen, mitaten $1...2 \text{ m}$ välein. Tien ulkopuolella maanpinnan taso vaaitaan tai mitataan GPS:llä tien molemmilta puolilta $10...20 \text{ m}$ välein. Näiden mittausten yhteydessä tehdään sähköisen luotauksen paalutus maastoon. Vanhan tien GPS-mittauksella todellisesta tasosta päästään tapahtuneeseen painumaa vertaamalla tasoa vanhan tien tiesuunnitelman mukaisiin tasoihin sekä huomioimalla päällysteen paksuudet (mitataan tarvittaessa maatutkalla) ja tarvittaessa tapahtunut maan kohoaminen.

Vanhojen suunnitteluasiakirjojen, topografiatietojen ja maastokäynnein tehtävien havaintojen perusteella muodostetaan käsitys pehmeikköjen sijoittumisesta tielinjalla ja sähköisen mittauksen ohjelmointi suoritetaan tähän tietoon pohjautuen. Olemassa olevalla tiellä mittaustulokset sijoitetaan yleensä vain tien toiselle puolelle, mutta tarvittaessa voidaan mitata myös tien molemmat puolet. Mittausohjelma sidotaan tien paalulukuun ja maaston vaihtelun perusteella määritetään tarvittavat levitykset, syvyysulottumat ja resoluutio.

Perusparannussuunnitelman tasausviivan sijainnista saadaan selville rakenteeseen aiheuttavat lisäkuormitukset (tien pinnan korotus, tien leventäminen). Olemassa olevien rakennekerrosten paksuus määritetään maatutkalla. Maatutkamittauksista saatava informaatio kalibroidaan joko koekuoppia kaivamalla tai näytteenotolla. Pohjamaalle aiheutuva kuormitus arvioidaan kerrospaksuuksien ja lisäkerrosten paksuuden perusteella olettaen materiaalien tilavuuspainoksi 20 kN/m^3 tai käyttäen koekuopasta / näytteenotosta saatavaa tarkempaa tietoa rakennekerrosten painosta.

Sähköisen mittauksen tulokset topografiakorjataan vaaitustulosten perusteella ja mittaustulokset esitetään tien paalulukuun sidottuna. Mittaustulokset tulkitaan alustavasti.

Alustava maapohjan painumaherkkyyden tulkinta pohjautuu sähköisessä mittauksessa saatuun vastusjakautumaan. Karkeasti jaotellen

- kun vastus on $R > 500 \Omega\text{m}$, maakerrosta voidaan pitää kokoonpuristumattomana ja
- kun vastus on $R < 500 \Omega\text{m}$, on kokoonpuristuminen mahdollista.

Kokoonpuristuvia kerroksia tarkemmin jaotellen

- kun vastus on välillä $100 \Omega\text{m} < R < 500 \Omega\text{m}$, odotettavissa oleva kerroksen kokoonpuristuminen on kohtuullista ja
- kun vastus on $R < 100 \Omega\text{m}$, kokoonpuristuminen on merkittävää.

2.3 Tarkennettu tulkinta

Alustavien painuherkkyystarkastelujen tulosten perusteella ohjelmoidaan lisätutkimukset. Lisätutkimuksina suoritetaan ensisijaisesti radiometrisiä mittauksia (Menetelmäkuvaus TPPT 10 Radiometrinen reikämittaus) ja huokospainekärjellä varustetulla puristinkairalla CPTU- (tai puristinheijarikairalla, Kairausopas VI / SGY) -kairauksia (Menetelmäkuvaus TPPT 11 CPTU-kairaus). Radiometrisen mittauksen, tai muun vesipitoisuustiedon antavan mittauksen, esim. näytteenoton tuloksia käytetään "avaimena" muunnettaessa sähköisellä mittauksella saatava ominaisvastusjakauma vesipitoisuustomografiaksi.

Kerrosrajat on suositeltavinta määrittää CPTU-kairauksella. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää puristin-heijarikairausta, mutta lähinnä vain kovissa ja kivisissä pohjasuhteissa. CPTU-kairauksella saadaan tunnistettua kokoonpuristuvien kerrosten paksuudet, vinot kerrokset pituus- ja poikkisuuntaan sekä vettäläpäisevät kerrokset tunnistettua merkittävästi luotettavammin kuin puristin-heijarikairalla. Kairaukset sijoitetaan kohtiin, joissa kerrosrajavaihtelut ovat tien epätasaisen painuman syntymisen kannalta kriittisiä. CPTU-kairauksella tunnistetaan myös kokoonpuristuvien kerrosten sisällä mahdollisesti olevat potentiaaliset läpäisevän reunaehdon muodostavat kerrokset.

Jotta ominaisvastukset voidaan muuntaa vesipitoisuuksiksi, tarvitaan siis tieto jonkin tai joidenkin sähköisellä mittauksella mitattujen pisteiden vesipitoisuusprofiileista. Koska savikerroksen ominaisvastus riippuu vesipitoisuuden lisäksi mm. saven mineraalikoostumuksesta, määritetään vesipitoisuusmuunnos vähintäänkin savikkoallaskohtaisesti. Tarvittavien tutkimuspisteiden määrä arvioidaan alueen sedimentoitumisprosessin perusteella. Laajoissa, yhtenäisissä savialtaissa pistekohtaisen määrittelyn väli on kertaluokkaa 200...300 m.

Sähköisen vastusluotauksen alustavia tuloksia voidaan hyödyntää paikkakohtaisen vesipitoisuusmuunnoksen referenssipisteen paikan valinnassa. Referenssipisteet sijoitetaan sellaisiin kohtiin, joissa vastuksen arvo on alle $500 \Omega\text{m}$ ja joissa mielellään esiintyvät kaikki alueen kokoonpuristuvat maakerrokset. Ainakin pehmeimmistä kerroksista ($R_{\min}$) tulisi aina saada mitaustulos.

Muunnos tehdään jommallakummalla seuraavista menettelyistä:

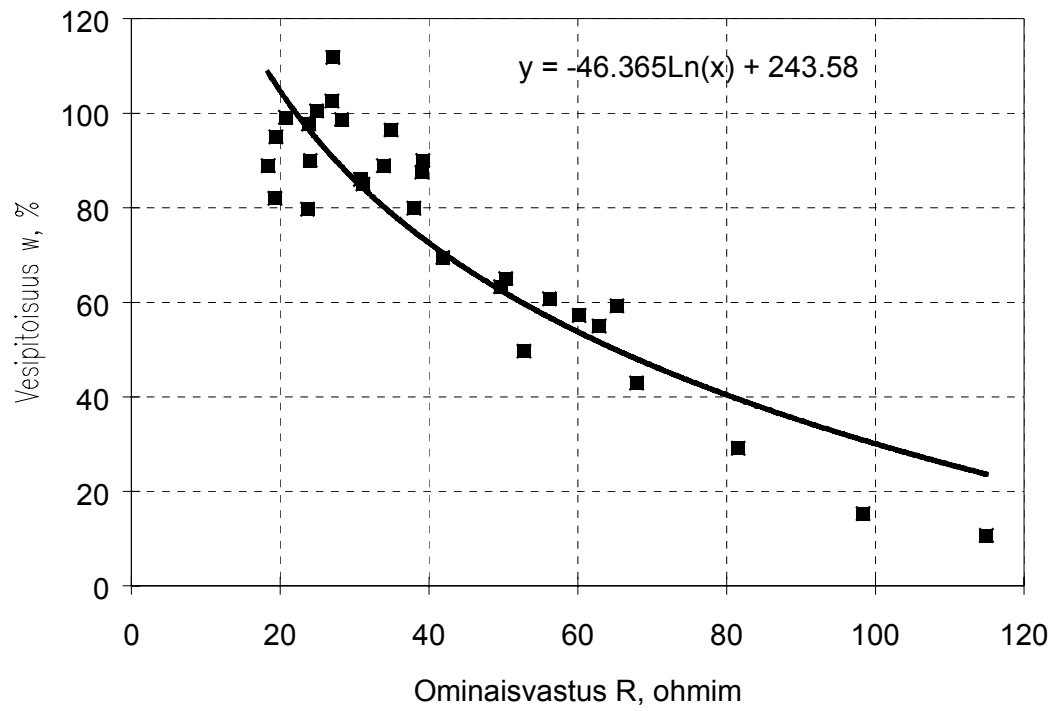
1. Vesipitoisuus määritetään pistekohtaisesti, ns. radiometrisin gamma- ja neutronmittauksin (Menetelmäkuvaus TPPT 10 "Radiometrinen mittaus"). Ominaisvastus määritetään joko sähköisen vastusluotauksen tulostuksesta tai erillisestä sähköisestä pisteluotauksesta.
2. Jatkuvan näytteenoton näytteistä määritetään vesipitoisuus sekä sitä vastaavat häiriintymättömän näytteen ominaisvastukset (instick tms. menetelmällä). Ominaisvastukset voidaan määrittää myös tässä menettelyssä sähköisen vastusluotauksen tulostuksesta

näytteenoton kohdalta tai näytteenoton viereltä tehdyn ominaisvastusluotauksen (pistemäinen mitta) avulla.

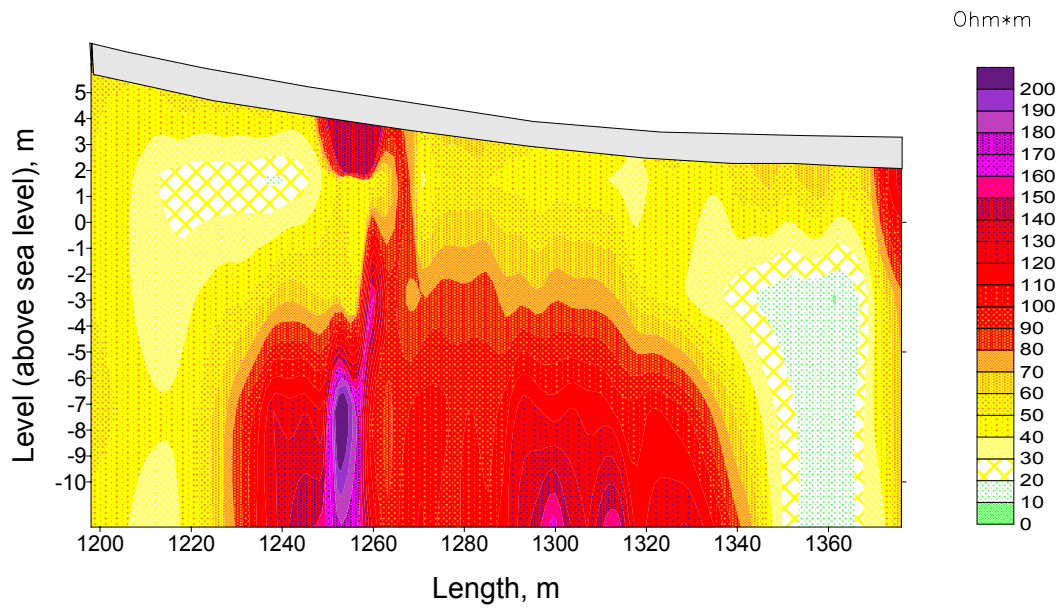
Radiometriseen mittaukseen perustuva menettelytapa (1) on suositeltavampi ja myös kustannustehokkaampi, koska sen avulla voidaan määrittää vesipitoisuusprofiili jatkuvana tai lähes jatkuvana. Radiometrisessä mittauksessa suoritetaan $n-n$ - ja $\gamma\gamma$ -luotaukset. Näistä $n-n$ on neutronsäteilyn hajaantumiseen (dispersioon) perustuva vesipitoisuusmittaus ja $\gamma\gamma$ on γ -säteilyn dispersioon perustuva tiheysmittaus. Neutronimittaus määrittää maamateriaalin vesimäärän ja molempien mittausten tuloksia käytetään muiden ominaisuuksien määrittämiseen. Mittaustuloksista lasketaan maakerrosten vesipitoisuudet (w), tilavuuspainot (γ , γ_d) ja kyllästysasteet (S_r). Näistä tiedoista voidaan määrittää edelleen pohjaveden pinnan taso (GW_0) ja vallitseva pystysuuntainen jännitystila (σ'_{v0z}). Olemassa olevilla teillä radiometriset mittaukset suoritetaan joko rakenteet läpäisevinä tai vinoon tien reuna-alueelta. Mittauksilla saadaan lisäksi tarkennettua olemassa olevien rakennekerrosten tilavuuspainot. Tuloksia voidaan pohjamaan osalta hyödyntää myös konsolidaatioasteen laskennassa. Radiometrisen mittauksen suoritus on esitetty menetelmäkuvaussessa TPPT 10 "Radiometrinen mitta" .

Paikkakohtainen ominaisvastus-vesipitoisuus -vuorosuhde muodostetaan piirtämällä esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmaa käyttäen vesipitoisuudet vs. ominaisvastus ja määrittämällä näin syntyville pistepareille sovituskäyrä. TPPT-ohjelmassa laaditulla RAIPIX -ohjelmalla sovitusta voidaan tehdä käyttäen hyväksi kaikkia eri vesipitoisuusmääritysten arvoja. Vaikka pistepareja ei määritysten perusteella olisi käytettävissä riittävän laajalla vesipitoisuus-alueella, voidaan sovitusta suorittaa, koska ohjelma sovittaa havaintoihin vakiofunktion vesipitoisuusfunktion. Vakiofunktio on laadittu laajan VTT:lle eri mittauksista keräytyneen tausta-aineiston perusteella. Ominaisvastuksen ja vesipitoisuuden välinen vuorosuhde muodostuu edellä kuvatulla menettelyllä kuvan 3 mukaiseksi. Tässä yhteydessä tulee huomioda se, että vesipitoisuus-ominaisvastus -vuorosuhde on mittauslaite- ja -menetelmä riippuva. Vuorosuhteeseen vaikuttaa lisäksi mittauksessa käytetty inversio-ohjelma. Tästä seuraa se, ettei eri mittalaitteita ja tulkintamenettelyjä käytettäessä yleistettyä vuorosuhdetta välttämättä voida sellaisenaan käyttää. Paineellisen pohjaveden alueella pohjaveden ylöspäin tapahtuva virtaus saattaa myös sekoittaa maapohjan suolatasapainon siten, ettei mittauksessa saada luotettavaa korrelaatiota ominaisvastuksen ja vesipitoisuuden välille.

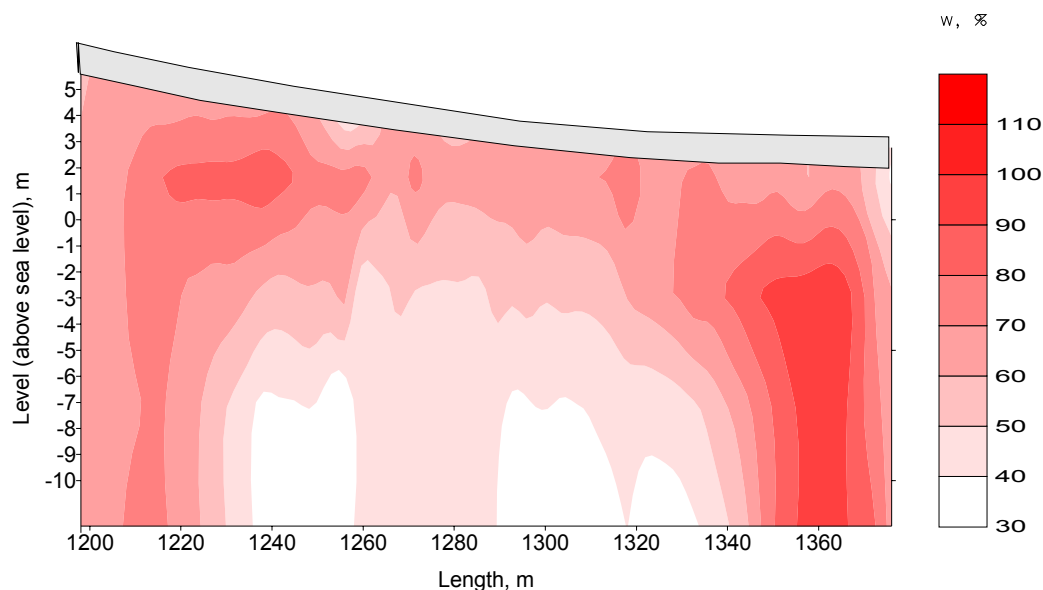
Paikkakohtaisen ominaisvastus-vesipitoisuus -vuorosuhteen avulla jatkuva ominaisvastusjakautuma (kuva 4) voidaan nyt muuttaa jatkuvaksi vesipitoisuusjakautumaksi (kuva 5).



Kuva 3. Vesipitoisuus-ominaisvastus -vuorosuhde (esimerkki).



Kuva 4. Topografiakorjattu jatkuva ominaisvastusjakautuma.



Kuva 5. Topografiakorjattu jatkuva vesipitoisuusjakautuma.

2.4 Alustava painumatarkastelu

Kun vesipitoisuustomografian tietoihin sovelletaan homogeenisille materiaaleille määritettyjä yleisiä vuorosuhteita (C_c -w, k-w, c_v -w), voidaan yhdessä edellä hankittujen tietojen kanssa luoda kohteesta maastomallin ensimmäinen versio. Tämän ensimmäisen version pohjalta suoritetaan alustava painumalaskenta painumaherkkyyden toteamiseksi. Tässä vaiheessa puuttuvat vielä maapohjan lujuustiedot ja tieto kerrosten ylikonsolidoitumisasteesta, eli tämän vaiheen laskenta kuvaa painuman osalta normaalisti konsolidoitunutta tilaa.

Ensimmäinen lähestymistapa, jos tien tasausviivaa ei vielä tarkasti tiedetä (eikä välttämättä kaikkia muitakaan painumaan vaikuttavia tekijöitä, joista tieto hankitaan lisäpohjatutkimuksilla), on olettaa tierakenteesta aiheutuva tasainen, esimerkiksi 20 kPa:n suuruinen lisäjännitys maapohjalle painumaherkkyyden laskemiseksi. Laskelma suoritetaan käyttäen yleistä vuorosuhdetta C_c :n ja vesipitoisuuden välillä kerroksille, joissa vesipitoisuus on yli 25 %. TPPT-suunnittelujärjestelmässä maakerrokset oletetaan kokoonpuristumattomiksi, kun vesipitoisuus laskee alle 25 %:n. Tämä vesipitoisuusleikkausraja asetetaan yleensä jo vastusluotausmittauksia tulkittaessa, mutta painumalaskentaohjelmalla painumia on kuitenkin mahdollista laskea tätä pienemmilläkin vesipitoisuuksilla.

Alustavalla painumalaskelmalla saadaan lisäpohjatutkimusten ohjelmointia ja sijoittamista varten riittävän tarkka tieto tien epätasaisista painumista. Tie voidaan sen jälkeen jakaa pituussuunnassa samalla tavalla painuviin, homogeenisiin osuuksiin ilman tarkkaa tietoa ylikonsolidaatioasteesta. Osuudet luokitellaan painuman kannalta merkityksettämiin osuuksiin, osuuksiin joissa painumat ovat esimerkiksi 50...200 mm, 200...500 mm tai yli 500 mm ja näiden siirtymäalueisiin, joiden tunnistaminen on myös tärkeää. Mikäli tasausviiva jo tunnetaan, suoritetaan laskenta tunnettuun tasausviivaan perustuen.

Vanhan tien painumaherkkyydeltä tarkasteluun sisällytetään myös konsolidoitumistilan ja tapahtuneen painuman jälkilaskenta. Laskentaparametrit määritetään siis tien ulkopuolelta olettaen niiden edustavan alkuperäistä ennen tien rakentamista vallinnutta tilaa. Jo tapahtuneet painumat lasketaan lähtien olemassa olevan tien rakentamisajankohdasta. Tarkasteluhetken jälkeen tapahtuvat painumat (odotettavissa olevat lisäpainumat) lasketaan tarkasteluajan kohdan (esimerkiksi 20 vuotta eteenpäin) ja jo tapahtuneiden painumien välisenä erotuksena.

2.5 Täydentävät pohjatutkimukset ja laboratoriotutkimukset

Painumaherkkyystarkastelun pohjalta tehdään täydentävien pohjatutkimusten ohjelmointi, jossa määritetään täydentävien pohjatutkimuspisteiden sijainti ja mittaustavat. Uuden tien linjalla täydentävinä pohjatutkimuksina suoritetaan CPTU-kairauksia, näytteenottoa, siipikairauksia ja vettä läpäisevien kerrosten paikantaminen.

Täydentävinä pohjatutkimuksina suoritetaan vanhalla tiellä radiometrisiä mittauksia, CPTU-kairauksia, näytteenottoa, siipikairauksia ja läpäisevien kerroksien (reunaehto) määrittäykset.

Radiometriset mittaukset suoritetaan joko rakenteet läpäisevinä tai vinoon tien alle reuna-alueelta. Mittauksilla saadaan tarkennettua olemassa olevien rakennekerrosten tilavuuspainot ja tuloksia voidaan pohjamaan osalta hyödyntää myös konsolidaatioasteen laskennassa. Ellei painumaerovertailua (havaittu painuma / laskettu painuma) ole suoritettu jo aikaisemmassa vaiheessa, suoritetaan se viimeistään täydentäviä pohjatutkimuksia suunniteltaessa, jotta tutkimukset voidaan tarvittaessa kohdentaa sellaisiin paikkoihin, joissa painumaherkkyys sekä havaittu painuma merkittävimmin poikkeavat lasketuista painumista. Täydentäviä pohjatutkimuksia ohjelmoitaessa painumaerovertailusta saatava tieto otetaan tasavertaisena huomioon painumaherkkyystarkastelun kanssa.

CPTU-kairausten määrää lisätään tarvittaessa ja suoritetaan lisäksi pohjasuhteiden merkittävästi vaihdelleessa pysäytyksiä kairausten aikana (dissipation test). Lisättävillä kairauksilla täydennetään kerrosrajatietoja ja kerrosten jatkuvuustietoja. Pysäytyksillä saadaan tietoa maakerrosten vedenläpäisevyyssominaisuuksista. Lisäksi kairaustuloksista voidaan arvioida kerrosten ylikonsolidoitumisastetta (OCR).

Tarkka painuman ja painumaeron laskenta edellyttää luotettavaa ja tarkkaa maapohjan vedenjohtavuuden ja konsolidaatitilan tuntemista. Pelkän vesipitoisuuden avulla voidaan kuitenkin alustavasti arvioida kohdat, joissa on odotettavissa suurimmat kokonaispainumaerot. Painumaominaisuuksien tarkempaa määrittystä varten kohteesta otetaan häiriintymättömät näytteet ödometrikokeita varten. Näytteenottopisteiden paikat ja tasot määritetään vesipitoisuustomografian perusteella siten, että ödometrikokeita tulee tehtäväksi eri vesipitoisuuksia edustavista kerrostumista (esimerkiksi noin $\Delta w = 15\ldots 20\%$ välein). Mikäli merkittävästi koonpuristuvia kerroksia jakaa eri osuuksiin vedenjohtavuudeltaan muuta aluetta paremmin vettä johtava kerrostuma, tulee tämän kerroksen molemmin puolin tehdä ödometrikokeita. Vettä paremmin johtavan kerroksen vedenläpäisevyyden määrittäystä ja sen vaikutusta painumaan on tarkasteltu lähemmin jäljempänä luvussa 2.6 ja menetelmäkuvaus TPPT 12 Läpäisevän kerroksen määrittäminen painumalaskennan tarpeisiin.

Otetuista maanäytteistä määritetään laboratoriossa painumaominaisuudet. TPPT-suunnitelujärjestelmän mukaisessa menettelyssä määrittäminen tehdään portaittaisella standardiödometrikokeella, jos materiaalin vesipitoisuus on $w > 100\%$ tai, jos materiaalin humuspitoisuus (orgaanisen aineksen pitoisuus) on yli 2% . Vesipitoisuuden ollessa $60\% < w < 100\%$ ja humuspitoisuuden alle 2% , painumaominaisuudet voidaan määrittää myös CRS-kokeella. Painumakokeiden perusteella muodostetaan jatkotarkasteluja varten paikkakohtainen C_c - w -vuorosuhde. Painumakokeesta saadaan lisäksi tietoa maakerrosten vedenläpäisevyyssominaisuuksista (c_h , c_v , k_x , k_y) ja ylikonsolidoitumisasteesta (OCR). Vedenläpäisevyysskerroin (konsolidaatikerroin) voidaan ödometrikokeen sijasta määrittää myös CPTU:n huokospaineen purkautumiskokeella.

Siipikairauksilla (Kairausopas II, Siipikairausopas. SGY) määritetään maakerrosten leikkauksisuus (τ_{su}) ja saadaan myös tietoa ylikonsolidoitumisasteesta (OCR). TSARPIX-ohjel-

massa esikonsolidaatiopaine σ_c annetaan tarvittaessa erikseen kunkin pikselin keskikohdalla manuaalisesti.

Saven konsolidaatiotila

Kaikissa painumalaskentatehtävissä, tehtiinpä ne kokemuseräisillä karkeilla menetelmillä tai parhaimmilla elementtimenetelmäohjelmilla, maakerroksen konsolidaatiotilan tunteminen on välttämätöntä. Konsolidaatiotilalla tarkoitetaan maakerroksen konsolidaatiojännityksen (esikonsolidaatiopaine, konsolidaatiokuormitus, esikuormitus) suhdetta vallitsevaan tehokkaaseen jännitykseen (kaava 1).

$$\text{OCR} = \sigma_c / \sigma'_{vo} \quad (1)$$

missä,

OCR = ylikonsolidoitumisaste (Over Consolidation Ratio)

σ_c = esikonsolidaatiopaine

σ'_{vo} = vallitseva tehokas pystysuuntainen jännitys

Ongelmana OCR:n määrittämisessä on sekä vallitsevan jännitystilän tunteminen että esikonsolidaatiopaineen määrittäminen. Vallitsevaa tehokasta jännitystä laskettaessa on maakerrosten tilavuuspainojen lisäksi oltava mahdollisimman tarkka tieto pohjavedenpinnan syvyydestä sekä myös huokospainetilasta. Tilavuuspainon määrittäminen suoraan näytteistä tai välillisesti vesipitoisuuden tai sähköisten tai radiometristen mittausten avulla on yleensä yksinkertaista ja riittävän luotettavaa. Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittauksien tulisi olla pitkäaikaisia. Mittaustulosten perusteella painumalaskennassa on harkittava todennäköisin pohjavedenpinnan taso. Luotettavilla huokosvedenpainemittauksilla saadaan mitauskärkien tasolla paras arvio tehokkaasta jännityksestä. Laskenta-arvoa valittaessa on kuitenkin tarkasteltava myös ödometrikokeen avulla määritettyä esikonsolidaatiopainetta sekä myös rakenteen aiheuttamaa lisäjännitystä. Liian pieneksi valittu vallitseva jännitys saatetaan erehdyttää laskijan olettamaan normaalistikonsolidoituneen maakerroksen ylikonsolidoituneeksi. Toisaalta taas normaalistikonsolidoituneen savikerroksen painuma samalla kuormalla on sitä suurempi, mitä pienempi vallitseva jännitys valitaan.

Esikonsolidaatiopaine voidaan määrittää tarkasti ainoastaan jännitys-muodonmuutuskokeilla. Yleisimmin käytetty menetelmä on häiriintymättömälle maanäytteelle tehty ödometrikoe. Portaittain kuormitettavasta ödometrikokeesta saadaan laskettua jokaiselta kuormitusportaalta primäärin konsolidoitumisen loppumishetki ja näiden avulla voidaan piirtää EOP-käyrä (End Of Primary). Useimmiten tyydytään käyttämään 1 vrk:n lukemia EOP-arvojen sijasta. Tästä seuraa, että usein vain hyvin pieni osa sekundaaripainumasta tulee mukaan tuloksiin. Tältä käyrältä voidaan esikonsolidaatiopaine määrittää jollakin tunnetuista menetelmistä. Tangenttimoduulimenetelmää käytettäessä luonteva esikonsolidaatiopaineen minimiarvo saadaan esim. siten, että normaalistikonsolidoituneen käyränosan parametreillä ekstrapoloidaan muodonmuutoksen nolla-arvoa vastaava jännityksen arvo. Piirtämällä lineaarisessa koordinaatistossa ylikonsolidoituneen alueen havaintojen kautta suora (vastaa β_2 :n arvoa 1) saadaan em. käyrän ja suoran leikkauspisteestä käyttökelpoinen esikonsolidaatiopaineen arvo.

Esikonsolidaatiopaineen arvo voidaan määrittää myös jatkuvapuristeisilla ödometrikokeilla. Jatkuvapuristeinen ödometrikoe voidaan tehdä joko muodonmuutosohjattuna (CRS Constant Rate on Strain) tai huokosvedenpaineohjattuna (CPR Constant Porepressure Ratio). Jännitys-muodonmuutuskäyrän muoto ja sijainti ovat kuitenkin suuresti riippuvaisia koenopeudesta ja tuloksia onkin ennen laskentakäyttöä redusoitava kokemuseräisillä menetelmillä (mm. Tiehallinnon selvityksiä v. 2001, /1/). Esikonsolidaatiopaineen lisäksi myös muita parametreja on laskentaa varten redusoitava.

Mikäli koetuloksia ei ole käytettävissä, voidaan esijännitystä likimääräisesti arvioida myös. Karkeasti esikonsolidaatiopainetta voidaan arvioida puristinkairan kärkivastuksen avulla (Menetelmäkuvaus TPPT 11 CPTU-kairaus) tai siipikairauksen tuloksista, esim. kaava (2). Suljetun leikkauslujuuden ja esikonsolidaatiopaineen välinen yhteys on riippuvainen saven geologisesta iästä sekä plastisuusominaisuuksista. Paikallisen luotteen tuloksen saamiseksi olisi in situ-mittauksin saatava tulos kalibroitava ödometrikokeilla.

$$c_u/\sigma_c = 0,22 \quad (2)$$

missä,

c_u = suljettu leikkauslujuus

Vesipitoisuuden avulla ei savikerroksen esikonsolidaatiopainetta tai konsolidaatitilaa voida arvioida. Mikäli vesipitoisuusmenetelmää käytetään ilman ödometrikokeiden avulla tehtävää esikonsolidaatiopaineen tarkistamista, tulee maapohja arvioida normaalistikonsolidoituneeksi ja tällöin arvioitu painuma on todennäköisesti toteutuvaa suurempi.

2.6 Painumalaskennan reunaehdot

TPPT:n suunnittelujärjestelmässä painumalaskennassa läpäisevillä reunaehdoilla tarkoitetaan sellaisia vettä johtavia kerroksia, jotka toimivat todellisuudessa ja myös painumalaskennassa veden virtauksen reunaehtoina. Reunaehtona toimii esimerkiksi savikerrosten välissä oleva hiekkakerros, mikäli rakenteen painosta kehittyvä huokospaine purkaantuu tähän kerrokseen ja kerros on jatkuva siten, että se pystyy myös kuljettamaan savesta siirtyvän veden pois. Potentiaaliset läpäisevät kerrokset voidaan yleensä havaita puristinkairauksen tuloksista.

Kerrosten tunnistamisessa käytetään TPPT:ssä kehitettyä menetelmää. Menetelmä perustuu ko. kerrokseen ulotetussa läpäisevässä putkessa havaittavaan vedenpinnan alentumiseen. Menettelyä käyttäen läpäisevä kerros voidaan tunnistaa puristinkairalla suoritettujen potentiaalisten läpäisevien kerrosten paikallistamisen jälkeen erillisenä toimenpiteenä. Tarkeemmin menettely on kuvattu menetelmäkuvauksessa TPPT 12 "Läpäisevän kerroksen määrittäminen painumalaskennan tarpeisiin".

Vettäjohtavan kerroksen absoluuttista vedenläpäisevyyttä tärkeämpää on sen vedenläpäisevyyden suhde ympäröivien (ylä- ja alapuolella olevien) kokoonpuristuvien kerrosten vedenläpäisevyyteen, vettäjohtavan kerroksen paksuus ja sen jatkuvuus. Kokoonpuristuvien kerrosten vedenläpäisevyys saadaan sähköisen vastusluotauksen tuloksista. Painumalaskenta-profiiliin eri kerrosten (kokoonpuristuvien kerrosten) vedenläpäisevyydet tai konsolidaatiokertoimet tarkennetaan ja tarvittaessa määritetään puristinkairan pysäytyskokeista tai ödometrikokeilla. Näitä molempia voidaan käyttää myös läpäisevän kerroksen vedenjohtavuuden määrittämiseen.

Kaikki hienorakeisempien maakerrosten välissä olevat karkearakeisemmat kerrokset eivät välttämättä muodosta läpäisevää reunaehtoaa. Esimerkkilaskelmien mukaan vettäläpäisevän kerroksen paksuuden ollessa 10 cm ja vedenläpäisevyyden 2 dekadia (100 x) ympäröivää savikerrosta suurempi, tätä kerrosta ei vielä tarvitse huomioida painumalaskennassa. Vedenläpäisevyyden ollessa 3 dekadia (1000 x) suurempi 10 cm paksuinen kerros tulee huomioida. Vedenläpäisevyyden ollessa 4 dekadia (10 000 x) tai sitä suurempi, kerros otetaan huomioon jo sen paksuuden ollessa 1 cm tai suurempi.

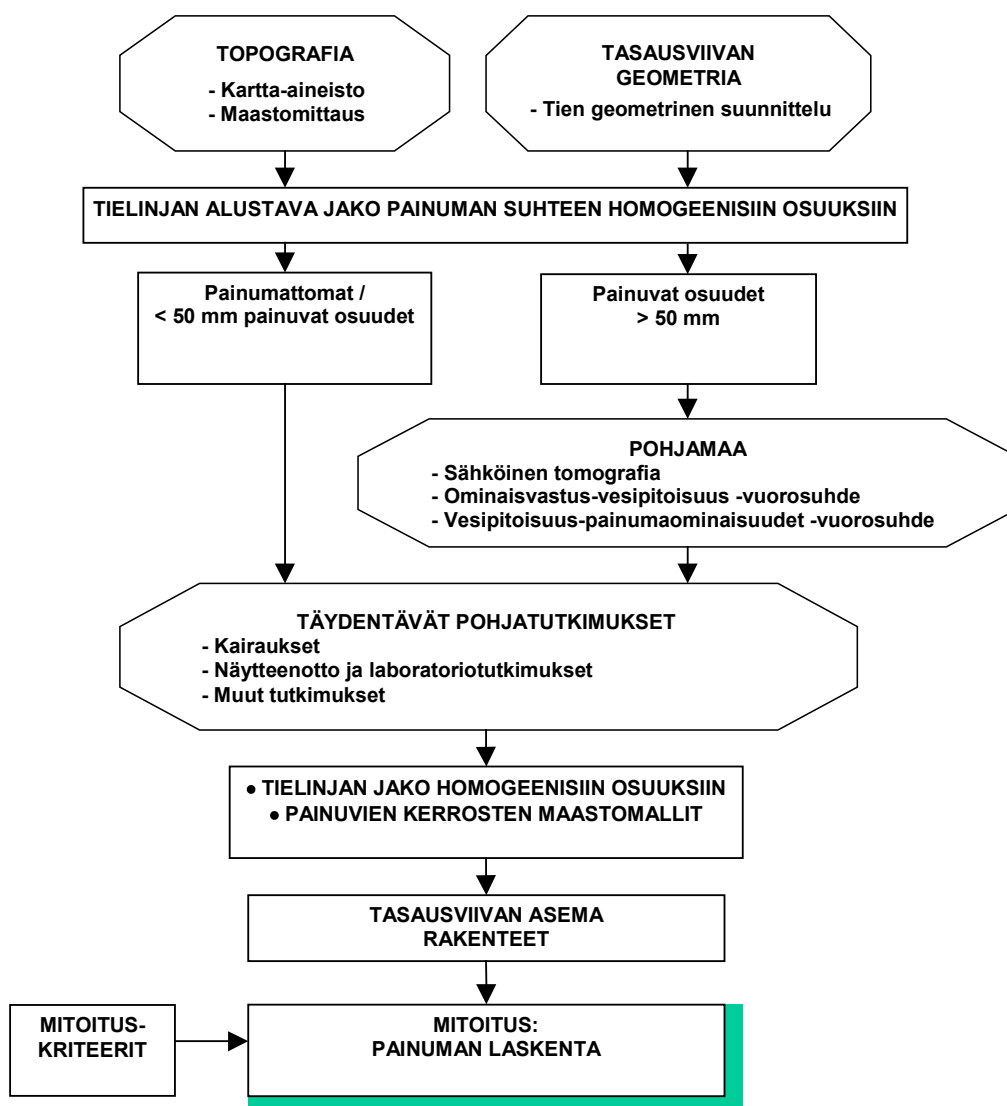
Vettäläpäisevän kerroksen jatkuvuus varmistetaan menetelmäkuvauksessa TPPT 12 "Läpäisevän kerroksen määrittäminen painumalaskennan tarpeisiin" esitetyllä tavalla.

3. PAINUMALASKENTA

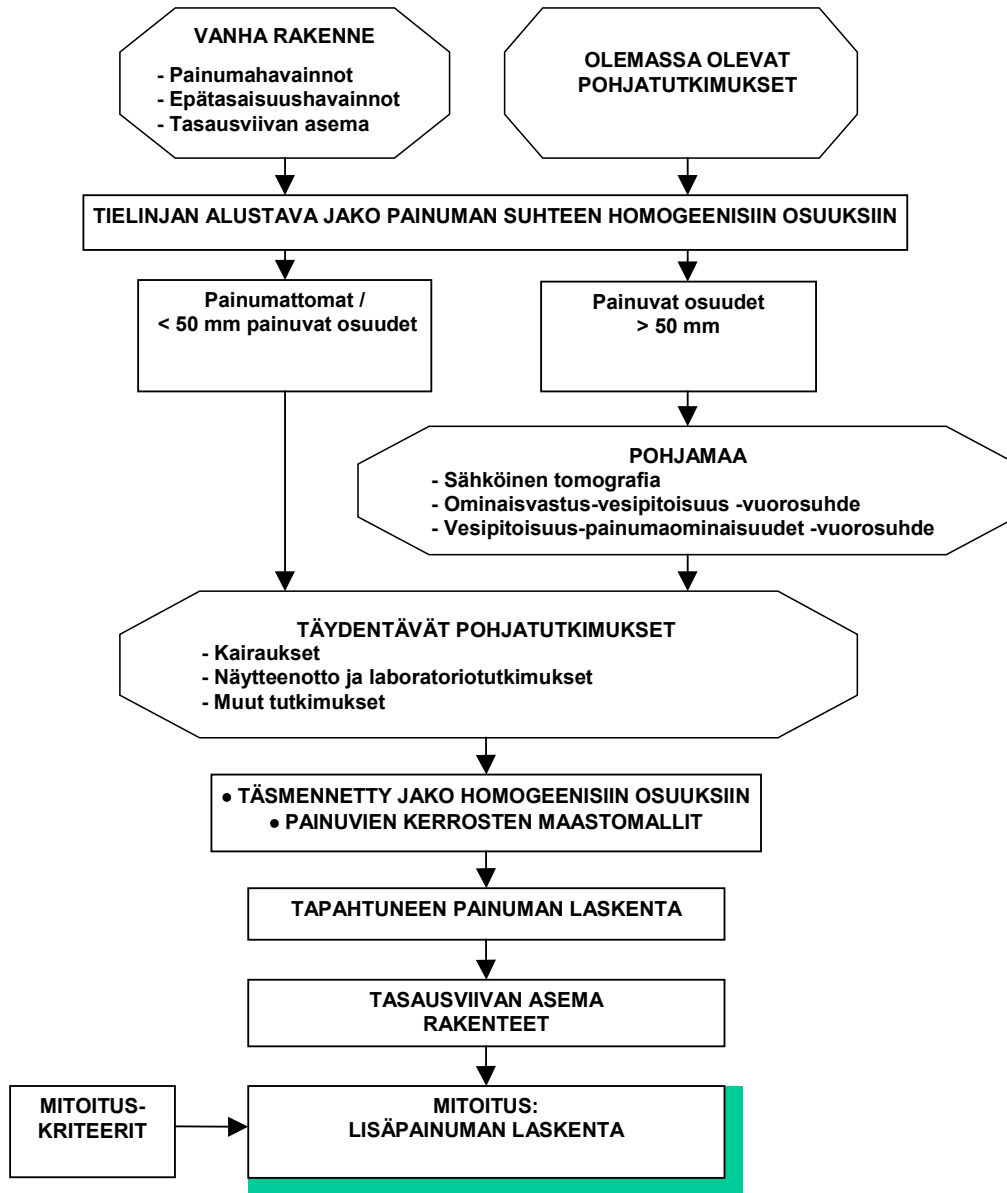
3.1 Painuman hallinta

TPPT:n suunnittelujärjestelmässä painumalaskennalla tunnistetaan tielinjan painuma-herkkyyttä omaavat ja painumien johdosta tiehen mahdollisesti epätasaisuutta aiheuttavat alueet. Painumalaskennan avulla tie voidaan jakaa homogeenisiin osuuksiin ja arvioida saatujen tulosten perusteella pohjarakenneratkaisujen tarve kullakin alueella ja suorittaa rakenteen mitoitus. Käytettävät pohjarakenteet valitaan painuman suuruuteen perustuen useammasta vaihtoehdosta riskikustannusanalyysiin perustuen. Rakenne- ja pohjarakennusvaihtoehtojen valintaa ja pohjarakennusvaihtoehtojen riskikustannusanalyysiä on käsitelty TPPT raportissa "Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus".

Kuvassa 6 on esitetty periaatekaavio painuman hallinnan tarkastelusta ja suunnittelusta uuden tien rakennussuunnittelussa ja kuvassa 7 olemassa olevan (peruskorjattavan) tien suunnittelussa.



Kuva 6. Painuman laskenta suunniteltavalla uudella tiellä, periaatekaavio (TPPT - suunnittelujärjestelmä).



Kuva 7. Painuman laskenta olemassa olevalla tiellä, periaatekaavio (TPPT suunnittelujärjestelmä).

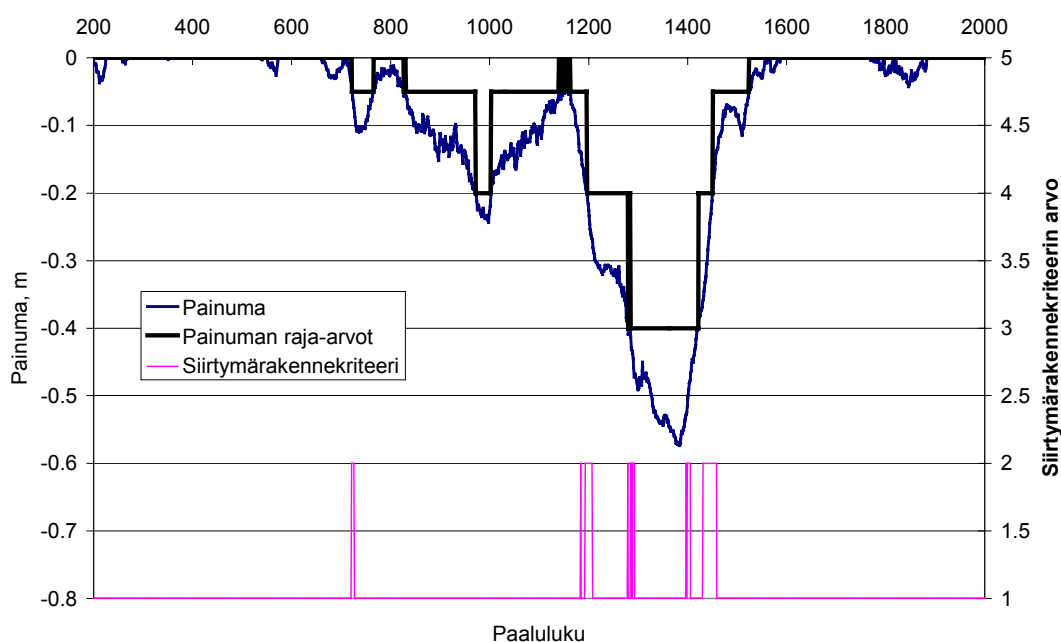
3.2 Jako homogeenisiin osuuksiin

Pohjarakenneratkaisua ei sisällytetä varsinaiseen elinkaarilaskelmaan pohjarakenteiden suu- resta kustannusvaikutuksesta ja ylempiä rakenteita huomattavasti pidemmästä eliniästä johtuen. Pohjarakenteen valintavaiheessa vaihtoehtoisille rakenneratkaisuille suositellaan suorieltvaksi oma riski-kustannusarviointi (TPPT raportti Tien pohja- ja päällysrakenteet - tutkimusohjelma. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus). Valittu pohjarakenneratkaisu saat- taa vaikuttaa seuraavaksi tehtäviin valintoihin (routakestävyys, kuormituskestävyys), muut- taessaan rakennuspohjan esimerkiksi routimattomaksi ja paremmin kantavaksi.

Sähköiseen vastusluotaukseen perustuva painumalaskenta suoritetaan tielinjalta valituille painuman kannalta kriittisille osuuksille. Niille osuuksille, joiden sallitut painuma- ja tasai- suusarvot käyttöaikana (30 vuotta) ylittyvät, suoritetaan pohjarakenteen valinta. Pohjara-

kenteilla painumat rajoitetaan hyväksyttävälle tasolle. Rakenteet pyritään valitsemaan siten, että rakenteiden pituus (homogeeniset osuudet), siirtymärakenteita lukuunottamatta on vähintään 100 m. Kullekin osuudelle valitaan ensin toimivuudeltaan esimerkiksi kolme lähes samanarvoista rakennetta. Tämän jälkeen suoritetaan rakenteiden riski-kustannus -arviointi vuositasolla huomioimalla kullakin rakenteella jatkopainumien esiintymiseen sisältyvä riski. (TPPT-raportti: Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus.)

Homogeeniset osuudet 1 metrin välein lasketun painuman suhteen määritetään käyttöikäsiin (perusmitoitusarvo 30 vuotta) kokonaispainumiin perustuen jakamalla tarkasteltava osuus neljään luokkaan. Kuvassa 8 on havainnollistettu esimerkkinä erään tien tarkastelu-osuuden jakoa homogeenisiin osuuksiin. Luokka 1 määrytyy tielle sallitun kokonaispainuman perusteella. Kokonaispainumien raja-arvot on esitetty suunnittelujärjestelmässä. Tässä esimerkkitarkastelussa tie on oletettu moottoritieksi, jonka suurin sallittu painuma on 400 mm. Luokan 1 ylittävät painumat on aina poistettava. Luokkaan 2 kuuluvat painumavälillä 200...400 mm olevat alueet ja luokkaan 3 painumavälillä 50..200 mm olevat alueet. Näissä luokissa painumaa on mahdollisesti rajoitettava. Alle 200 mm suuruiset painumat on yleensä mahdollista hoitaa siirtymärakenteilla. Välillä 200...400 mm olevien painuminen osalta harkitaan tapauskohtaisesti tarve painumien rajoittamiseen kaltevuuden muutokseen ja viereisiin osuuksiin kohdistettaviin toimenpiteisiin perustuen. Nämä saattavat aiheuttaa tarpeen rajoittaa kokonaispainumaa sallittuakin kokonaispainumaa pienemmäksi. Luokassa 4 painumat ovat alle 50 mm, eikä näillä osuuksilla tarvita painuvaa rajoittavia toimenpiteitä erikoistapauksia lukuunottamatta (sillat yms. pakkopisteet).



Kuva 8. Pohjamaan jako homogeenisiin osuuksiin ja siirtymärakenteiden tarve 1 m välein laskettujen painumien perusteella.

Kokonaispainuman suuruuden suhteen homogeeniset alueet ovat paaluvälit (suluissa painuman arvo): 200-722, 722-765, 765-826, 826-972, 972-1003 (>200 mm), 1003-1151, 1151-1160, 1160-1196, 1196-1279 (>200 mm), 1279-1421 (>400 mm), 1421-1450 (>200 mm), 1450-1523 ja 1523-2000.

Välejä on siis yhteensä 13, mutta niitä voidaan luonnollisesti yhdistää suuremmiksi alueiksi. Kuvasta voidaan havaita, että painumia on rajoitettava paaluvälillä 1279-1421, jolla painuma on yli 400 mm. Ennen tätä aluetta painumat paaluvälillä 1196-1279 ovat yli 200 mm, samoin kuin tämän alueen jälkeen paaluvälillä 1421-1450. Tästä syystä näiden päihin edellytettä-

siin siirtymärakenteita paaluluvuille 1193-1209 ja 1431-1458. Kuitenkin vaikka yli 400 mm painumat rajoitettaisiin tai poistettaisiin, on toimenpidealue syytä valita koko yli 200 mm painuman alueella plv. 1196-1450. Tämän alueen päihin tarvittavien siirtymärakenteiden pituudet määritetään uudelleen käytettävän pohjavahvistusmenetelmän valinnan jälkeen (vahvistetun alueen painuman suhteen). Muut alueet, plv 200-1196 ja 1450-200 eivät edellytä toimenpiteitä, lukuunottamatta siirtymärakennetta plv. 721-726 (siirtymärakenteen pituus määritetään erikseen).

Painumaeroista johtuva epätasaisuus saattaa joissakin erityistapauksissa olla merkittävämpi jo aiemminkin kuin 30 vuotta. Tältä varalta tarkastelu voidaan tehdä vastaavalla tavalla myös ajankohtina 1, 5, 10 ja 20 vuotta.

Kun tarkasteluosuutta jaetaan homogeenisiin osuuksiin, on etenkin luokkien 2 ja 3 vaatimia mahdollisia toimenpiteitä suunniteltaessa syytä käyttää hyödyksi laskettuihin painumiin perustuvaa siirtymärakenteiden sijoittumiskriteeriä. Siirtymärakenteet sijoitetaan paikkoihin, joissa kaltevuuden muutos ilman siirtymärakenteita muodostuisivat liian suureksi. Siirtymärakenteiden tarve arvioidaan tien nopeuteen perustuen suunnittelujärjestelmässä esitettyjen periaatteiden ja kriteerien mukaisesti (TPPT raportti "Tien pohja- ja päällysrakenteet - tutkimusohjelma. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus").

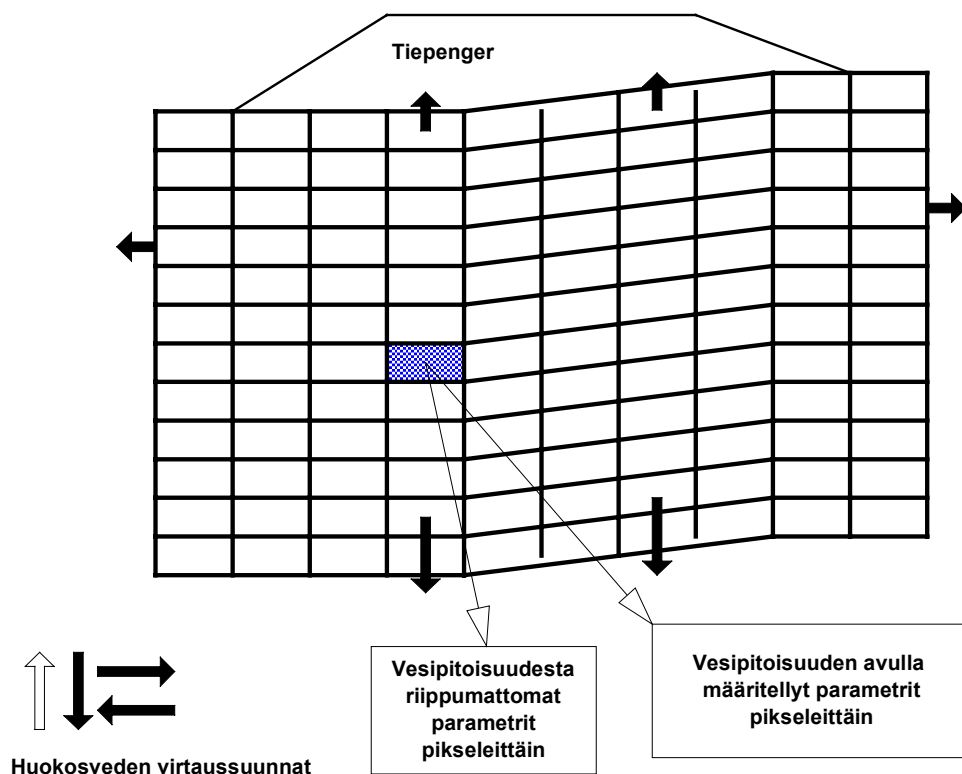
Kuvassa 8 esitetyt siirtymärakenteita edellyttävät paikat on määritetty tienopeuteen 100 km/h perustuen. Tämän nopeuden mukaan suurin sallittu kulmanmuutos on 0.5 % (painumaero 75 mm) 15 m matkalla (tämä on määräävin aallonpituuden puolikas tällä tienopeudella). Kuvassa 8 nämä paikat on laskettu taulukkolaskentaohjelmalla siten, että 15 m:n matkalla esiintyvän painumaeron ja sallitun painumaeron suhteen itseisarvoon on lisätty luku 1 (yksi) ja summasta on otettu luvun kokonaislukuosa (eli desimaalit on jätetty pois). Tällä menetelmällä painumaeron ollessa sallittua (75 mm) pienempi, siirtymärakennekriteeri saa arvon yksi. Siirtymärakennekriteerin arvot ovat tätä menettelyä käytettäessä aina ≥ 1 olevia kokonaislukuja. Mitä suurempi arvo on, sitä suurempi on painumaero ko. matkalla.

Mikäli 30 vuoden painuma on pienempi kuin 150 mm, on syytä tarkistaa, ettei esim. 10-vuotiskaksoissa laskettu siirtymärakennekriteeri ylitä raja-arvoa. Mikäli raja-arvo ei ylity, pienet painumaerot voidaan savikoilla eliminoida mahdollisesti päällystyskierron avulla.

Parannettavalla tiellä homogeeniset osuudet jaetaan painumiin perustuen myös neljään luokkaan, kuten uusillakin tiellä. Tien levennämistapauksessa vanhan tien jako homogeenisiin osuuksiin voidaan tehdä GPS-mittauksella vaaitun ja alkuperäisen tiesuunnitelman korjatun tasausviivatiedon erotuksen perusteella kuten uuden tien osalta painumaennusteeseen pohjautuen. Muussa tapauksessa, jos lähtötietoja ei ole tai ne ovat epäluotettavia tai tien perusrakennuksessa tien massan lisääntyminen vanhan tien vierellä on merkitykseltöntä, jako homogeenisiin osuuksiin tehdään vastaavalla tavalla kuin uudella tiellä, mutta lähtökohtana on tulevan painuman ja jo tapahtuneen painuman erotuspainuma (lisäpainuma).

3.3 Pikselimallin muodostamisparametrit

TPPT-suunnittelujärjestelmän painuman laskentamenettely perustuu jatkuvan maastomallin muodostamiseen ns. pikselimallina. Maan ominaisuuksia kuvaavat lähtötiedot pikselimalliin saadaan sähköisestä vastusluotauksesta ja sitä täydentävistä pohjatutkimuksista. Maastomalli muodostuu tasotapauksessa (tien pituussuunnassa tai tien poikkisuunnassa) pienistä suorakaide-elementeistä, joissa elementtikohtaisista painumaominaisuuksista osa määritetään sähköisestä vastusluotauksesta muodostettavan vesipitoisuustomografian avulla. Pikseleistä koostuvan maastomallin periaate on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Pikseleistä koostuvan maastomallin periaate.

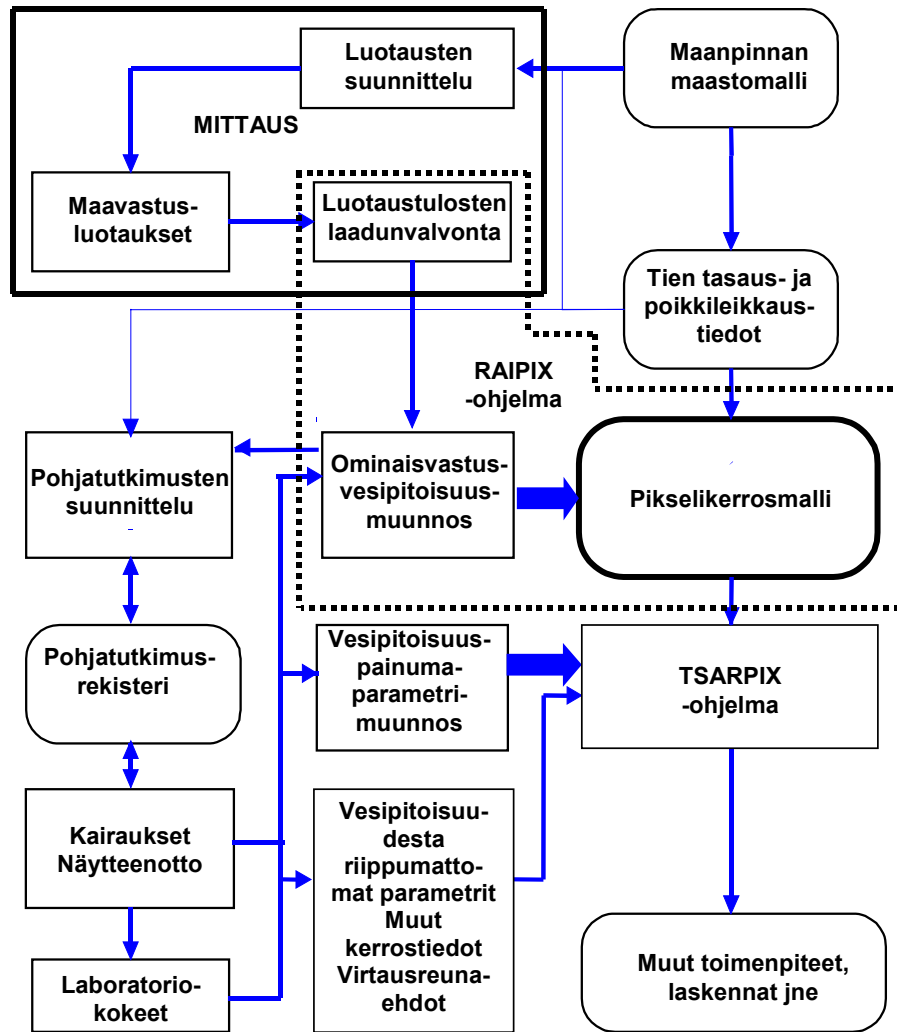
Kuvassa 10 on esitetty toimintakaavio lähtötietojen muodostamiseksi pikselikerrosmalliin. Tavanomaisessa suunnittelukäytännössä tarvittavien lähtötietorekistereiden ja -tiedostojen lisäksi toimintakaavioon kuuluvat olennaisina osina muunnokset maavastusluotauksista saatujen ominaisvastusten ja vesipitoisuuksien välillä sekä edelleen muunnokset vesipitoisuusvaruuden ja painumaparametrien välillä. Pikselikerrosmalli perustuu siis jatkuvalla sähköisellä vastusmittauksella mitattuihin ominaisvastusarvoihin suorakaiteenmuotoisten pikselien (elementtien) keskipisteissä. Ensimmäisessä muunnoksessa ominaisvastukset muunnetaan paikkakohtaisiksi vesipitoisuuksiksi tarvittaessa kerroksittain käyttäen hyväksi radiometristen mittausten tuloksia ja / tai maanäytteistä laboratorioissa määritettyjä pistekohtaisia vesipitoisuuksia. Esimerkki muunnoksesta on esitetty kuvassa 11.

Toisessa muunnoksessa vesipitoisuusarvot muunnetaan joko yleisten vuorosuhteiden tai ödometrikokeisiin pohjautuvien paikkakohtaisten muunnosten avulla pikselien keskipisteissä sellaisiksi aika-painumaparametreiksi, joilla on havaittu hyvä korrelaatio vesipitoisuuden kanssa. Tällaisiksi parametreiksi ovat osoittautuneet kokoonpuristuvuusindeksi C_c ja vedenläpäisevyyskerroin k . Kokoonpuristuvuusindeksille C_c on havaittu sopivan parhaiten lineaarinen yhteys (kaava 3) vesipitoisuuden kanssa (RITA-tietokanta, mm. Painumaparametrien vaiheittainen määrittäminen. TKK Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto. Raportti. 1999).

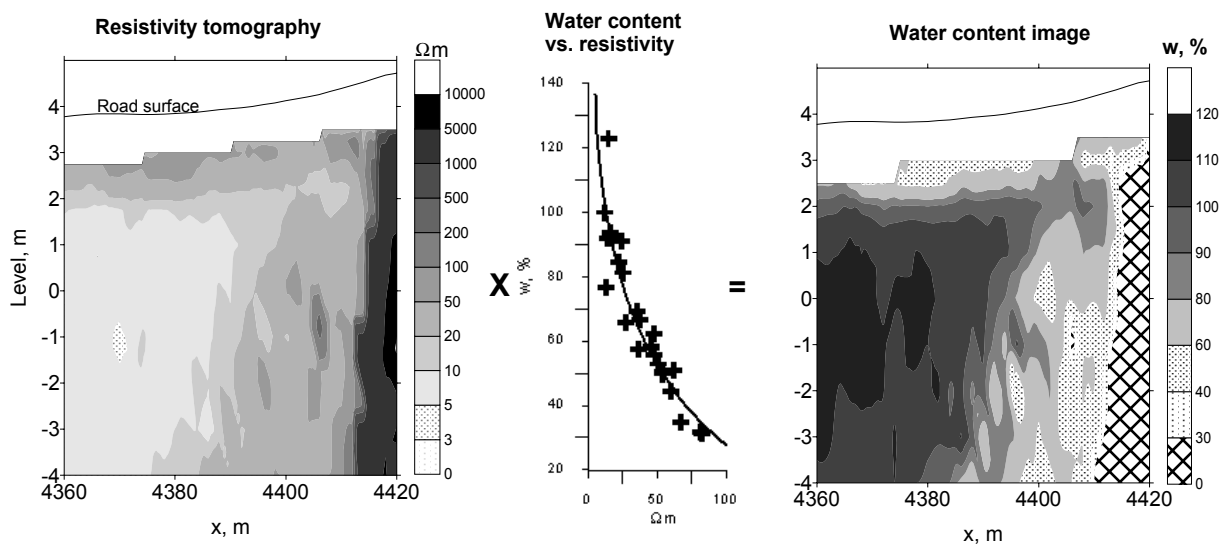
$$C_c = A (\rho_s w - B) \quad (3)$$

missä,

- w = vesipitoisuus
- ρ_s = maan kiintotiheys
- A, B = paikka- ja syvyyskohtaisia vakioita



Kuva 10. Toimintakaavio lähtötietojen muodostamiseksi pikselikerrosmalliin (TPPT suunnittelujärjestelmä).



Kuva 11. Vesipitoisuustomografian määrittäminen

Jäljempänä esitettyjen sovellusten yhteydessä vedenläpäisevyyskertoimelle on käytetty samantyyppistä lineaarista yhteyttä kuin kokoonpuristuvuusindeksillekin. Vedenläpäisevyyskerroimen k funktionaalisia yhteyksiä tutkitaan edelleen TKK:ssa RITA-tietokannan kehitystyössä.

Muita painumalaskelmissa tarvittavia vesipitoisuudesta riippuvia parametreja ovat tehokas tilavuuspaino γ' ja alkuhuokosluku e_0 . Näille on olemassa vedellä kyllästyneessä maassa yleisesti tunnetut yhteydet vesipitoisuuden kanssa.

Vesipitoisuudesta riippumattomat painumaparametrit, tärkeimpänä esikonsolidaatiopaine σ_c , määritetään kunkin pikselin keskikohdalla manuaalisesti. Reunaehdot laskelmia varten määritetään samoin manuaalisesti.

Muut laskennassa käytettävät suureet, esim. kuormitus- ja virtausreunaehdot jne. muodostetaan tavanomaisen suunnittelukäytännön mukaisesti. Virtausreunaehtojen määrittämistä, lähinnä painuvan kerroksen sisällä sijaitsevien vettäjohtavien kerrosten suhteen, on käsitelty menetelmäkuvauksessa TPPT 12 "Läpäisevän kerroksen määrittäminen painumalaskennan tarpeisiin".

Painuman laskenta suoritetaan pikselimalliin perustuvalla TSARPIX-ohjelmalla. TSARPIX-ohjelman manuaali on esitetty tämän raportin liitteessä 1.

Sähköisellä vastusluotauksella saatujen tulosten käsittelyä painumalaskentaa varten, mm. RAIPIX-apuohjelman käyttöä ja mittaustiedon tasa-arvoistuksessa tarvittavan Surfer-ohjelman käyttöä, on tarkasteltu menetelmäkuvauksessa TPPT 9 "Sähköinen vastusluotauksen tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa". RAIPIX-apuohjelmalla suoritetaan sähköisten vastusluotauksen mittaustietojen yhdistäminen, korjaus ja lajittelu osana painumalaskentaohjelman lähtötietojen valmistelua.

Myös muiden lähtötietojen paalulukukohtaiseen valmisteluun on tehty erillinen EXCEL-pohjainen valmisteluohjelma (TSARPIX-data.exe). Tällä valmisteluohjelmalla luodaan sähköisellä luotauksella saatuja vesipitoisuustietoja vastaavat paalulukukohtaiset lähtöarvot tien kohdalla vaikuttavasta maanpinnan korkeustasosta, pohjavedenpinnan tasosta, tasausviivan korkeustasosta, kaivutasosta (leikkaustaso; oletus maanpinta) ja mahdollisen kevennyksen suuruudesta (annetaan negatiivisena kuormana; oletus 0 kPa). Leikkausten ja kevennysten huomioimisen periaatteet on esitetty TSARPIX-ohjelman manuaalissa.

Sähköisellä vastusluotauksella saatavaa informaatiota voidaan käyttää myös tavanomaisen kerrosrajoja sisältävän maastomallin luomiseen ja sitä käyttäen tehtävän painumalaskennan suorittamiseen. Tätä vaihtoehtoa ei tässä yhteydessä kuitenkaan käsitellä.

Pikselikerrosmallin käytännöllinen soveltaminen tien pituussuunnassa suoritettavaa painumalaskentaa varten tapahtuu seuraavaa toimintamallia noudattaen:

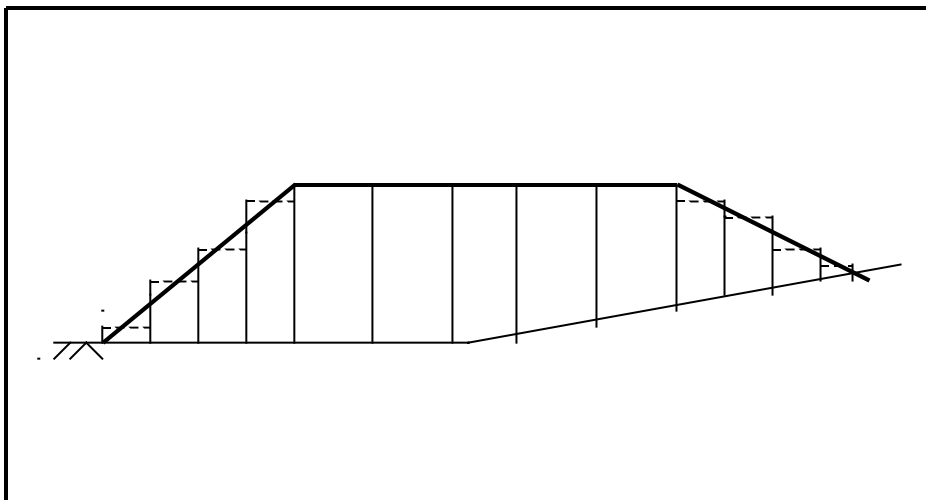
- 1) Kohteesta tarvitaan EXCEL-tiedostoja, jotka sisältävät paalukohtaisesti tien pituussuunnassa pikseleiden korkeustaso- ja vesipitoisuustiedot (luodaan RAIPIX- ja Surfer -ohjelmia hyväksikäyttäen) sekä muut tarpeelliset paalulukukohtaiset tiedot (valmisteluohjelma).
- 2) Korkeustaso- ja vesipitoisuustiedot järjestetään paaluittain erillisiin EXCEL-tiedostoihin, lasketaan pikselikerrosrajat sekä tehdään tarpeelliset korjaukset ja lisäykset maanpinnan ja pohjavedenpinnan välisiin pikselitietoihin. Paalukohtaiset kerrosrajatiedot siirretään sen jälkeen EXCEL-tiedostoista TSARPIX -ohjelman datatiedostoon ohjelman vaatimassa formaatissa.

- 3) Em. paalukohtaisten erillisten EXCEL-tiedostojen vesipitoisuusarvot muunnetaan laaditun EXCEL-ohjelman avulla vesipitoisuudesta riippuviksi painumaparametreiksi γ , e_0 , C_c ja k sekä edelleen TSARPIX -ohjelmassa käytettäviksi tangenttimoduulimenetelmän parametreiksi m_1 , β_1 (normaalikonsolidoituneella alueella) ja konsolidaatiokertoimeksi c_v (normaalikonsolidoituneella alueella). Ylikonsolidoituneen osan vastaavat parametrit ohjelma määrittää itse sisään syötetyistä oletusarvoista.

3.4 Painuman laskenta TSARPIX -ohjelmalla

Lisäjännitys

Penkereestä maapohjaan vaikuttava nettokuorma määritellään pengerkuorman muotoisena, jakautuneena pystysuorana pintakuormana, joka ulottuu tien pituussuunnassa hyvin kauaksi. Laskentatarkkuuden parantamiseksi epätasainen jakautunut kuorma jaetaan kuorman vaikutusalueella 32:een tasan jakautuneeseen osakuormaan. Periaate on esitetty kuvassa 12.



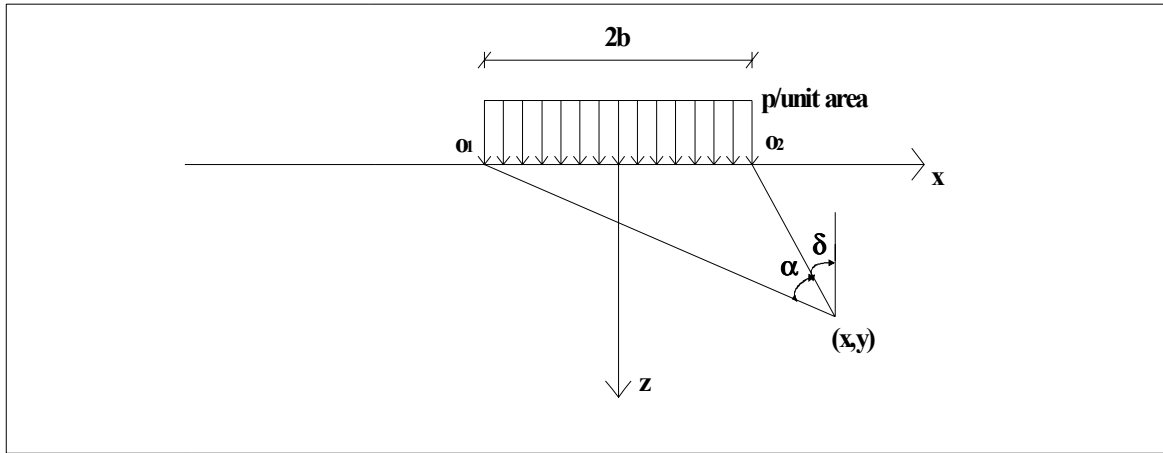
Kuva 12. Epätasaisen pengerkuorman jakaminen tasan jakautuneisiin osakuormiin, periaate.

Kustakin osakuormasta maapohjaan aiheutuva pystyjännityslisäys lasketaan Boussinesqin teoriaan pohjautuen oheisen nauhamaisen pintakuorman ratkaisua käyttäen (kuva 13).

$$\Delta\sigma_z = \frac{p}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos(\alpha + 2\delta)] \quad (4)$$

missä,

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_z &= \text{osakuormasta aiheutuva lisäpystyjännitys pisteessä (x,y)} \\ p &= \text{osakuorman suuruus} \end{aligned}$$



Kuva 13. Osakuormasta aiheutuvan pystyjännityksen laskenta, merkinnät.

Koko pengerkuormasta aiheutuva lisäjännitys pisteessä (x,y) saadaan summaamalla osakuormista aiheutuvat jännitykset.

Muodonmuutos

Pystymuodonmuutos ε_z pikselien keskipisteessä lasketaan Suomessa yleisesti käytetyn Ohde-Janbun tangenttimoduulimenetelmän mukaisesti.

Normaalikonsolidoitunut alue, kaava (5):

$$\varepsilon_{z1}(t) = \frac{1}{m_1} \ln \left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma_z'(t)}{\sigma_c} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_0 + \Delta\sigma_z'(t) \geq \sigma_c \quad (\beta_1 = 0)$$

Ylikonsolidoitunut alue, kaava (6):

$$\varepsilon_{z2}(t) = \frac{\Delta\sigma_z'(t)}{m_2\sigma_v} \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_z'(t) \leq \sigma_c - \sigma_0 \quad \sigma_v = 100 \text{ kPa} \quad (\beta_2 = 1.0)$$

$$\varepsilon_z(t) = \varepsilon_{z1}(t) + \varepsilon_{z2}(t) \quad (7)$$

missä

σ_0 = tehokas alkujännitystila pystysuunnassa

σ_c = tehokas esikonsolidaatiopaine

$\Delta\sigma_z'(t)$ = tehokas pystyjännityksen lisäys ajanhetkellä t

z = syvyys kuormituspinnasta

Moduuliluvut

Moduuliluvut m_1 lasketaan seuraavasti:

$$m_1 = \ln 10 (1 + e_0) / C_c \quad (8)$$

Moduuliluvulla m_2 on sisään syötetty arvo:

$$m_2 = 50$$

Huokosylipaine

Tehokas pystyjännityksen lisäys $\Delta\sigma_z'(t)$ lasketaan tehokkaiden jännitysten periaatteen mukaisesti:

$$\Delta\sigma_z'(t) = \Delta\sigma_z - \Delta u(t) \quad (9)$$

missä,

$\Delta\sigma_z$ = pengerkuormasta aiheutuva pystysuora jännityslisäys

$\Delta u(t)$ = huokosylipaine ajanhetkellä t

Huokosylipaineen $\Delta u(t)$ laskenta ajanhetkellä t perustuu Terzaghin yksiulotteiseen konsolidaatioteoriaan, joka esitetään seuraavalla differentiaaliyhtälöllä:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \quad (10)$$

missä,

c_v = konsolidaatiokerroin pystysuunnassa

Yhtälön (8) jälkimmäisellä termillä otetaan huomioon muuttuva kuormahistoria.

Differentiaaliyhtälö ratkaistaan numeerisesti elementtimenetelmällä, jolloin ratkaisu sisältää maa-alkioiden käyttäytymisen sekä normaali- että ylikonsolidoituneilla alueilla. TSARPIX-ohjelma muodostaa elementtiverkon automaattisesti siten, että kukin pikseli jaetaan viiteen elementtiin pystysuunnassa. Tällä parannetaan tuloksen tarkkuutta sekä estetään laskentatulosten oskillointi pienillä aika-arvoilla. Numeerinen aikaintegrointi perustuu implisiittiseen menetelmään.

Ohjelman tarvitsemat reunaehdot annetaan manuaalisesti. Reunaehtotyypit ovat huokosveden ylipaine ja/tai huokosveden virtaamanopeus.

Ratkaisua varten tarvittava huokosveden ylipaineen alkuehto ajanhetkellä $t = 0$:

$$\Delta u(t = 0) = \Delta\sigma_z \quad (11)$$

Konsolidaatiokerroin

Pystysuuntainen konsolidaatiokerroin c_v normaalikonsolidoituneella osalla ja konsolidaatiokerroin c_{v2} ylikonsolidoituneella osalla lasketaan seuraavasti:

$$c_v = k m_1 \sigma_z' / \gamma_w \quad (12)$$

$$\sigma_z' = \sigma_0' + \Delta\sigma_z'(t) > \sigma_c \quad (13)$$

$$c_{v2} = 10 k m_2, \quad \sigma_z' \leq \sigma_c \quad (14)$$

missä,

σ_z' = on tehokas kokonaisjännitys pystysuunnassa ajan hetkellä t

σ_0' = tehokas vallitseva alkujännitys pystysuunnassa

$\Delta\sigma_z'(t)$ = tehokas pystyjännityslisäys ajan hetkellä t aikainkrementin alussa

γ_w = veden tilavuuspaino

k = vedenläpäisevyyskerroin

m_1 = moduuliluku, normaalikonsolidoitunut alue

m_2 = moduuliluku, ylikonsolidoitunut alue

Pikselikohtainen muodonmuutos

Kun elementtikohtaiset muodonmuutokset $\varepsilon_z(t)$ ajanhetkellä t on laskettu, saadaan pikselikohtaiset muodonmuutokset seuraavasti:

$$\varepsilon_j(t) = \sum_{e=1}^n \varepsilon_z(t) \quad (15)$$

missä,

n = elementtien lukumäärä pikselissä (= 5)

Pikselipinon painuma

Painuma $S(t)$ ajanhetkellä t saadaan tämän jälkeen summaamalla pikselien kokoonpuristuminen koko pikselipinon osalta:

$$S(t) = \sum_{j=1}^m h_j \varepsilon_j(t) \quad (16)$$

missä,

m = pikselien lukumäärä pikselipinossa.

Painuman laskemisessa käytettävä pikselimalli eroaa tavanomaisista painuman laskentamalleista siinä suhteessa, että pikselimallissa käytettävien elementtien, pikselien, ominaisuudet poikkeavat vaaka- ja pystysuunnassa toisistaan. Käytetyssä mallinnustavassa kerrosmaisesta mallintamisesta on tavallaan luovuttu ja siirrytty diffuusin maamallin käyttöön. Kulakin solulla käytettävät arvot saadaan esitetyn prosessin tuloksena automaattisesti. Ohjelmalla tien pituus- ja poikkisuunnan painumat saadaan laskettua esimerkiksi metrin välein.

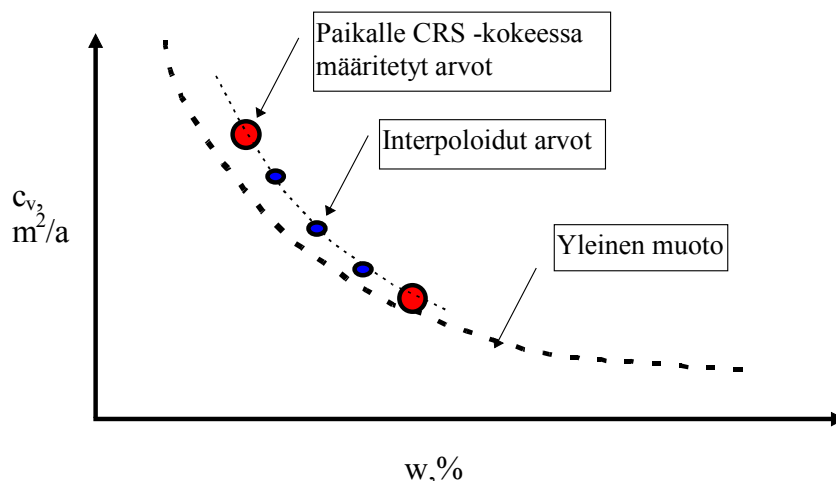
3.5 Lopullinen painumalaskenta

Maastomallin version 1. pohjalta tehtävä alustava painumalaskenta suoritetaan painuma-herkkyyden (painumapotentialin laskenta) toteamiseksi ja jatkotutkimusten sijoittamisen ohjaamiseksi ilman kaikkia painuman suuruuteen oleellisesti vaikuttavia tietoja.

Tarkempaan aika-painuman laskentaan tarvitaan tieto maakerrosten konsolidaatiotilasta (OCR tai σ_c) ja ajassa tapahtuvaa painumista säätelevästä maakerrosten konsolidaatiokerroimesta (c_v) tai vedenläpäisevyydestä (k). Nämä tiedot, samoin kuin tiedot vettäjohtavien kerrosten sijainnista, hankitaan alustavan painumalaskelman tuloksiin perustuvilla lisäpohjatutkimuksilla ja laboratoriokokeilla.

Laskentamalliin σ_c :n raja on suositeltavinta antaa interaktiivisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että ylikonsolidoituneiden alueiden rajat samoin kuin vettä johtavien kerrosten kerrosrajat sekä reunaehdot sijoitetaan malliin saadun informaation perusteella.

Ödometrikokeiden tulosten perusteella tarkennetaan myös painumaparametreja. Eri vesipitoisuuksissa olevien näytteiden vesipitoisuus-kokoonpuristuvuusindeksi -vuorosuhteeseen perustuen määritetään suunnittelukohteen paikalliset vuorosuhteet. Näiden tietojen avulla alustavassa painumalaskelmassa käytetty yleinen vesipitoisuus-kokoonpuristuvuusindeksi -vuorosuhde korjataan paikkakohtaisesti oikeaksi (kuva 14), jonka jälkeen vesipitoisuusavaruus voidaan muuttaa tarkennetuksi C_c -avaruudeksi.



Kuva 14. Yleisen vesipitoisuus-konsolidaatiokerroin -vuorosuhteen korjaus paikkakohtaiseksi. Samaa periaatetta voidaan käyttää C_c ja σ_c paikallisessa korjauksessa.

Täydentävissä pohjatutkimuksissa saatujen tietojen perusteella luodaan maastomallista versio 2. Tällä maastomallilla lasketaan painumat ajan ja paikan funktiona. Painuman laskenta suoritetaan TSARPIX-ohjelmalla (pikselimalli). Painumista saadaan edelleen laskettua tasaisuutta kuvaavat arvot ja sitä kautta määritettyä painuman vaikutukset tien elinkaareen. Painumat lasketaan ajankohtina 1, 5, 10, 20 ja 30 vuotta.

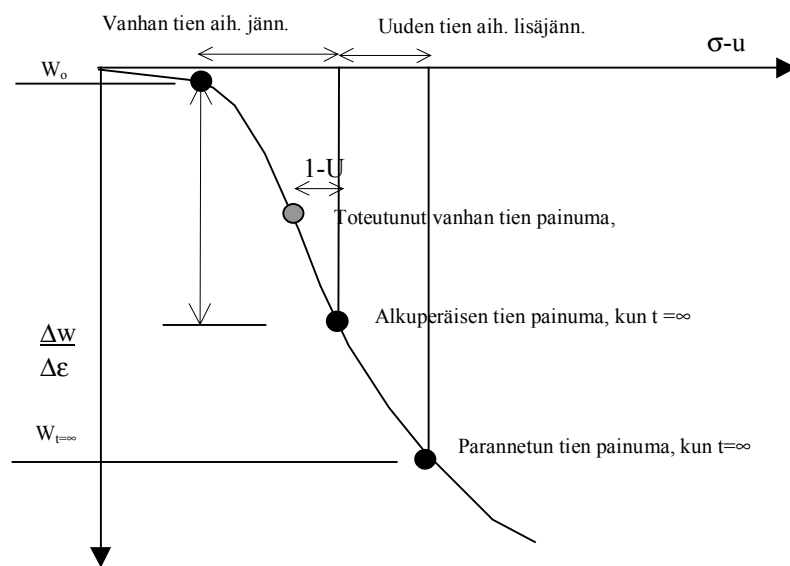
Vanhan tien odotettavissa oleva painuma

Vanhan tien osalta olennaisimpia asioita painuman hallinnassa on se, että tiessä on jo tapahtunut painumaa. Tapahtunut painuma on nähtävissä vesipitoisuuden muutoksena (konsolidoitumisena) maapohjan syvyys- ja poikkisuunnassa. Periaatteessa painuma voidaan

laskea suoraan vanhankin tien osalta (kuten uudella tiellä), jos vanhasta rakenteesta aiheutunut painuma on jo tapahtunut kokonaan.

Pehmeillä savikoilla painumat tapahtuvat kuitenkin niin hitaasti, että usein painumat eivät kuitenkaan ole vielä loppuneet, kun tietä perusparannetaan. Vanhan tien aikaansaaman, vielä tapahtumattoman painuman osuus on tämä takia lisättävä parantamisesta (tason nosto, levittäminen) aiheutuvan lisäpainuman suuruuteen. Tällöin on ratkaistava kussakin pikselissä jäljellä olevan painuman suuruus eli konsolidoitumisaste. Pikselissä jäljellä oleva konsolidoitumisaste ratkaistaan jännitys-kokoonpuristuma (tai vesipitoisuus) -käyrän avulla kuvassa 15 esitetyllä tavalla. Vanhan tien painuma lasketaan tämän jälkeen kuten uudellakin tiellä. Painumaa aiheuttava pystyjännitys korvataan kuitenkin jännityksellä, jonka suuruus on

$$\sigma'_i = (1-U_i) * \sigma_{i, \text{vanhatie}} + \sigma_{i, \text{uusi lisärakenne}} \quad (17)$$



Kuva 15. Pikselissä jäljellä olevan painuman ratkaisu.

4. KIRJALLISUUS

/1/ Länsivaara, T., Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi. Tielaitoksen selvityksiä 44/2000. Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka, Helsinki 2000. TIEL 3200630. 44 s. + liitt. 4s.

/2/ Rekonen, R., Lojander, M. Painumaparametrien vaiheittainen määrittäminen. TKK Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto. Pohjarakennus ja maamekaniikka. Raportti 12.3.1999.

5. LIITTEET

Liite 1. TSARPIX-ohjelman manuaali (Help).

TSARPIX – OHJELMISTON KÄYTTÖOHJE (Tsarpix.chm tulostus)
30.11.2001

Pauli Vepsäläinen
Jonni Takala

TKK RAKENNUS- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN OSASTO
POHJARAKENNUS JA MAAMEKANIikka

SISÄLLYSLUETTELO

1.	TSARPIX2001 LASKENTAOHJELMA	2
2.	TSARPIX-TEORIA	3
	2.1 Painumalaskentamalli	3
	2.2 Painuman laskenta ajan suhteen	5
3.	LÄHTÖARVOJEN LUKEMINEN	9
4.	PARAMETRIT JA GEOMETRIA	10
	4.1 Parametrit	10
	4.2 Yleiset	12
	4.3 Penkat	13
5.	LASKENTA	16
6.	TULOSTUS	17
7.	LÄHTÖTIETOTAULUKOT	18
8.	TSARPIX2001 INFO	19

1. Tsarpix2001 laskentaohjelma

Tsarpix2001 on pikselimallinen tiepenkereiden aika-painuman laskentaohjelma (time-settlement analysis for roads). Tsarpix2001 toimii vain Windows 2000 (service pack 1) ja NT 4 (service pack 6) ympäristössä.

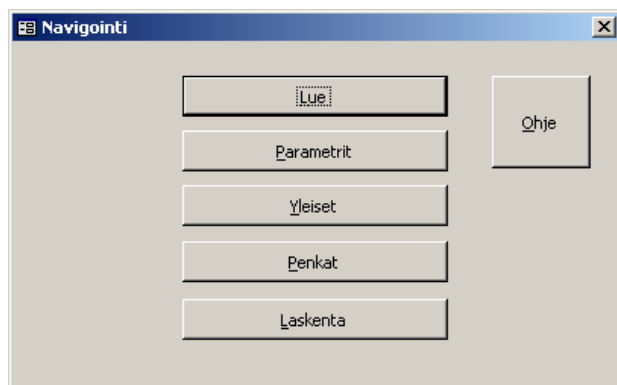
Tsarpix2001 on kehitetty konsolidaatiopainumanopeuden laskentaohjelmasta Tsar (yksiuotteinen konsolidaatio, Terzaghin menetelmä). Tsarpix-ohjelman maastomalli muodostuu tasotapauksessa (tien pituussuunnassa tai tien poikkisuunnassa) pienistä suorakaide-elementeistä eli pikseleistä.

Ohjelman tarvitsemat peruslähöarvot (paalulukemaa ja tasoa vastaava vesipitoisuus) saadaan sähköisellä luotauksella. Sähköisen luotauksen mitattu vastus muunnetaan vesipitoisuudeksi. Mitattu vastus esitetään pikseleinä. Eli pikselikerrosmalli perustuu jatkuvalla sähköisellä vastusmittauksella mitattuihin ominaisvastusarvoihin suorakaiteenmuotoisten pikselien keskipisteissä. Muunnoksessa ominaisvastukset muunnetaan vesipitoisuuksiksi kerroksittain käyttäen hyväksi radiometrisiä mittauksia. Vesipitoisuudesta riippumattomien painumaparametrien, kuten esimerkiksi kuormitus- ja virtausreunaehtojen muodostaminen tehdään tavanomaisen suunnittelukäytännön mukaisesti. Vesipitoisuudesta riippuvat painumaparametrit, kuten kokoonpuristuvuusindeksi ja vedenläpäisevyyskerroin muodostetaan toisessa muunnoksessa.

Tsarpix2001:n laskennan lähtöarvoina luetaan laskettavaa paalulukemaa vastaava maanpinnan taso, pohjavedenpinnan taso, tasausviiva, leikkaustaso, kevennys sekä vesipitoisuus tasokohtaisesti.

Tsarpix2001:n luettavat tiedostot ovat Microsoft Excel-tiedostoja. Ennen laskentaa on tietokantaan luettava kaksi tiedostoa. Ensimmäisessä Excel-tiedostossa ([1. Excel-tiedoston formaatti](#)) on seuraavat tiedot: paalulukema, taso ja vesipitoisuus. Vastaavasti toisessa Excel-tiedostossa ([2. Excel-tiedoston formaatti](#)) on: paalulukema, maanpinnan taso, pohjavedenpinnan taso, tasausviiva, leikkaustaso ja kevennys. Lähtötietojen lisäksi syötetään myös [syöttölomakkeisiin](#) tarvittavat parametrit.

Ohjelmaa käytetään Navigointi-ikkunan avulla etenemällä kontrolli kerrallaan eteenpäin alkaen *Lue-Näppäimestä* ja päättyen *Laskenta-Näppäimeen*.



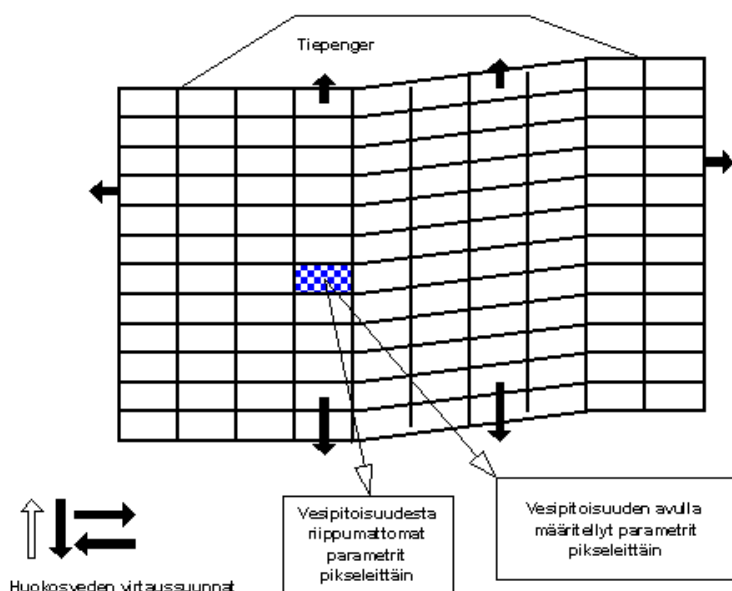
Painumaa voidaan laskea sekä pituussuunnassa että poikkisuunnassa. Yhteen laskentaan voidaan sisällyttää pituussuunnassa useita paalulukemia (max. 1000m, jolloin paalulukemat metrin välein) tai poikkisuunnassa tarkastelupisteitä. Ohjelman tuloste on graafinen ja data-pohjainen.

Tsarpix2001 vaatii toimiakseen sen, että tietokoneessa on asennettuna Microsoft Access2000 (Microsoft Office 2000). Jotta Tsarpix2001 toimisi ilman Microsoft Access 2000:tta, on koneeseen asennettava Access:in runtime-library. Microsoft Office 2000 Developer-versio sisältää kyseisen Access-kirjaston asennusohjelmineen. Kirjasto löytyy myös MS Office 2000 Developer Tools-paketista.

2. Tsarpix-teoria

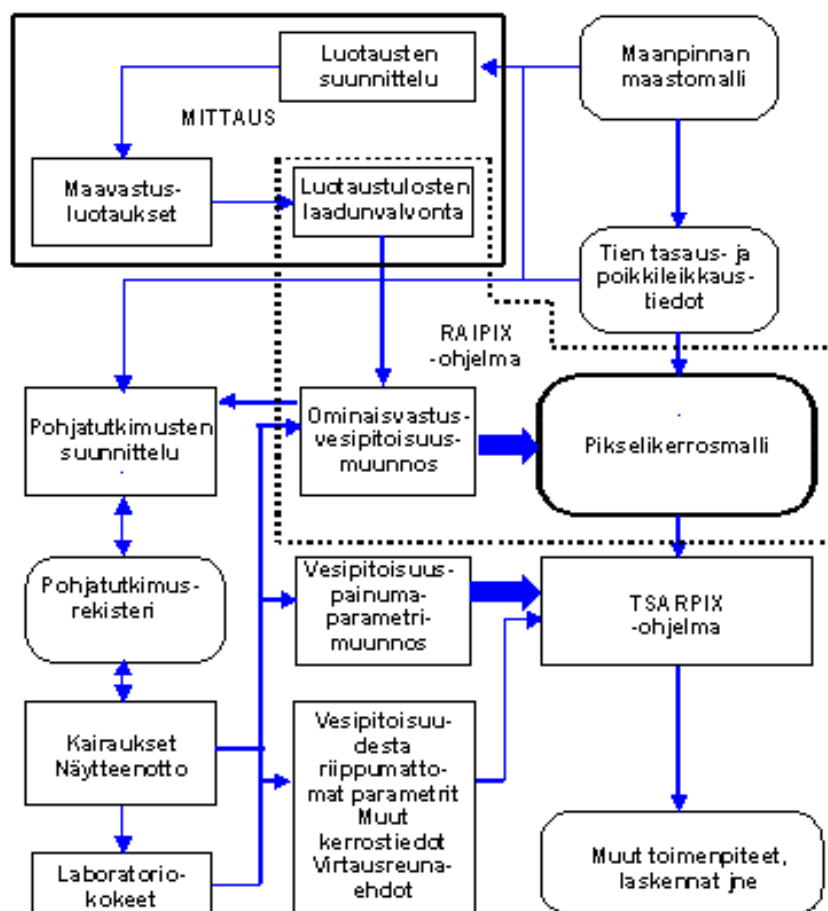
2.1 Painumalaskentamalli

Tässä esitetty painumalaskentamalli perustuu jatkuvan maastomallin muodostamiseen ns. pikselimallina, johon maan ominaisuuksia kuvaavat lähtötiedot saadaan sähköiseen tomodografiaan pohjautuen täydennettynä pohjatutkimuksilla. Maastomalli muodostuu tasotapauksessa (tien pituussuunnassa tai tien poikkisuunnassa) pienistä suorakaide-elementeistä, joiden painumaominaisuuksista osa määritetään suoraan vesipitoisuustomografian avulla. Pikseleistä koostuvan maastomallin periaate on esitetty kuvassa 1.



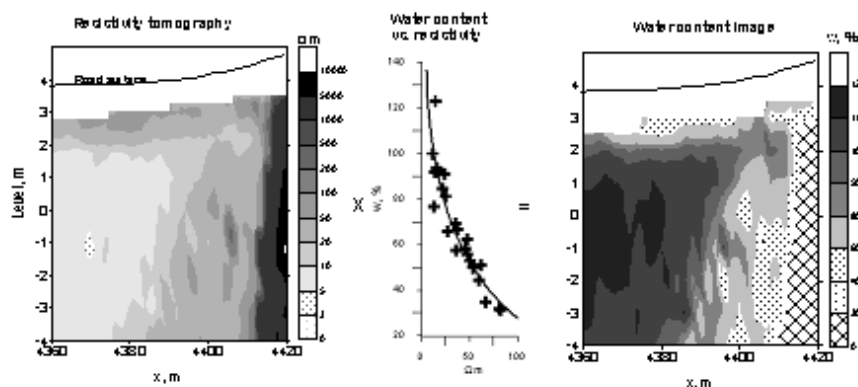
Kuva 1 Pikseleistä koostuvan maastomallin periaate

Kuvassa 2 on esitetty toimintakaavio lähtötietojen muodostamiseksi pikselikerrosmalliin. Kuvasta voidaan havaita, että tavanomaisessa suunnittelukäytännössä tarvittavien lähtötietorekistereiden ja -tiedostojen lisäksi toimintakaavioon kuuluu olennaisina osina muunnokset maavastusluotauksista saatujen ominaisvastusten ja vesipitoisuuksien välillä sekä edelleen muunnokset vesipitoisuusavaruuden ja painumaparametrien välillä. Muiden, vesipitoisuudesta riippumattomien painumaparametrien, kuormitus- ja virtausreunaehtoien jne. muodostaminen tehdään tavanomaisen suunnittelukäytännön mukaisesti.



Kuva 2 Toimintakaavio lähtötietojen muodostamiseksi pikselikerrosmalliin

Pikselikerrosmalli perustuu siis jatkuvalla sähköisellä vastusmittauksella mitattuihin ominaisvastusarvoihin suorakaiteenmuotoisten pikselien (elementtien) keskipisteissä. Ensimmäisessä muunnoksessa ominaisvastukset muunnetaan vesipitoisuuksiksi tarvittaessa kerroksittain käyttäen hyväksi maanäytteistä laboratoriossa määritettyjä pistekohtaisia vesipitoisuuksia ja/tai radiometristen mittausten avulla. Esimerkki muunnoksesta on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Vesipitoisuustomografian määrittäminen

Toisessa muunnoksessa vesipitoisuusarvot muunnetaan pikselien keskipisteissä sellaisiksi aika-painumaparametreiksi, joilla on havaittu hyvä korrelaatio vesipitoisuuden kanssa. Tällaisiksi parametreiksi ovat osoittautuneet kokoonpuristuvuusindeksi C_c ja vedenläpäisevyyskerroin k . Kokoonpuristuvuusindeksille C_c on havaittu sopivan parhaiten lineaarinen yhteys vesipitoisuuden kanssa (RITA-tietokanta):

$$C_c = A (\rho_s w - B)$$

w	on	vesipitoisuus
ρ_s		maan kiintotiheys
A, B		paikka- ja syvyyskohtaisia vakioita

Vedenläpäisevyyskerroimen k funktionaalisia yhteyksiä tutkitaan edelleen RITA-tietokannan kehitystyössä. Jäljempänä esitettyjen sovellusten yhteydessä vedenläpäisevyyskerroimelle on käytetty samantyyppistä lineaarista yhteyttä kuin kokoonpuristuvuusindeksillekin.

Muita painumalaskelmissa tarvittavia vesipitoisuudesta riippuvia parametreja ovat tehokas tilavuuspaino γ' ja alkuhuokosluku e_0 , joille on olemassa yleisesti tunnetut yhteydet vesipitoisuuden kanssa vedellä kyllästyneessä maassa.

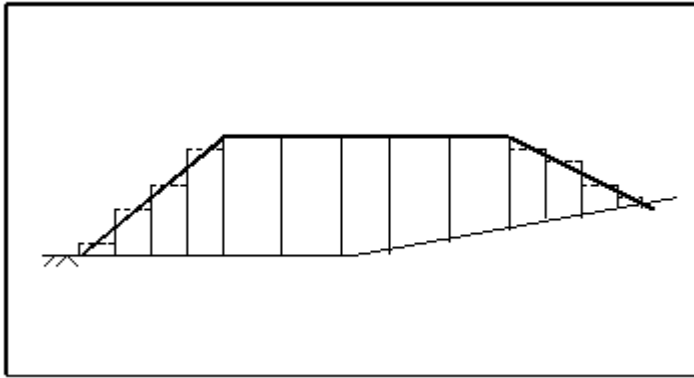
Vesipitoisuudesta riippumattomat painumaparametrit, tärkeimpänä esikonsolidaatiopaine σ_c , määritetään ödometrikokeiden perusteella kunkin pikselin keskikohdalla manuaalisesti. Reunaehdot laskelmia varten määritetään samoin manuaalisesti.

Pikselikerrosmallin käytännöllistä soveltamista varten tien pituussuunnassa on laadittu oikeiden toimintamalli:

- 1) Kohteesta tarvitaan EXCEL-tiedostoja, jotka sisältävät paalukohtaisesti tien pituussuunnassa pikselien korkeustaso- ja vesipitoisuustiedot.
- 2) Korkeustaso- ja vesipitoisuustiedot järjestetään paaluittain erillisiin EXCEL-tiedostoihin, lasketaan pikselikerrosrajat sekä tehdään tarpeelliset korjaukset ja lisäykset maanpinnan ja pohjavedenpinnan välisiin pikselitietoihin. Paalukohtaiset kerrosrajatiedot siirretään sen jälkeen EXCEL-tiedostoista ohjelman TSARPIX datatiedostoon ohjelman vaatimassa formaatissa.
- 3) Em. paalukohtaisten erillisten EXCEL-tiedostojen vesipitoisuusarvot muunnetaan laaditun EXCEL-ohjelman avulla vesipitoisuudesta riippuviksi painumaparametreiksi γ' , e_0 , C_c ja k sekä edelleen ohjelman TSARPIX käyttämiksi tangenttimoduulimenetelmän parametreiksi m_1 , β_1 (normaalikonsolidoituneella alueella) ja konsolidaatiokerroimeksi c_v (normaalikonsolidoituneella alueella). Ylikonsolidoituneen osan vastaavat parametrit ohjelma määrittää itse sisäänsyötetyistä oletusarvoista.

2.2 Painuman laskenta ajan suhteen

Penkereestä maapohjaan vaikuttava nettokuorma määritellään pengerkuorman muotoisena, jakautuneena pystysuorana pintakuormana, joka ulottuu tien pituussuunnassa hyvin kauaksi. Laskentatarkkuuden parantamiseksi epätasainen jakautunut kuorma jaetaan kuorman vaihtusalueella 32:een tasan jakautuneeseen osakuormaan, periaate kuvassa 4.



Kuva 4 Epätasaisen pengerkuorman jakaminen tasan jakautuneisiin osakuormiin, periaate.

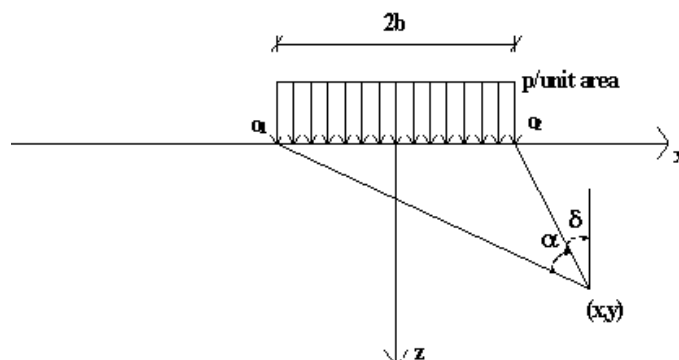
Kustakin osakuormasta maapohjaan aiheutuva pystyjännityslisäys lasketaan Boussinesqin teoriaan pohjautuen oheisen nauhamaisen pintakuorman ratkaisua käyttäen (kuva 5).

$$\Delta\sigma_z = \frac{p}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos(\alpha + 2\delta)]$$

$\Delta\sigma_z$
(x,y)
p

osakuormasta aiheutuva lisäpystyjännitys pisteessä

osakuorman suuruus



Kuva 5 Osakuormasta aiheutuvan pystyjännityksen laskenta, merkinnät.

Koko pengerkuormasta aiheutuva lisäjännitys pisteessä (x,y) saadaan summaamalla osakuormista aiheutuvat jännitykset.

Pystymuodonmuutos ε_z pikselien keskipisteessä lasketaan Suomessa yleisesti käytetyn Ohde-Janbun tangenttimoduulimenetelmän mukaisesti.

Normaalikonsolidoitunut alue:

$$\varepsilon_{z1}(t) = \frac{1}{m_1} \ln \left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma_z'(t)}{\sigma_c} \right)$$

$$\sigma_0 + \Delta\sigma_z'(t) \geq \sigma_c \quad (\beta_1 = 0)$$

Ylikonsolidoitunut alue:

$$\varepsilon_{z2}(t) = \frac{\Delta\sigma_z'(t)}{m_2 \sigma_v}$$

$$\Delta\sigma_z'(t) \leq \sigma_c - \sigma_0 \quad \sigma_v = 100 \text{ kPa} \quad (\beta_2 = 1.0)$$

$$\varepsilon_z(t) = \varepsilon_{z1}(t) + \varepsilon_{z2}(t)$$

σ_0	tehokas alkujännitystila pystysuunnassa
σ_c	tehokas esikonsolidaatiopaine
$\Delta\sigma_z'(t)$	tehokas pystyjännityksen lisäys ajanhetkellä t
z	syvyys kuormituspinnasta

Moduuliluvut m_1 lasketaan seuraavasti:

$$m_1 = \ln 10 (1 + e_0) / C_c$$

Moduuliluvulla m_2 on sisään syötetty arvo:

$$m_2 = 50$$

Tehokas pystyjännityksen lisäys $\Delta\sigma_z'(t)$ lasketaan tehokkaiden jännitysten periaatteen mukaisesti:

$$\Delta\sigma_z'(t) = \Delta\sigma_z - \Delta u(t)$$

$\Delta\sigma_z$ pengerkuormasta aiheutuva pystysuora jännityslisäys

$\Delta u(t)$ huokosylipaine ajanhetkellä t

Huokosylipaineen $\Delta u(t)$ laskenta ajanhetkellä t perustuu Terzaghin yksiulotteiseen konsolidaatioteoriaan, joka esitetään seuraavalla differentiaaliyhtälöllä:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial t}$$

c_v konsolidaatiokerroin pystysuunnassa

Eo. yhtälön jälkimmäisellä termillä otetaan huomioon muuttuva kuormahistoria.

Differentiaaliyhtälö ratkaistaan numeerisesti elementtimenetelmällä, jolloin ratkaisu sisältää maa-alkioiden käyttäytymisen sekä normaali- että ylikonsolidoituneilla alueilla. Ohjelma TSARPIX muodostaa elementtiverkon automaattisesti siten, että kukin pikseli jaetaan viiteen elementtiin pystysuunnassa. Tällä parannetaan tuloksen tarkkuutta sekä estetään laskentatulosten oskillointi pienillä aika-arvoilla. Numeerinen aikaintegrointi perustuu implisiittiseen menetelmään.

Ohjelman tarvitsemat reunaehdot annetaan manuaalisesti. Reunaehtotyypit ovat huokosveden ylipaine ja/tai huokosveden virtaamanopeus.

Ratkaisua varten tarvittava huokosveden ylipaineen alkuehto ajanhetkellä $t = 0$:

$$\Delta u(t = 0) = \Delta\sigma_z$$

Pystysuuntainen konsolidaatiokerroin c_v normaalikonsolidoituneella osalla ja konsolidaatiokerroin c_{v2} ylikonsolidoituneella osalla lasketaan seuraavasti:

$$c_v = k m_1 \sigma_z' / \gamma_w$$

$$\sigma_z' = \sigma_0' + \Delta\sigma_z'(t) > \sigma_c$$

$$c_{v2} = 10 k m_2, \quad \sigma_z' \leq \sigma_c$$

σ_z'	on tehokas kokonaisjännitys pystysuunnassa ajan hetkellä t
σ_0'	tehokas vallitseva alkujännitys pystysuunnassa
$\Delta\sigma_z'(t)$	tehokas pystyjännityslisäys ajan hetkellä t aikainkrementin alussa
γ_w	veden tilavuuspaino
k	vedenläpäisevyyskerroin
m_1	moduuliluku, normaalikonsolidoitunut alue
m_2	moduuliluku, ylikonsolidoitunut alue

Kun elementtikohtaiset muodonmuutokset $\varepsilon_z(t)$ ajanhetkellä t on laskettu, saadaan pikselikohtaiset muodonmuutokset seuraavasti:

$$\varepsilon_j(t) = \sum_{e=1}^n \varepsilon_e(t)$$

n on elementtien lukumäärä pikselissä (= 5)

Painuma S(t) ajanhetkellä t saadaan tämän jälkeen summaamalla pikselien kokoonpuristuminen koko pikselipinon osalta:

$$S(t) = \sum_{j=1}^m h_j \varepsilon_j(t)$$

m on pikselien lukumäärä pikselipinossa

3. Lähtöarvojen lukeminen

Lähtöarvoina luetaan ensiksi paalulukema, taso ja vesipitoisuus excel-tiedostosta ([Excel-tiedoston formaatti](#)). Lähtöarvot luetaan vain kerran, jonka jälkeen ne ovat käytössä jatkossa. Luonnollisesti uuden kohteen lähtöarvot joudutaan lukemaan uudestaan.

Valitaan [Navigointi-ikkunasta](#) *Lue-näppäin*. [Lue data-lomakkeessa](#) valitaan selaamalla haluttu tiedosto *Selaa vesipitoisuus-näppäimellä*. Luenta käynnistetään *Lue vesipitoisuus-näppäimellä*. Luennan voi keskeyttää *Keskeytä-näppäimellä*. Tiedoston suuruudesta johtuen luenta voi kestää useita minuutteja. Progressiopalkki kuvaa luennan edistymistä. Myös kulunut aika näytetään.

Seuraavaksi luetaan paalulukemakohtaisesti maanpinnan taso, pohjavedenpinnan taso, taseausviiva, leikkaustaso ja kevennys excel-tiedostosta ([Excel-tiedoston formaatti](#)). Lähtöarvot luetaan vain kerran, jonka jälkeen ne ovat käytössä jatkossa. Luonnollisesti uuden kohteen lähtöarvot joudutaan lukemaan uudestaan.

Valitaan [Lue data-lomakkeessa](#) *Lue Raipix-näppäin*. Valitaan selaamalla haluttu tiedosto *Selaa-näppäimellä*. Luenta käynnistetään *Lue-näppäimellä*. Luennan voi keskeyttää *Keskeytä-näppäimellä*. Progressiopalkki kuvaa luennan edistymistä.

Jokaisessa lomakkeessa on *Ohje-näppäin*. Nuolinäppäimellä siirrytään seuraavaan lomakkeeseen. Takaisin alkuvalikkoon pääsee *Alkuvalikkoon-näppäimellä*.

4. Parametrit ja geometria

Parametrit ja geometriatiedot syötetään [Parametrit-, Yleiset- ja Penkat-lomakkeissa](#).
Reunaehdot, kuormahistoria ja aika syötetään [Yleiset-lomakkeessa](#).
Lomakesyöttö on esitetty tarkemmin otsikon ”Parametrit ja geometria” alla.

4.1 Parametrit

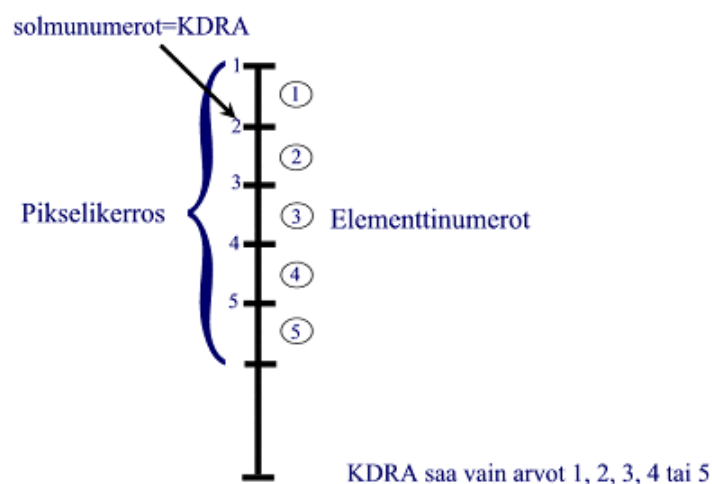
[Parametrit-lomake](#) käynnistetään [Navigointi-ikkunasta](#). Lomakkeessa syötetään ohjelman tarvitsemat parametritiedot.

Otsikkokenttään syötetään laskennan otsikko.
Kiintotiheys annetaan sitä vastaavaan kenttään.
Ylimmän tason vesipitoisuus annetaan manuaalisesti vesipitoisuuskenttään. Oletusarvo on 20 [%].
Vedenläpäisevyyskerroin k (a_p ja b_p) syötetään kenttiin a_b ja b_p .
Kokoonpuristuvuusindeksi C_c syötetään kenttiin A , B , $C = C_{c \min}$

Ylikonsolidoituneet kerrokset annetaan haluttuihin kerroksiin taulukkona *YK-kerrokset sekä vettä johtavat ohuet kerrokset-painiketta* painamalla. Painike on aktiivinen vasta ensimmäisen laskennan jälkeen, mutta varsinaisen laskennan käynnistyttyä annetaan myös mahdollisuus muuttaa arvoja.

	Nro	Paalulukema	Taso	YK	kdra
▶	1	4680.	6.5	0.	0
	2	4680.	6.13	0.	0
	3	4680.	5.75	0.	0
	4	4680.	5.5	0.	0
	5	4680.	5.25	0.	0
	6	4680.	4.75	0.	0
	7	4680.	4.25	0.	0
	8	4680.	3.75	0.	0
	9	4680.	3.25	0.	0
	10	4680.	2.75	0.	0
	11	4680.	2.25	0.	0
	12	4680.	1.75	0.	0
	13	4680.	1.25	0.	0
	14	4680.	0.75	0.	0
	15	4680.	0.25	0.	0

Vettä johtavat ohuet kerrokset (kdra =1,2,3,4 tai 5) annetaan haluttuihin kerroksiin taulukkona YK-kerrokset sekä vettä johtavat ohuet kerrokset-painiketta painamalla. Painike on aktiivinen vasta ensimmäisen laskennan jälkeen, mutta varsinaisen laskennan käynnistyttyä annetaan myös mahdollisuus muuttaa arvoja. Seuraavassa kuvassa on esitetty periaate.



Maanpinta, Pohjavedenpinta, Tasausviiva, Leikkaustaso ja Kevennys – painike avaa taulukon, josta voidaan editoida kyseisiä parametreja paalulukemakohtaisesti. Kevennyksessä positiivinen arvo on kevennystä ja negatiivinen arvo on painon lisäämistä.

Raipix : Table						
	Paalulukema	Maanpinta	Pohjavedenpinta	Tasausviiva	Leikkaustaso	Kevennys
▶	15050	32.93999863	31	34.88499832	32.73999863	0
	15051	32.89999771	31	34.85649872	32.69999771	0
	15052	32.86000061	31	34.82799911	32.66000061	0
	15053	32.81999969	31	34.79949951	32.61999969	0
	15054	32.77999878	31	34.77099991	32.57999878	0
	15055	32.73999786	31	34.74250031	32.53999786	0
	15056	32.69999695	31	34.71399689	32.49999695	0
	15057	32.65999985	31	34.68549728	32.45999985	0
	15058	32.61999893	31	34.65699768	32.41999893	0
	15059	32.57999802	31	34.62849808	32.37999802	0
	15060	32.54000092	31	34.59999847	32.34000092	0
	15061	32.5	31	34.57449722	32.3	0
	15062	32.45999908	31	34.54899979	32.25999908	0
	15063	31.59000015	31	34.52349854	31.39000015	0

Record: 1 of 161

Jokaisessa lomakkeessa on *Ohje-näppäin*.
Nuolinäppäimillä siirytään edelliseen tai seuraavaan lomakkeeseen.
Takaisin alkuvalikkoon pääsee *Alkuvalikkoon-näppäimellä*.

4.2 Yleiset

[Yleiset-lomake](#) käynnistetään [Navigointi-ikkunasta](#). Lomakkeessa syötetään ohjelman tarvitsemat reunaehdot, kuormahistoria ja aika.

Yläreunan reunaehtotyyppi:

Vapaa virtaus

Huokosylipaine, yläreuna:

0

Alareunan reunaehtotyyppi:

Vapaa virtaus

Huokosylipaine, alareuna:

0

Kuormahistoriatyyppi:

Standardi

Kuormahistoria-aikojen lukumäärä:

2

Tarkkuutta lisäävä aikajako:

2

Konsolidaatioaika

Aika ja kuormasuhde

Ohje

←

Takaisin alkuvalikkoon

→

Yläreunan ja alareunan reunaehtotyyppi valitaan reunaehtokentästä joko vapaa virtaus tai vettä läpäisemätön reuna.

Huokosylipaine ylä- ja alareunassa syötetään vastaaviin kenttiin [kPa].

Kuormahistoriatyyppi valitaan kentästä joko standardiksi tai muuttuvaksi.
(Huom! muuttuvan historian tapauksessa kuormahistoria-aikojen lkm >3).

Kuormahistoria-aikojen lukumäärä (2,3...) syötetään sitä vastaavaan kenttään.
(Kuormahistoria-aikojen lkm = 2, kun rakentamisaika = 0 ja kuormahistoria-aikojen lkm>3, kun kuormahistoriatyyppi on muuttuva).Kuormahistoria-aikoja voi olla 10.

Aikajako annetaan kenttään Tarkkuutta lisäävä aikajako.

[Konsolidaatioaika](#) syötetään valitsemalla *konsolidaatioaika-näppäin* ja antamalla sitten ajan järjestysnumero ja sitä vastaava konsolidaatioaika [v] (Max 10 kpl).

Taulukosta poistettaessa haluttuja aikoja valitaan hiiren vasemmalla näppäimellä kyseisen rivin alunappi, jolloin rivin alkuun ilmestyy pysyvä nuolen kuva ja rivi tummenee. Tämän jälkeen painetaan näppäimistöä delete-näppäintä ja vahvistetaan rivin poistaminen painamalla Yes.

[Aika ja kuormasuhde](#) syötetään valitsemalla *Aika ja Kuormasuhde-näppäin* ja antamalla sitten aika ja sitä vastaava kuormasuhde taulukkoon (Max 10 kpl).

Taulukosta poistettaessa haluttuja aikoja valitaan hiiren vasemmalla näppäimellä kyseisen rivin alunappi, jolloin rivin alkuun ilmestyy pysyvä nuolen kuva ja rivi tummenee. Tämän jälkeen painetaan näppäimistöä delete-näppäintä ja vahvistetaan rivin poistaminen painamalla Yes.

Jokaisessa lomakkeessa on *Ohje-näppäin*.

Takaisin alkuvalikkoon pääsee *Alkuvalikkoon-näppäimellä*.

Lomakkeen nuolinäppäimillä voi liikkua edelliseen tai seuraavaan lomakkeeseen.

4.3 Penkat

[Penkat-lomake](#) käynnistetään [Navigointi-ikkunasta](#). Lomakkeessa syötetään ohjelman tarvitsemat geometriatiedot, laskentasuunta ja laskentaetäisyydet.

Penkereen keskilinjän x-koordinaatin oletusarvo on nolla.

Penkereen yläosan leveys [m] ja luiskien kaltevuudet [1:N] syötetään vastaaviin kenttiin.

Pengermassan tilavuuspaino syötetään tilavuuspainokenttään [kN/m^3].

Laskentasuunta valitaan Pituussuunta- tai Poikkisuuntaoptiolla.

Pituussuunnassa laskettaessa huomioidaan vain laskentalinjan etäisyys tiepenkereen keskilinjasta (- vasen ja + oikea).

Pituussuuntainen laskenta:

The screenshot shows a software window titled "Penkat". It contains several input fields and a section for calculation parameters.

Field Label	Value
Penkenreen keskilinjän X-koordinaatti:	0
Penkereen yläosan leveys:	7.2
Penkereen vasemman luiskan kaltevuus 1:N:	3
Penkereen oikean luiskan kaltevuus 1:N:	3
Pengermassan tilavuuspaino:	20

Laskentapistetiedot:

☒ Pituussuunnassa ☐ Poikkisuunnassa

Field Label	Value
Laskentalinjan etäisyys tiepenkereen keskilinjasta -vasemmalle, +oikealle:	0
Laskentapoikkileikkauksen paalulukema:	15050
Laskentaetäisyys keskilinjasta vasemmalle (pos.):	15
Laskentaetäisyys keskilinjasta oikealle:	15
Laskentapisteväli:	5
Pinon järjestysnumero tasausviivan kohdalla:	3

Buttons: Ohje, ←, Takaisin alkuvalikkoon, →

Poikkisuunnassa laskettaessa valitaan ensiksi pikselipinokentästä pikselipinojen suunta: pituussuunta tai poikkisuunta. Tämän jälkeen valitaan laskentapoikkileikkauksen paalulukema. Valittu paalulukema on automaattisesti valittuna Laskenta-lomakkeessa.

Laskentaetäisyydet [m] keskilinjasta syötetään niitä vastaaviin kenttiin. Valittaessa laskentaetäisyyksiä tulee huomioida se, että kokonaisetäisyys (välimatka vasemmalta oikealle) olisi tasan jaollinen laskentapistevälillä.

Laskentapisteväli jakaa laskentaetäisyydet tutkittaviin pisteisiin. Esim. Jos laskentaetäisyys on keskilinjasta vasempaan 15m ja oikeaan 15m, on kokonaisetäisyys 30m. Eli tässä tapauksessa laskentapistevälin ollessa 5m, tarkastellaan 7 pistettä (Huom! laskentapisteväli ei saa olla nolla). Kun pikselipinot ovat poikkisuunnassa, syötetään lisäksi pinon järjestysnumero tasausviivan kohdalla.

Poikkisuuntainen laskenta (pikselipinot pituussuunnassa):

Penkat	
Penkeen keskilinjän X-koordinaatti:	0
Penkeen yläosan leveys:	7.2
Penkeen vasemman luiskan kaltevuus 1:N:	3
Penkeen oikean luiskan kaltevuus 1:N:	3
Pengermassan tilavuuspaino:	20
Laskentapistetiedot:	
☐ Pituussuunnassa	☒ Poikkisuunnassa
	Pikselipinot pituussuunnassa
Laskentalinjan etäisyys tiepenkeen keskilinjasta -vasemmalle, +oikealle:	0
Laskentapoikkileikkauksen paalulukema:	15050
Laskentaetäisyys keskilinjasta vasemmalle (pos.):	15
Laskentaetäisyys keskilinjasta oikealle:	15
Laskentapisteväli:	5
Pinon järjestysnumero tasausviivan kohdalla:	3
Ohje	
← Iäkaisin alkuvalikkoon →	

Poikkisuuntainen laskenta (pikselipinot poikkisuunnassa):

The screenshot shows a software window titled "Penkat". It contains several input fields and a section for calculation settings.

Field Label	Value
Penkenreen keskilinjän X-koordinaatti:	0
Penkereen yläosan leveys:	7.2
Penkereen vasemman luiskan kaltevuus 1:N:	3
Penkereen oikean luiskan kaltevuus 1:N:	3
Pengermassan tilavuuspaino:	20

Laskentapistetiedot:

☐ Pituussuunnassa ☒ Poikkisuunnassa

Pikselipinot poikkisuunnassa

Field Label	Value
Laskentalinjan etäisyys tiepenkereen keskilinjasta -vasemmalle, +oikealle:	0
Laskentapoikkileikkauksen paalulukema:	15050
Laskentaetäisyys keskilinjasta vasemmalle (pos.):	15
Laskentaetäisyys keskilinjasta oikealle:	15
Laskentapisteväli:	5
Pinon järjestysnumero tasausviivan kohdalla:	3

Ohje

← Takaisin alkuvalikkoon →

Jokaisessa lomakkeessa on *Ohje-näppäin*.
Nuolinäppäimillä siirrytään edelliseen tai seuraavaan lomakkeeseen.
Takaisin alkuvalikkoon pääsee *Alkuvalikkoon-näppäimellä*.

5. Laskenta

Laskenta suoritetaan parametrien ja lähtötietojen syötön jälkeen [Laskenta-lomakkeessa](#).
Tarvittaessa tyhjennetään paalulukemataulukko *Tyhjennä kaikki paalulukemat-näppäimellä*.
Tämän jälkeen valitaan laskettavat paalulukemat. Paalulukemat voidaan valita myös automaattisesti alkaen ensimmäisestä valitusta paalulukemasta antamalla kenttään haluttu paalulukemäärä metrin välein ja painamalla *Automaattinen paalulukemamäärä-näppäintä*. Poikkisuunnassa laskettaessa tutkittava paalulukema on valittuna automaattisesti eli manuaalista syöttöä ei tarvita. Tarkista poikkeama keskilinjasta [Penkat-lomakkeesta](#) (huomioidaan vain pituussuuntaan laskettaessa).

Paalulukema	Lasketaan
15050	☒
15051	☐
15052	☐
15053	☐
15054	☐
15055	☐
15056	☐
15057	☐
15058	☐
15059	☐
15060	☐
15061	☐

Automaattisen paalulukemamäärän lukumäärä. -> Alkaen ensimmäisestä valitusta paalulukemasta.

Buttons: Laske, Laskentatulokset, Graafinen tulostus (Aika - Painuma), Graafinen tulostus (Paalulukema - Painuma), Tyhjennä kaikki paalulukemat, Ohje, Automaattinen paalulukemamäärä, Keskeytä, Takaisin alkuvalikkoon.

Laskenta aloitetaan painamalla *Laske-näppäintä*. Laskennan käynnistyttyä annetaan mahdollisuus vielä muuttaa tai lisätä YK- tai ohuita vettä läpäisevien kerroksien arvoja. Laskennan edistyminen esitetään progressiopalkkina. Pituussuuntaan laskettaessa on mahdollista sisällyttää tuhat paalulukemaa yhteen laskentaan. Poikkisuunnassa tutkitaan yhtä paalulukemaa. Laskenta voi kestää useita minuutteja riippuen paalulukemamäärästä ja luonnollisesti tietokoneen laskentatehosta. Laskenta voidaan keskeyttää painamalla *Keskeytä-näppäintä*, kun se on aktiivinen.

Laskenta voidaan [tulostaa](#) graafisena (Aika - Painuma ja Paalulukema - Painuma [ks. kuva](#)) tai data-pohjaisena. Tuloste voidaan tallentaa tai printata.

Jokaisessa lomakkeessa on *Ohje-näppäin*.

Nuolinäppäimellä siirrytään edelliseen lomakkeeseen.

Takaisin alkuvalikkoon pääsee *Alkuvalikkoon-näppäimellä*.

6. Tulostus

Laskennan voi tulostaa sekä graafisena ([ks. kuva](#)) että datana. Tulostaminen suoritetaan [Laskenta-lomakkeen](#) kontrolleista: *Lasketatulokset-näppäin* ja *Graafinen tulostus (Aika - Painuma ja Paalulukema - Painuma) näppäimet*. Tulostaminen on mahdollista, kun laskentavaihe on suoritettu. Viimeisen laskennan graafinen tulos jää aina muistiin.

Haluttaessa tutkia datapohjaisesti laskennan tulosta painetaan *Lasketatulokset-näppäintä*. Tulosteesta selviää numeerisesti sekä laskennan lähtötiedot että painumalaskennan edistyminen välivaihetietoineen. Tulosteen voi tallentaa txt-formaatissa tai printata.

Haluttaessa tutkia graafisesti laskennan tulosta painetaan *Graafinen tulostus-näppäintä* (Aika - Painuma tai Paalulukema - Painuma). Samaan graafiseen tulostukseen sisällytetään

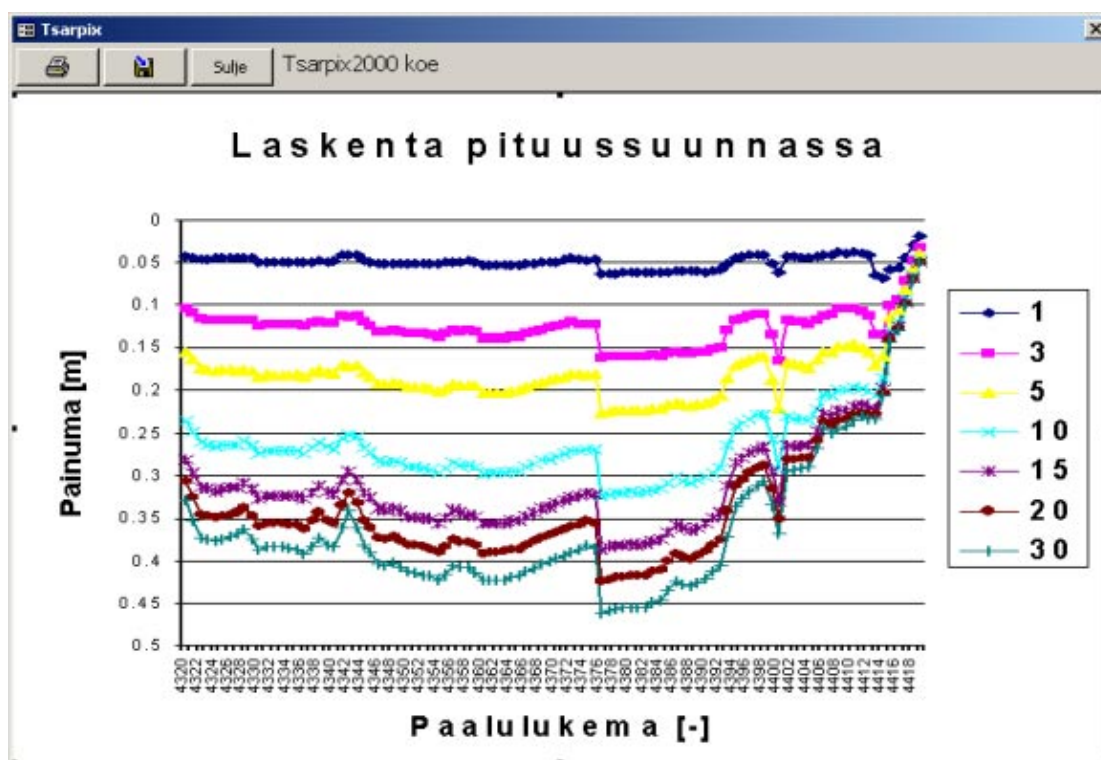
useita kuvaajia. Kuvaajat erotellaan toisistaan värein ja erottelumerkein. Otsikko on graafisen tulosteikkunan yläpalkissa. Kuvaajan selostus on oikealla (Konsolidaatioaika tai paalulukema). Poikkisuuntaisessa laskennassa tulostetaan lasketun paalulukeman ja siitä [laskentapistevälien](#) etäisyyksillä olevien pisteiden painumat. Pituussuuntaisessa laskennassa tulostetaan laskettujen paalulukemien painumat eri konsolidaatioajoilla.

Graafinen tulostus voidaan tallentaa tai printata painamalla vastaavia näppäimiä yläpalkissa.

Tulostelomake suljetaan painamalla *Sulje*-näppäintä.

Jokaisessa lomakkeessa on *Ohje-Näppäin*.

Graafinen tulostus (paalulukema – painuma) on esitetty seuraavassa pituussuuntaisen laskennan tulostuskuvassa.



7. Lähtötietotaulukot

Taulukot, jotka avautuvat Yleiset-lomakkeesta.

Konsolidaatioaikojen sekä ajan ja kuormasuhteen antaminen.

Taulukko 1. Konsolidaatioaika

Konsolidaatioaika	
Järjestysnumero	Aika
1	1
2	3
3	5
4	10

Taulukko 2. Aika ja Kuormasuhde

Aika ja kuormasuhde	
Aika	Kuormasuhde
1	1
50	1
0	0

Lähtötietoina annettavan 1. excel-tiedoston (paalulukema, taso ja vesipitoisuus) muoto.

Otsikko

PL	Taso	w, %
4205	2	46.8781
4205	1.5	47.8178
4205	1	47.7935
4205	0.5	48.7339
4205	0	47.8178
4206	2	49.977
4206	1.5	50.9167
4206	1	51.8564
4206	0.5	52.7961
4206	0	53.7358
4207	2	50.3847
4207	1.5	48.7339
4207	1	47.7935
4207	0.5	48.7332
4207	0	49.6729

jne.

Huom!

Tiedostossa tulee kaksi ensimmäistä riviä varata
otsikolle ja parametreille, jotta kaikki paalulukemat tulisi luettua!

Lähtötietoina annettavan 2. excel- tiedoston (paalulukema, maanpinta, pohjavedenpinta, ta-
sausviiva, leikkaustaso ja kevennys) muoto

Tsarpix Koe

PL	MP	GW	TSV	Leikkaustaso	Kevennys
4201	6	2.25	6	5	1
4202	6	2.25	6	5	1
4203	6	2.25	6	5	1

jne.

Huom!

Tiedostossa tulee kaksi ensimmäistä riviä varata
otsikolle ja parametreille, jotta kaikki paalulukemat tulisi luettua!

8. Tsarpix2001 Info

Versio 3.0

Ohjelmointi Pauli Vepsäläinen & Jonni Takala

1.10.2001

Pauli.Vepsalainen@hut.fi

Jonni.Takala@hut.fi

<http://www.hut.fi/Yksikot/Rakennus/Pohja/>

Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus

TPPT Menetelmäkuvaukset

TPPT *Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus*

Nro

- 17 Kuormituskestävyysmitoitus. Päällysrakenteen väsyminen
- 18 Tierakenteen routamitoitus
- 19 Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pikselimallilla
- 20 Päällysrakenteen elinkaarikustannusanalyysi
- 21 Tierakenteen mitoituksen lähtötietojen hankkiminen

TPPT *Menetelmäkuvaukset*

Nro

- 1 Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus)
- 2 Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta
- 3 Liikennesuunnitelman laskeminen
- 4 Ilmastorasitus. Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituuden määrittäminen
- 5 Roudan syvyyden määrittäminen
- 6 Routanousukoe. Routimiskertoimen (SP) kokeellinen määrittäminen
- 7 Routimiskertoimen määrittäminen
- 8 Lämmönjohtavuuden määrittäminen
- 9 Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa
- 10 Radiometrinen reikämittaus
- 11 CPTU - kairaus
- 12 Läpäisevän kerroksen määrittäminen painumalaskennan tarpeisiin
- 13 Tien rakennekerrostutkimukset
- 14 Routanousun ja painuman mittaus
- 15 Tien vauriokartoitus ja vaurioiden kuvaus
- 16 Palvelutasomittaus (PTM) tien rakenteen parantamisen suunnittelussa