



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO SAUNI
RADAN KUORMITUSKESTÄVYYDEN ARVIOINTI TIEDON-
LOUHINTAMENETELMILLÄ

Diplomityö

Tarkastajat: DI Heikki Luomala ja
professori Esko Turunen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
26. maaliskuuta 2018

TIIVISTELMÄ

MIKKO SAUNI: Radan kuormituskestävyyden arviointi tiedonlouhintamenetelmällä

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 137 sivua, 100 liitesivua

Kesäkuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Infrarakenteet

Tarkastajat: DI Heikki Luomala ja professori Esko Turunen

Avainsanat: rautatie, kuormituskestävyys, tiedonlouhinta, radan geometrian heikkeneminen

Radan kuormituskestävyydellä kuvataan radan rakennekokonaisuuden kykyä vastustaa toistuvasta kuormituksesta johtuvia pysyviä muodonmuutoksia. Radan kuormituskestävyydelle ei ole vakiintunutta määritelmää tai yksikköä, eikä siihen vaikuttavista tekijöistä tai niiden välisistä vaikutussuhteista ole paljon tietoa. Radasta on paljon mittausdataa, joka kuvaa erilaisia ominaisuuksia radan rakenteista. Dataa on vaikea tulkita ihmisvoimin sen määrän ja monimutkaisten vaikutussuhteiden vuoksi. Tässä diplomityössä radan mitauksista kertynyttä dataa on käytetty tiedonlouhinnassa radan kuormituskestävyyteen vaikuttavien tekijöiden selvittämiseksi.

Tässä diplomityössä käytetty GUHA-tiedonlouhintamenetelmä tuottaa hypoteeseja, joita syötetty data tukee. GUHA on deskriptiivinen menetelmä, eli se kuvailee siihen syötettyä dataa, muttei tee siitä johtopäätöksiä tai ennustuksia. Hypoteesit ovat väittämiä tekijöiden vaikutussuhteista ja ne perustuvat säännönmukaisuuksiin datassa.

Tiedonlouhinnassa radan kuormituskestävyyden indikaattorina käytettiin radan geometrian heikkenemisnopeutta. Geometrian heikkenemisnopeus perustuu radantarkastusmittausten korkeuspoikkeamasta lasketun tunnusluvun vuosittaiseen kasvuun. Suuri geometrian heikkeneminen viittaa huonoon ja pieni geometrian heikkeneminen hyvään kuormituskestävyyteen.

Tiedonlouhintoja tehtiin kahdesta tutkimuskohteesta: Karjaa–Ervellä-väliltä ja Kouvola–Kotka-rataosalta. Tiedonlouhinnan perusteella tietyillä ominaisuuksilla, kuten suurella kosteudella ja taipuman varianssilla, on havaittu olevan vahvempi yhteys suureen geometrian heikkenemiseen kuin toisilla. Kaikilla ominaisuuksilla on kuitenkin jokin yhteys kaiken suuruiseen geometrian heikkenemiseen. Yleisluonteinen tulos tiedonlouhinnasta on se, ettei yksi haitallinen ominaisuus saa muuten hyvää rakennetta huonoksi, eikä yksi hyvä ominaisuus saa muuten huonoa rakennetta hyväksi.

Tiedonlouhinnan potentiaali on merkittävä. Tässä diplomityössä tehty tiedonlouhinta keskittyy maarakenteiden vaikutuksiin radan kuormituskestävyyteen. Yhtä lailla voitaisiin kuitenkin louhia dataa esimerkiksi kiskoista tai turvalaitteista. Tärkeimpiä asioita tiedonlouhinnassa ovat datan laatu ja se, että tiedonlouhinta arvioi dataa oikein. Tiedonlouhinnassa huomattiin, että geometrian heikkenemisnopeuden potentiaali radan kunnan indikaattorina on myös merkittävä. Sen laskentaa ja laskennan taustateoriaa on kuitenkin vielä kehitettävä.

ABSTRACT

MIKKO SAUNI: Assessment of track load bearing capacity by data mining methods

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 137 pages, 100 Appendix pages

June 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Infrastructures

Examiner: M.Sc. Heikki Luomala and Professor Esko Turunen

Keywords: railway, load bearing capacity, data mining, track geometry deterioration

The ability of a railway structure to resist permanent deformations due to repeated loading can be described with track load bearing capacity. Track load bearing capacity does not have an established definition or a unit, nor is there much information about the factors affecting to it or about the relationships between the affecting factors. There is a lot of measurement data from railways which describes different features of the track structure. It is hard to interpret the data manually due to the large amount of data and complicated relationships within the data. In this master's thesis, data mining of track measurement data from different measurements is used to assess factors affecting track load bearing capacity.

The data mining method used in this master's thesis, GUHA, produces hypotheses that the input data supports. GUHA is a descriptive method, meaning that it only describes the input data but does not make conclusions or predictions. The hypotheses are claims about the relationships between factors in the data and are based on regularities within the data.

In data mining, the rate of track geometry deterioration was used to describe the track load bearing capacity. Track geometry deterioration rate is based on the annual growth of a figure calculated from longitudinal deviations from continuous track inspection measurements. Large track geometry deterioration rate implies poor and small track geometry deterioration rate implies good track load bearing capacity.

Two data sets from two track sections were used for data mining: Karjaa–Ervälä and Kouvola–Kotka track sections. According to the results from data mining, some track features, such as moisture or the variation of track deflection, have a stronger connection to large track geometry deterioration rates than other features. However, all features have some connection to all types of track geometry deterioration rates. The generic result of the data mining is that a single detrimental factor does not make a good structure behave poorly nor does a single contributing factor make an otherwise poor structure behave well.

The potential for data mining is significant. In this master's thesis, the data mining focuses on the effects of earth structures on track load bearing capacity. Data from rails or signaling equipment could be mined in the same fashion. The most important aspects in data mining are the quality of data and that the data mining evaluates the data correctly. During this study, track geometry deterioration rate was found to have great potential as an indicator for the condition of track structures. The calculations and theory behind the deterioration rate calculations are still to be developed.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisessä yliopistossa Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä osana TTY:n ja Liikenneviraston välistä Elinkaaritehokas Väylänpito eli ETEVÄ-tutkimusohjelmaa. Kuormituskestävyyden arviointi tiedonlouhintamenetelmillä liittyy radan kuormituskestävyyksimitoituksen selvittämiseen pengerrakenteiden osalta. Tässä työssä esille nousseiden havaintojen pohjalta voidaan jatkaa kuormituskestävyyden arviointimenetelmien kehitystä.

Poikkitieteellisestä luonteestaan johtuen diplomityön tekeminen vaati useiden henkilöiden panostusta ja apua. Työn ohjaajina toimivat DI Heikki Luomala Maa- ja pohjarakenteiden yksiköstä, professori Esko Turunen Matematiikan yksiköstä sekä professori Pauli Kolisoja Maa- ja pohjarakenteiden yksiköstä. Olen ikuisesti kiitollinen avustanne, työ ei olisi onnistunut ilman teitä. Erityiskiitos kuuluu Heikki Luomalalle, joka otti yhteyttä näin erityisen työn tekemisestä ja ohjasi minua erittäin aktiivisesti koko työn ajan.

Ohjaajien lisäksi työn tekemisessä apuna oli muitakin tahoja, joita tahtoisin kiittää. Alkuvaiheen lähtötietojen keräämisessä auttoi Mika Silvast Roadscanners Oy:stä. Tiedonlouhinnan aloittamisessa apuna oli matematiikan ja tietotekniikan laboratorioden avulista henkilökuntaa. Kiitosta ansaitsee myös koko MPR:n porukka, joka on ollut erinomaista työseuraa sekä apua klassikkoautoiluharrastuksen ylläpitämisessä.

Työ radan elinkaaren tutkimisen parissa on ollut antoisaa. Kehitettävää vaikuttaa olevan paljon ja uudet innovaatiot radan kunnossapidossa hyödyttävät kaikkia osapuolia rautateillä. Uuden kehittäminen alkaa nykyisten rakenteiden ymmärtämisestä, johon tämä työ on tähdännyt. Edmund Burkea ja George Santayanaa vapaasti lainaten: ”Ne jotka eivät tunne kunnossapitohistoriaansa, ovat tuomittuja toistamaan sitä.”

Tampereella, 15.5.2018

Mikko Sauni

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	RAUTATIE RAKENTEENA.....	2
	2.1 Radan rakenteet ja laitteet	2
	2.1.1 Raide	2
	2.1.2 Ratapenger.....	8
	2.1.3 Pohjamaa	10
	2.1.4 Ratarakenteen kuivatus	10
	2.1.5 Taitorakenteet ja turvalaitteet	11
	2.2 Radan rakenteen luokittelu.....	13
	2.3 Radan geometria.....	15
	2.4 Ulkoiset kuormat	17
3.	RADAN KUORMITUSKESTÄVYYS	22
	3.1 Radan kuormituskestävyyteen vaikuttavat tekijät	22
	3.2 Radan geometrian heikkeneminen.....	24
	3.3 Radan kunnan mittaaminen.....	27
	3.3.1 Radan geometrian tarkastus.....	28
	3.3.2 Jäykkyyden mittaaminen.....	29
	3.3.3 Maatutkaus	32
	3.3.4 Muut mittaustavat	34
	3.4 Geometriavirheiden korjaaminen	35
4.	TIEDONLOUHINTA	40
	4.1 Tiedonloughinnasta yleisesti.....	40
	4.2 GUHA-menetelmä.....	41
	4.3 LISp-Miner-ohjelmisto	43
	4.4 Tiedonloughinnan soveltaminen radan kuormituskestävyyteen	48
5.	RADAN KUORMITUSKESTÄVYYDEN ARVIOINTI TIEDONLOUHINNAN AVULLA	51
	5.1 Tutkimuskohteet.....	51
	5.2 Louhittava data.....	53
	5.2.1 Datan rakentaminen	53
	5.2.2 Geometrian heikkenemisnopeus ja korkeuspoikkeaman kasvunopeus	55
	5.2.3 Muut louhittavat parametrit.....	69
	5.3 Tiedonloughinnan tekeminen ja analyyttiset kysymykset	74
	5.4 Saadut tulokset	76
	5.4.1 Tiedonloughinnan tuottamia hypoteeseja Karjaa–Ervälä-väliltä	76
	5.4.2 Tiedonloughinnan tuottamia hypoteeseja Kouvola–Kotka-väliltä ..	98
6.	PÄÄTELMÄT TULOKSISTA JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	118
	6.1 Päätelmät tuloksista	118
	6.2 Tiedonloughinnan soveltuminen radan kuormituskestävyyden tutkimiseen	124

6.3	Jatkotutkimustarpeet.....	126
7.	YHTEENVETO.....	129
	LÄHTEET.....	132

LIITE A: TIEDONLOUHINNAN TUOTTAMINA HYPOTEESEJA KARJAA–ER-
VELÄ-VÄLILTÄ

LIITE B: TIEDONLOUHINNAN TUOTTAMIA HYPOTEESEJA KOUVOLA–
KOTKA-VÄLILTÄ

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ATU	Aukean tilan ulottuma
GPR	Ground Penetrating Radar. Maatutkaus
GUHA	General Unary Hypothesis Automaton, logiikkaan perustuva tiedonlouhintamenetelmä
JKV	Junien kulunvalvonta
MDI	Moisture Damage Index. Painotettu arvo rakenteen kokonais- kosteudesta maatutkatulosten perusteella
MGT	Miljoonaa bruttotonnia
RATO	Liikenneviraston ratatekniset ohjeet
R^2	Running Roughness. Arvo, joka kuvaa poikkeamien suuruutta tietyllä jaksolla
SD	Standard deviation. Keskihajonta
TQI	Track Quality Index. Arvo, joka kuvaa radan geometrian laa- tua

1. JOHDANTO

Radan vaurioitumismekanismien tunnistaminen ja korjaustoimenpiteiden kohdentaminen on vaikeaa, sillä tietämys radan kuormituskestävyydestä on puutteellista. Riittämätön kuormituskestävyys on tyypillistä erityisesti vanhoilla radoilla, joita ei ole rakennettu nykymääräysten mukaisesti. Ongelma voi kuitenkin vaikuttaa koko Suomen rataverkkoon, jos sallittuja akselipainoja nostetaan. Riittämätön kuormituskestävyys näkyy yleensä radan geometrian heikkenemisenä, josta voi seurata kunnossapitotarpeiden lisääntymistä sekä nopeus- ja painorajoituksia rataverkolle.

Rautateillä tehdään useita erilaisia mittauksia, joiden perusteella pyritään arvioimaan radan kuntoa. Näistä mittauksista kertyy paljon dataa, jota on yleensä arvioitu visuaalisesti tehtyjen havaintojen ja raja-arvojen perusteella. Tässä diplomityössä mittausdataa hyödynnetään tiedonlouhinnassa. Tiedonlouhinnalla datasta voidaan etsiä säännönmukaisuuksia, joiden avulla dataa voidaan ymmärtää paremmin. Tiedonlouhinnalla voidaan käsitellä suuria datamääriä ja saada selville monimutkaisia vaikutussuhteita.

Tässä diplomityössä tiedonlouhintaa käytetään radan kuormituskestävyyteen vaikuttavien tekijöiden arvioimiseen mittausdatan avulla. Radan kuormituskestävyys on moniulotteinen asia, johon vaikuttavat rakenteiden ja pohjamaan rakenne- ja lujuusominaisuuksien lisäksi muun muassa epäjatkuvuuskohdat ja ympäristön olosuhteet. Kun tietoa on paljon, eivätkä vaikutussuhteet ole selvillä, voidaan tiedonlouhinnalla saada viitettä siitä, mitkä ilmiöt vaikuttavat kuormituskestävyyteen ja tutkia näitä ilmiöitä tarkemmin.

Työn tavoitteena on esitellä rautateihin perehtyneelle tiedonlouhinnan mahdollisuuksia ja tuloksia sekä arvioida tiedonlouhinnan soveltuvuutta rautateistä saatavaan dataan. Työssä on tehty tiedonlouhintoja kahdesta eri tutkimuskohteesta, Karjaa–Ervelä-väliltä sekä Kouvola–Kotka-rataosalta. Työssä käsitellään myös radan kuormituskestävyyden määrittelyä ja geometrian heikkenemisnopeuden laskentaa.

Luvussa 2 esitellään taustateoria rautatiestä rakenteena. Luvussa 3 käsitellään radan kuormituskestävyyttä ja pyritään kuvaamaan siihen liittyviä ilmiöitä, mittauksia ja toimenpiteitä. Lähtökohdat tiedonlouhintaan ja tiedonlouhintaohjelmiston käyttö esitellään luvussa 4. Työssä tehty tiedonlouhinta ja siihen liittyvät kohdat tuloksineen kuvataan luvussa 5. Luvussa 6 on päätelmät saaduista tuloksista ja luvussa 7 yhteenveto.

2. RAUTATIE RAKENTEENA

Suomen 5 926 kilometriä pituinen rataverkko on tyypillisesti yksiraiteista 1900-luvun taitteessa rakennettua ja myöhemmin useastikin perusparannettua rataa. (Alameri 1979, s. 9–29, Liikennevirasto) Suomessa henkilöjunat ja tavarajunat liikkuvat samoilla raitteilla. Tämä aiheuttaa omat hankaluutensa radan geometrian optimoinnissa ja kunnossapidon kohdentamisessa. Ensisijaisesti radan tulee olla turvallinen, mutta myös liikennöitävissä korkealla nopeudella ja hyvällä matkustusmukavuudella.

Rautateihin kuuluu muun muassa raide, ratapenger rakennekerroksineen, pohjarakenteet, taitorakenteet, kuivatusrakenteet, sähkörata, turvalaitteet ja junien kulunvalvonta (JKV), liikenteenohjaus, matkustajainformaatiojärjestelmät, liikkuvan kaluston valvonta, asemat sekä lastausalueet. Kuten listan pituus osoittaa, rautatieympäristö on erittäin monipuolinen toimiala, jossa eri osa-alueet yhdistyvät ja muutosten vaikutukset ovat laaja-alaisia.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty radan kuntoon vaikuttavat laitteet ja rakenteet, radan rakenteen luokittelut, radan geometria sekä rataan kohdistuvat ulkoiset kuormitukset.

2.1 Radan rakenteet ja laitteet

Tässä kappaleessa on käsitelty ratarakenteen toimintaan tai kunnossapitoon vaikuttavat radan rakenteet ja laitteet. Kuvattuja radan rakenteita ja laitteita käsitellään radan rakenteen ja kunnossapidon näkökulmista. Osa radan rakenteista ja laitteista vaikuttaa suoraan radan kuntoon ja kunnossapitotarpeisiin, ja osa välillisesti liikenteen aiheuttaman dynaamisen kuormituksen kasvun tai kunnossapidon estymisen vaikutuksesta. Rakenteita, joilla ei oleteta olevan suurta vaikutusta ratarakenteen toimintaan, ovat esimerkiksi sähkörata, opastimet ja melusteet.

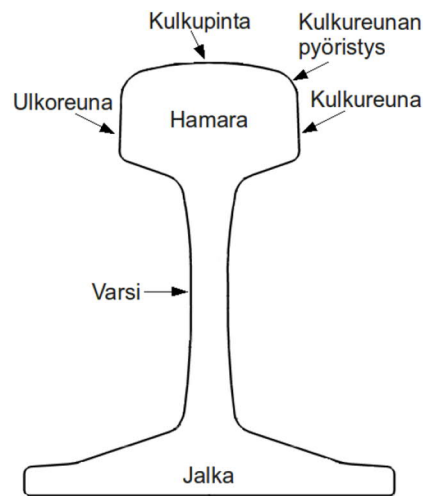
2.1.1 Raide

Raiteeseen kuuluu kiskot jatkoksineen ja hitseineen, aluslevyt, kiskonkiinnitykset, rata-pölköt, pohjaimet, vaihteet ja muut raiteen erikoisrakenteet. Raiteen komponentit määräytyvät muun muassa liikenteen kuormituksen ja suurimman sallitun nopeuden perusteella (Liikennevirasto 2002, s. 11–17).

Kisko

Kiskot ovat jatkuvia teräsrakenteita, jotka siirtävät yksikön pyörien kuormat ratapölkylle, ohjaavat pyörän kulkua, antavat kitkaa kiihdytykselle ja jarrutukselle sekä toimivat sähkönjohtimina (Esveld 2001, s. 206). Suomessa on käytössä eri kiskotyyppejä, joiden metripaino ja profiili vaihtelevat. Kevyin käytettävä kiskotyyppi on K30 ja raskain 60 E1,

ja niiden välillä on noin kaksinkertainen ero massassa ja poikkipinta-alassa (Liikennevirasto 2002, s. 34). Kiskojen tulee olla riittävän jäykkiä, sitkeitä ja kulutusta kestäviä käyttökohteissaan. Kuvassa 1 on esitetty kiskon eri alueet.



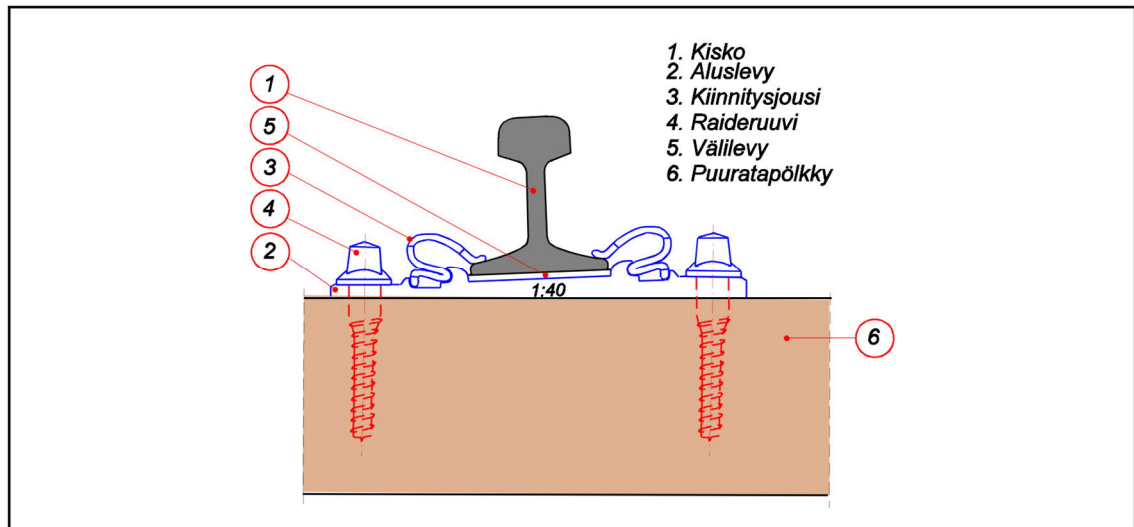
Kuva 1. Kiskon eri alueet. (Kauppinen 2011, s. 43)

Kiskon jäykkyys vaikuttaa siihen, kuinka monelle ratapölkylle kuormat jakautuvat. Jäykempi kisko jakaa kuormat useammalle ratapölkylle ja radan taipuma pienenee. Radan kokonaisjäykkyys vaikuttaa kiskoon siten, että suuri jäykkyys voi vaurioittaa kiskon pintaa, kun jousto on riittämätön. Alhainen kokonaisjäykkyys taas aiheuttaa kiskoon taivutusrasituksia kokonaistaipuman takia. (Peltokangas Luomala & Nurmikolu 2013, s. 51, Luomala et al. 2015, s. 52)

Viat kiskoissa voivat aiheuttaa dynaamisen kuorman lisäystä pysty-, vaaka- ja pituus-suunnassa. Dynaamisia kuormia voivat aiheuttaa muun muassa ympärilyöntijäljet tai korrugaatio. Ympärilyöntijälkiä syntyy kiskoon, kun yksikön vetävät pyörät pyörivät yksikön siirtymättä paikaltaan. Ympärilyönnissä kiskon pinta kuumenee ja jäähtyessään se karkenee, jonka seurauksena kiskon pintaan syntyy kerros haurasta materiaalia, jonka kohdalle syntyy vaurioita. Korrugaatio on kaluston ja radan värähtelystä aiheutuvaa jaksottaista aaltoisuutta kiskon kulkupinnassa. (Kauppinen 2011, s. 44–46, 48–50)

Kiskonkiinnitys

Kiskonkiinnityksen tarkoituksena on kiinnittää kisko ratapölkkyyn ja estää kiskon liikkeet niin sivu-, pysty- kuin pituus-suunnassa. Kiinnityksen tulee myös vaimentaa iskuja ja tärinää liikenteestä, ylläpitää suunniteltua raideväliä ja raiteen kallistusta sekä toimia sähköneristeenä. (Esveld 2001, s. 219) Kiskonkiinnityksen osat on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Kiskon kiinnityksen osat. Kuvassa Hey Back –kiinnitys. (Liikennevirasto 2002, s. 47)

Kiskonkiinnityksiä on useita erilaisia, mutta ne voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: jäykkiin ja joustaviin kiinnityksiin. Jäykät kiinnitykset kiinnittävät kiskon suoraan ratapölkkyyn ilman joustavia komponentteja, kun taas joustavissa kiinnityksissä on kiinnitysrous tai muu vastaava ratkaisu lisäksi. Erona näillä on se, että joustavat kiinnitykset mahdollistavat hallitun jouston kiskon pystysuuntaiselle liikkeelle ja suuren virumisvastuksen. Jäykät kiinnitykset taas löystyvät, kun muodonmuutoksia syntyy joko kiskoon tai kiinnitykseen. (Lichtberger 2011, s. 138)

Välilevy

Välilevy on joustava kappale, joka asennetaan kiskon ja ratapölkyn väliin. Sen tehtävänä on jakaa kuormia tasaisemmin ratapölkylle sekä antaa oikea kallistus kiskolle. Välilevy myös suodattaa korkeataajuuksista värinää ja meluhaittoja ja sillä voidaan pidentää betoniratapölkkyjen käyttöikä. Välilevyt on valmistettu tyypillisesti kumiseoksesta tai korkista. (Esveld 2001, s. 222, Liikennevirasto 2002, s. 45, Luomala et al. 2015, s. 54)

Pienestä koostaan huolimatta välilevyllä voi olla suuri vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen. Varsinkin talvella, kun jousto muualla ratarakenteessa on routaantumisen takia pienempää, suuri osa radan joustosta voi tulla välilevystä. Kuitenkin lämpötilan muuttuessa tiettyjen välilevyjen ominaisuudet muuttuvat ja välilevyn jäykkyys voi kasvaa merkittävästi kylmissä lämpötiloissa. Välilevyn vaikutus radan joustoon riippuu ympäristön olosuhteiden lisäksi radan kokonaisjoustosta. (Luomala et al. 2015, s. 57–58)

Hitsi

Kiskot pitää hitsata jatkuviksi muodostaen jatkuvakiskoraiteen (Jk-raide), kun halutaan liikennöidä yli 120 km/h nopeudella. Tällöinkin rataa jää jatkoksia, mutta kiskopituuden pitää olla yli 300 metriä. Lyhemmillä kiskopituuksilla puhutaan pitkäkiskoraiteesta (Pk-

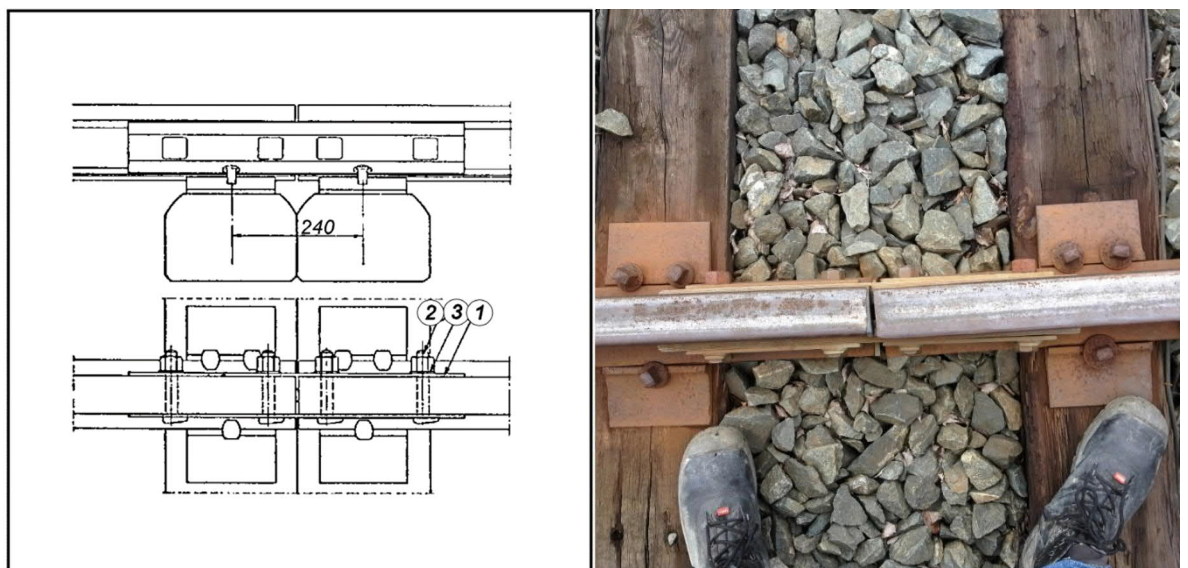
raide) tai lyhytkiskoraiteesta (Lk-raide), joissa liikennöinti nopeus on alhaisempi ja rakenteet vähemmän järeitä. (Liikennevirasto 1998, s. 7, Liikennevirasto 2002, s. 9–10)

Kiskojen hitsaukset ja etenkin kiskojen jatkokset aiheuttavat radassa epäjatkuvuuskohtia. Liikenneviraston ohjeet sallivat radalla käytettäväksi hitsaukseksi vain lisäaineita käyttävät hitsausmenetelmät eli termiittijatkoshitsauksen ja kaarijatkoshitsauksen (Liikennevirasto 1998, s. 20). Kiskohitsaamalla kiskoja voidaan hitsata yhteen leimuhitsauksella eli liittää ne yhteen sähkövirran avulla (Kauppinen 2011, s. 29).

Hitsauksen tyypistä ja laadusta johtuen hitsi aiheuttaa pienemmän tai suuremman epäjatkuvuuskohdan rataan, kun hitsin kohdalla materiaali on tyypillisesti pehmeämpää ja siten joustavampaa. Hitsin epäjatkuvuuskohta aiheuttaa muodonmuutoksia kiskossa ja kasvattaa siten liikenteen dynaamista kuormitusta. Tämä kasvattaa edelleen pysyvää muodonmuutosta kiskossa hitsin kohdalla, kunnes pysyvää muodonmuutosta syntyy maarakenteisiin. Tästä seuraa roikkuvia ratapölkkyjä jatkoskohdissa, jotka näkyvät muun muassa jäykkyyksmittauksissa. (Luomala et al. 2015, s. 52)

Jatkos

Jatkosovituksilla yhdistetään kiskojen päät pitämällä ne kohdakkain mekaanisen kiinnityksen avulla. Niiden tehtävänä on mahdollistaa kiskojen pituuden vaihtelu lämpötilamuutoksista johtuen. Jatkosovitukseen kuuluu tyypillisesti sidekisko (1), sideruuvi (2) ja jousirengas (3) (kuva 3a). Eristysjatkokset taas erottavat raidevirtapiirit toisistaan tai jännitteettömästä kiskosta. Eristysjatkokset ovat muuten saman tyyppisiä, mutta niiden sidekiskon materiaalin tulee olla sähkötekniisesti eristävää. (Liikennevirasto 2002, s. 65, 71)



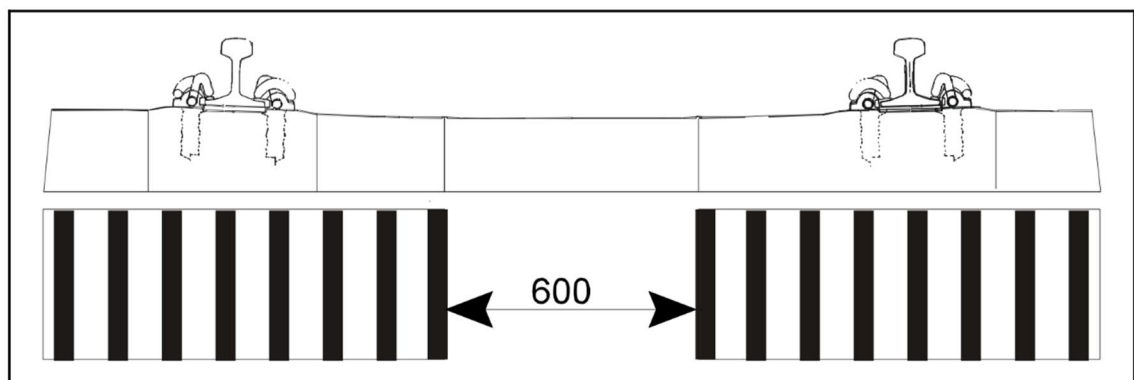
Kuva 3. a) RATO 11 kuva K43 kiskon jatkosovituksesta puuratapölkkyillä ja naulakiinnityksellä (Liikennevirasto 2002, s. 65) b) huonokuntoinen eristysjatkos K30 kiskossa Parolassa kesällä 2017.

Kiskojen jatkokset aiheuttavat epäjatkuvuuskohdan raiteeseen, kun jatkosrako jättää käytännössä tyhjää tilaa kiskon päiden väliin (kuva 3b). Jatkossovituksessa junan pyörä iskeytyy seuraavan kiskon päähän aiheuttaen dynaamisen kuorman lisäyksen. Tämä dynaamisen kuorman lisäys aiheuttaa saman ilmiön kuin hitsin aiheuttama kuorman lisäys, eli maarakenteisiin alkaa muodostua pysyvää muodonmuutosta ja ympäröivät ratapölkkyt alkavat roikkoa.

Ratapölkky

Ratapölkyn tärkeimpänä tehtävänä on välittää kuormat kiskolta tukikerrokseen. Suomessa on käytössä pääasiassa betoni- ja mäntypuuratapölkkyjä. Muistakin puumateriaaleista ja teräksestä voidaan tehdä ratapölkkyjä, mutta niiden käyttö vaatii aina erikoistarkastelua. Ratapölkkyjen käyttöalueet määräytyvät radan vaatimusten, rakenteen ja liikenteen sekä kokonaistaloudellisuuden mukaan. Käyttöikätaavoite vuoden 1982 jälkeen tehdyille betoniratapölkkyille on 40 vuotta ja muille betoniratapölkkyille sekä puuratapölkkyille 30 vuotta. (Liikennevirasto 2002, s. 19)

Ratapölkyn tukeutumistilanne eli ratapölkkyyn kohdistuvien kuormien jakautuminen tukikerrokseen on erittäin kriittistä ratapölkyn ja tukikerroksen elinkaaren kannalta. Hyvässä tukeutumistilanteessa kuormitus jakautuu ratapölkkyiltä kuvan 4 mukaisesti. Huonossa tukeutumistilanteessa ratapölkky voi kantaa vain yhdestä kohtaa tai roikkoa ilmassa kokonaan. Ratapölkkyt, joiden alla on tyhjätilaa, iskeytyvät tukikerrokseen yksikön ylittävissä ratapölkyn. Siitä aiheutuu vaurioita ratapölkkyyn ja tukikerroksen raidesepelin hienonemista, mistä seuraa radan geometrian heikkenemistä (Lundqvist & Dahlberg 2005, s. 76).



Kuva 4. Kuormituksen jakautuminen oikein ratapölkkyiltä tukikerrokseen. (Liikennevirasto 2002, s. 20)

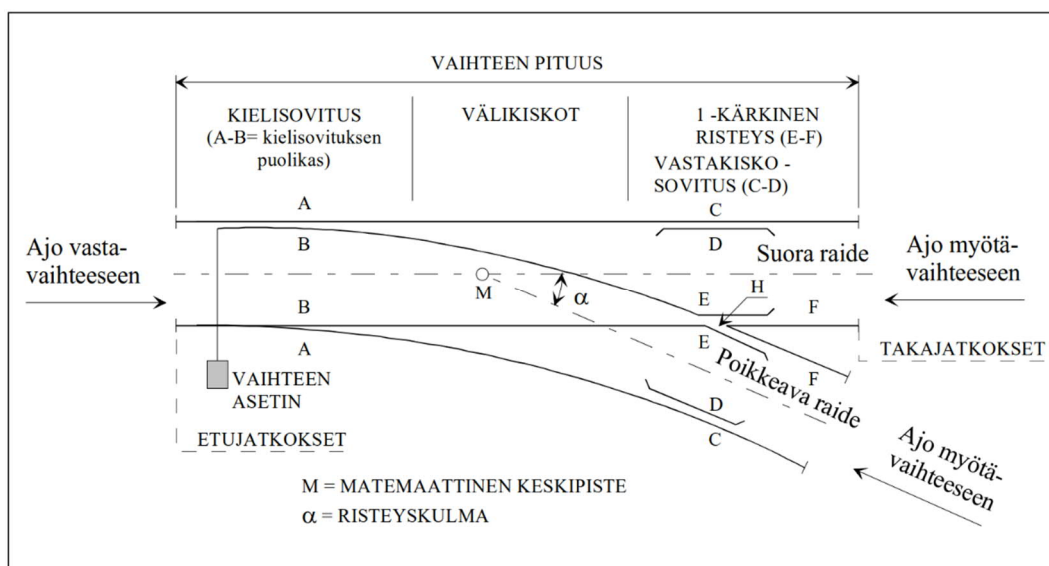
Pohjain

Pohjain on ratapölkyn pohjaan asennettava joustavasta materiaalista valmistettu levy tai pinnoite, jonka tarkoituksena on jakaa kuormat tasaisemmin tukikerrokseen. Pohjainten käyttö ei ole vielä yleistynyt Suomessa, mutta ulkomailla ne ovat jo vakituksessa käytössä. (Luomala et al. 2015, s. 59–60) Pohjainten käytöllä voidaan pidentää ratapölkkyjen ja

tukikerroksen käyttöikä ja siten ylläpitää radan geometriaa kauemmin. Pohjainten positiiviset vaikutukset perustuvat siihen, että pohjaimen joustava materiaali jakaa kuormat ratapölkyn pohjasta suuremmalle pinta-alalle tukikerrokseen, kun kosketuspinta karkeaan kiviainekseen kasvaa kiviaineksen painuessa pohjaimen. Tämän lisäksi joustava materiaali vähentää tärinää ja melua sekä lisää joustoa. (Luomala et al. 2015, s. 68–76)

Vaihteet

Vaihteet mahdollistavat kahden tai joissain tapauksissa useamman raiteen yhdistymisen sekä risteämisen. Kuvassa 5 on esitetty vaihteen ajosuunnat sekä vaihteen pääosat. Tyyppillisesti vaihteet ovat kuvan 5 mukaisia yksinkertaisia vaihteita, mutta myös monimutkaisempia vaihteita on laajalti käytössä.



Kuva 5. Vaihteen pääosat ja ajosuunnat. (Muokattu lähteestä: Liikennevirasto 2012, s. 8, 10)

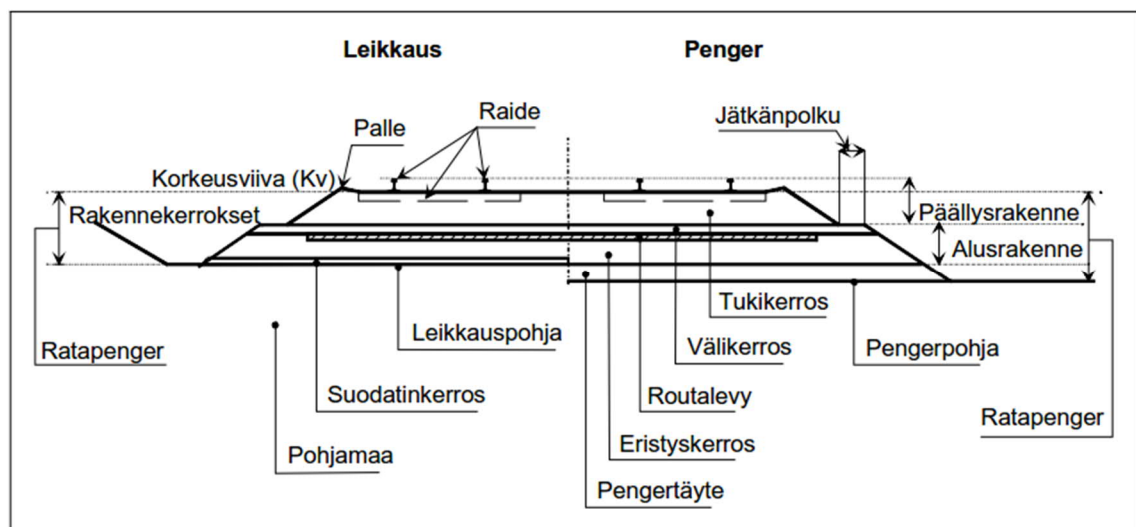
Kuvassa 5 esitettyjen osien selitteet RATO 4 mukaan ovat:

- A = tukikiskot
- B = kielet
- C = vastakiskojen tukikiskot
- D = vastakiskot
- E = siipikiskot
- F = kärkikiskot
- M = vaihteen matemaattinen keskipiste
- H = risteuksen matemaattinen risteyspiste, risteuksen kulkureunojen leikkauspiste
- α = vaihteen risteyskulma, joka ilmoitetaan vaihteen risteyssuhteena. (Liikennevirasto 2012, s. 8)

Vaihteet aiheuttavat aina epäjatkuvuuskohdan rataan, sillä vaihteiden kielisovituksessa ja risteyksissä vaihteen ylittävän yksikön pyörä vaihtaa kiskoa, jota pitkin se kulkee. Pyörän siirtyminen kiskolta toiselle aiheuttaa dynaamisen kuorman lisäyksen. Lisäksi vaihteiden tuenta ja tukikerroksen vaihtaminen ovat haastavampaa vaihdealueella kuin sen ulkopuolella. (Li et al. 2016, s. 253–254)

2.1.2 Ratapenger

Ratapengereseen kuuluu kuvan 6 mukaiset rakennekerrokset. Ratapengeren rakennekerrokset muodostavat yhdessä kokonaisuuden, jossa jäykkyys ja raekoko pienenevät ylhäältä alaspäin, rakenteen kuivatus toimii ja routa ei pääse tunkeutumaan routiviin maakerrokseen.



Kuva 6. Ratarakenteen poikkileikkaus. (Liikennevirasto 2018b, s. 8)

Radan rakennekerrokset voidaan jakaa päällysrakenteeseen ja alusrakenteeseen. Päällysrakenteeseen kuuluvat raide ja tukikerros, ja alusrakenteeseen kuuluvat välikerros ja eristyskerros sekä mahdollinen suodatinkerros.

Tukikerros

Tukikerros pitää sen päällä olevan raiteen paikoillaan siten, että karkearakeinen kiviaines ikään kuin lukitsee ratapölkkyt paikoilleen ja siirtää niiltä vastaanottamia kuormia alaspäin rakennekerrokseen. Tukikerroksen materiaalina käytetään raidesepliä tai raidesoraa riippuen radan päällysrakenteesta. (Liikennevirasto 2018b, s. 8) Raideseppelin rakeisuus on standardin SFS-EN 13450 mukaan 31,5–50...63 mm ja raidesepli voidaan valmistaa mineraalisesta luonnon kiviaineksesta, lämpökäsittelemällä kiviainesta teollisesti tai aikaisemmin käytetystä raideseplistä (SFS-EN 13450 + AC 2003, s. 5–6).

Tukikerroksen kunto vaikuttaa merkittävästi ratarakenteen toimintaan. Tukikerroksen kiiviaines hienonee ajan myötä toistuvan kuormituksen vaikutuksesta. Tällöin rakeet järjestyvät uudelleen tukikerroksessa ja raiteen asema voi muuttua tai ratapölkkyjä voi jäädä roikkumaan. Molemmat seuraukset heikentävät radan kuormituskestävyyttä. (Peltokangas et al 2013, s. 26–27)

Väli-, eristys- ja suodatinkerros

Välikerroksen tehtävänä on estää tukikerroksen sekoittuminen alempiin rakennekerrokseen. Välikerros muodostaa tasaisen ja kantavan alustan tukikerrokselle ja raiteelle. (Liikennevirasto 2018b, s. 8) InfraRYL:in mukaan välikerroksen materiaalina käytetään routimatonta hiekkaa, soraa tai kalliomursketta, josta rakennetaan 300 mm kerros sulan maan aikana. Jos alla oleva eristyskerros rakennetaan myös kalliomurskeesta, täytyy välikerros rakentaa samanaikaisesti ja samasta materiaalista kuin eristyskerros. (InfraRYL 2010, s. 315)

Eristyskerroksen tarkoituksena on estää tai vähentää roudan tunkeutumista tai tunkeutumisen vaikutuksia alla oleviin maakerrokseen tai pohjamaahan sekä siirtää ja jakaa kuormia pohjamaalle ja toimia kapillaarikatkona. Suodatinkerroksen tehtävänä on estää eristyskerroksen sekoittuminen pohjamaahan. (Liikennevirasto 2018b, s. 6–8)

Routalevy

Routalevyjä käytetään ratkaisuna routasuojaukseen, kun routimattomien materiaalien käyttäminen routimattomaan syvyyteen asti ei ole mahdollista. Yleensä tällainen tilanne on parannettavilla radoilla. Routalevyjen alhainen lämmönjohtavuus pienentää roudan tunkeutumissyvyyttä. Routalevyjä saa käyttää ainoastaan Liikenneviraston luvalla ja routalevytetty osuus tulee aina päättää siirtymäkiilaa. (Liikennevirasto 2018b, s. 22–23) Routalevyissä käytetään suulakepuristettua solumuovia (XPS) (InfraRYL 2010, s. 112). Vanhoilla radoilla voi olla käytössä vielä paisutettua polystyreeniä (EPS), jonka käyttö ratarakenteissa ei ole enää sallittua.

Vaikka routalevyt vähentävät arvokkaan routimattoman maa-aineksen käyttöä rakenteissa ja vähentävät siten rakentamisen aikaisia kustannuksia, routalevyjen käyttöä pyritään silti yleensä välttämään niiden muiden haittavaikutusten vuoksi. Routalevyt voivat puristua kasaan jopa useita millimetrejä ja lisätä joustoa radan rakenteissa (Peltokangas et al 2013, s. 35). Jousto radan rakennekerroksissa heikentää rakenteen kestävyyttä ja kiihdyttää vaurioitumista. Ikääntyessään vanhat EPS-routalevyt keräävät itseensä kosteutta, minkä seurauksena ne heikentävät rakenteen kuivatusta ja pahentavat routimisen vaikutuksia (Pylkkäinen & Nurmikolu 2015, s. 194).

2.1.3 Pohjamaa

Pohjamaa on usein epävarmin tekijä ratarakenteessa, vaikka sillä voi toisinaan olla kaikista merkittävin rooli rakenteen kestävyudessa. Koska pohjamaata ei pystytä tarkastamaan helposti ratarakenteen alta, jäävät arviot pohjamaasta yleensä tulkintojen varaan. Pohjamaa on kaikista hankalin rakenne korjata käytössä olevasta rautatiestä, sillä rautatieliikennettä ei usein voida pysäyttää pitkiksi ajoiksi, mitä pohjamaan korjaustoimenpiteet yleensä vaativat. (Li et al. 2016, s. 108–109)

Pohjamaan ongelmat johtuvat yleensä hienorakeisesta materiaalista, korkeasta vesipitoisuudesta ja toistokuormituksesta sekä näiden yhteisvaikutuksesta. Heikossa pohjamaassa esiintyviä ongelmia ovat muun muassa painumat, sortumat ja routaongelmat. Heikosta pohjamaasta johtuvat ongelmat aiheuttavat yleensä geometrian heikkenemistä, mutta pahimmillaan koko ratarakenne voi sortua. (Li & Selig 1995, Li et al. 2016, s. 111–116)

Heikolla pohjamaalla on niin merkittävä vaikutus ratarakenteen kestävyuteen, että sillä voidaan ulosmitata hyvien rakennekerrosten kuormituskestävyys. (Vinter 2015, s. 92) Heikkoa pohjamaata voidaan pyrkiä vahvistamaan eri menetelmillä. Pohjamaata voidaan vahvistaa esimerkiksi rakentamalla vastapenkereitä stabiliteetin parantamiseksi, vaihtamalla se kestävämpään materiaaliin (massanvaihto), sitä voidaan lujittaa lisäaineilla (stabilointi) tai kuormia voidaan siirtää muiden rakenteiden avulla kantavaan pohjaan (paa-lulaatta). (Ratahallintokeskus 2005a, s. 22)

2.1.4 Ratarakenteen kuivatus

Ratarakenteen kuivatuksen tarkoituksena on poistaa vettä rakenteen pinnalta ja sisältä. Sen suunnittelu on tärkeä osa ratarakenteen suunnittelua. Kuivatuksella on merkittävä vaikutus rakenteen kestävyuteen ja ylläpidon kustannuksiin, ja hyvällä kuivatuksella voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä muuttamatta radan rakennetta. Rakenteen kuivatus jaetaan pinta- ja syväkuivatukseen, joiden tulee toimia yhdessä. (Liikennevirasto 2013, s. 10, Li et al. 2016, s. 265)

Pintakuivatuksessa ohjataan vedet pois päin rakenteista ja estetään veden keräytyminen rakenteen läheisyyteen. Pintakuivatuksen keinoja ovat esimerkiksi pintojen kallistukset, ojien viettäminen ja rumpujen pitäminen kunnossa. On tärkeää ymmärtää alueen vesien liikkeet ja sijoittaa ja mitoittaa pintakuivatusrakenteet niiden mukaisesti. (Liikennevirasto 2013, s. 37, Li et al. 2016, s. 293–296)

Syväkuivatuksessa on tarkoituksena mahdollistaa veden poistuminen rakenteista. Veden tulisi virrata rakenteessa alaspäin siten, että sen on mahdollista poistua rakenteesta. Syväkuivatuksella estetään myös veden kapillaarinen nousu rakenteissa. Syväkuivatuksen keinoina ovat muun muassa karkearakeisten materiaalien käyttö, maapohjan ja rakennekerrosten muotoilu sekä salaojat. (Liikennevirasto 2013, s. 91, Li et al. 2016, s. 297–305)

Hyvällä kuivatuksella voidaan vähentää routimisongelmia ja vedellä kyllästettyjen maarakenteiden pysyviä muodonmuutoksia. Yksi routimisen perusedellytyksistä on veden saanti ja katkaisemalla veden kulkeutumisen rakennekerroksiin, voidaan routivan materiaalin routimista vähentää (Li et al. 2016, s.276–279).

Vesipitoisuus maarakenteissa heikentää maamateriaalin lujuusominaisuuksia sekä kuormittamattomana että kuormituksen alaisena. Kuormittamattomana maamateriaalin lujuuden heikkeneminen perustuu veden voitelevaan vaikutukseen sekä siihen, että paikalliset huokosveden alipaineet ja näistä aiheutuvat rakeiden väliset kontaktivoimat pienenevät vesipitoisuuden kasvaessa. Kuormituksen alaisena rakenteissa oleva vesi aiheuttaa huokosveden ylipainetta, mikä vähentää tehokkaita jännityksiä ja mahdollistaa pysyvät muodonmuutokset maarakenteessa alemmilla kuormitustasoilla. Huokosveden ylipainetta voi aiheutua, kun vedellä kyllästetty materiaali altistetaan äkilliselle kuormitukselle, kuten junaliikenteelle. (Kalliainen & Kolisoja 2013, s. 24)

2.1.5 Taitorakenteet ja turvalaitteet

Taitorakenteiden ja turvalaitteiden kohdalle tai rajapinnoille syntyy epäjatkuvuuskohtia radan rakenteessa. Epäjatkuvuuskohdissa joko rakennekerrosten, pohjamaan tai usein molempien paksuus tai ominaisuudet muuttuvat. Radan jäykkyys muuttuu näissä kohdissa nopeasti, mikä heijastuu epätasaisuuksina geometriaan, kun epäjatkuvuuskohdan kohdalla ja ympärillä dynaamiset kuormat kasvavat. Radan jäykkyyden muutosta tulisi pyrkiä tasaamaan siirtymärakenteilla, mutta myös tehostettua kunnossapitoa tarvitaan epäjatkuvuuskohdissa. (Li et al. 2016, s. 252–264)

Sillat

Sillat ovat rataan verrattuna hyvin jäykkiä ja lähes liikkumattomia rakenteita. Sillan päätyyn syntyy epäjatkuvuuskohta, kun ratarakenne normaalisti joustaa ja painuu enemmän sillan ulkopuolella kuin sillalla. Siltojen päädyissä on ongelmia muun muassa ratapenkeen painumisen ja leviämisen kanssa sekä routimisen suhteen. (Li et al. 2016, s. 252–253, Luomala et al. 2015, s. 91)

Siltojen päätyihin liittyviä ongelmia on pyritty poistamaan rakentamalla siirtymärakenteita, jotta muutos radan rakenteessa jakaantuisi pidemmälle matkalle. On kuitenkin huomattu, että siirtymärakenteiden rakentamisen jälkeenkin siltojen päädyt vaativat erityistä huomiota kunnossapidolta, kunnes rakenne stabilisoituu. (Luomala et al. 2015)

Rummut

Rummut ovat vapaalta aukoltaan alle kahden metrin levyisiä rakenteita, joita käytetään yleensä kuivatusjärjestelyissä (Liikennevirasto 2013, s. 68). Rummut eivät ole aina yhtä jäykkiä rakenteita kuin sillat, eikä niitä ole yleensä paalutettu kovaan pohjaan. Kuitenkin rumpujen kohdalla voi esiintyä epäjatkuvuuskohtia radassa joko jäykkyyden muutoksen

tai roudan takia. Jäykkyys voi pienentyä radassa rummun kohdalla, kun rumpu joustaa ympärillä olevaa rakennetta enemmän (Luomala et al. 2015, s. 29–31). Routa voi tunkeutua rummun kautta rakenteisiin, jos rummun routimaton ympäristäyttyö tai routasuojaus ei ole riittävä (Liikennevirasto 2013, s. 107–108).

Kallioleikkaukset ja tunnelit

Kallioleikkauksissa ja tunneleissa esiintyy samanlaista ilmiötä kuin silloilla. Jäykkyys on suurta ja painumat pieniä rakenteen kohdalla, jolloin rakenteen reunoille muodostuu epäjatkuuskohdat.

Kallioleikkausten kuivatus vaikuttaa paljon kallioleikkausten toimivuuteen. Toimimaton kuivatus voi näkyä kallioleikkauksilla paannejäänä tai virheinä radan geometriassa. (Loukkalahti 2010, s. 14–15) Kallioleikkauksissa voi aiheutua vaaratilanteita, mikäli yksikön esteettömälle kululle tarkoitettuun aukean tilan ulottumaan (ATU) pääsee kertymään paannejää. Kallion päällä olevat radan rakennekerrokset voivat myös jäätyä ja routia, mikäli materiaali on routivaa, eikä kuivatus toimi. Routiminen ja sulamispehmeneminen aiheuttavat geometriapoikkeamia, jotka edistävät rakenteen heikkenemistä.

Tasoristeykset

Tasoristeykset voivat aiheuttaa ratarakenteeseen epäjatkuuskohdan joko huonon kuivatuksen tai kunnossapidon estymisen takia. Tasoristeyksen kansirakenteet tulisi suunnitella siten, ettei vesi valuisi ratarakenteeseen kannen päädystä ja siten kastelisi rakennetta pistemäisesti. (Li et al. 2016, s. 254) Tasoristeysten kohdalla raidetta ei voida tukea tasoristeyksen kansirakenteen vuoksi, jolloin radan jäykkyys ja asema voivat vaihdella kansirakenteen päädyissä.

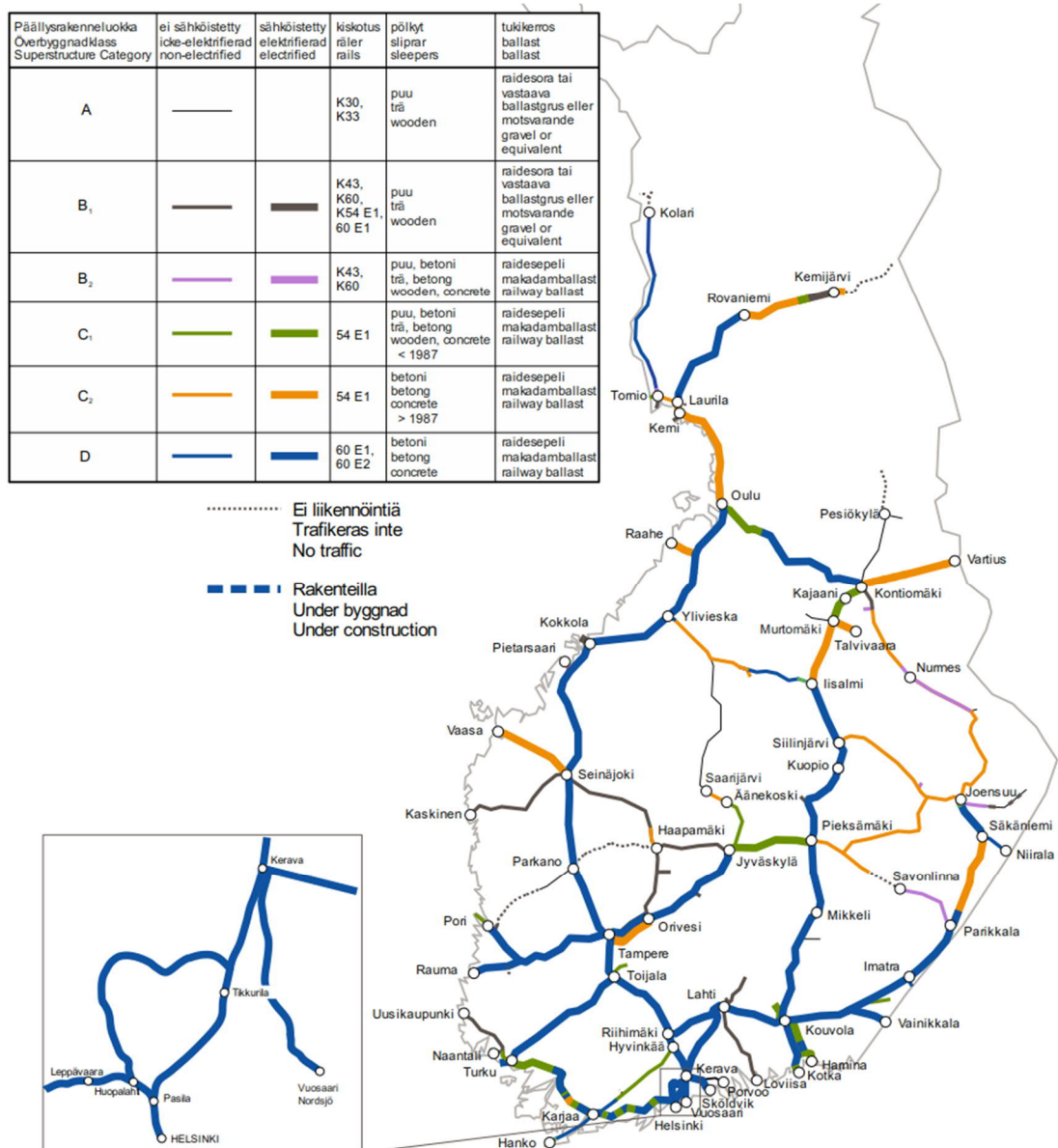
Baliisit

Baliisit ovat junien kulunvalvonnan (JKV) ratalaitteita, joiden kautta ylittävän yksikön JKV-veturilaitteen antennille lähetetään baliisisanomiamia. Baliisisanomiat sisältävät tietoja baliisin tunnuksesta ja tyypistä, etäisyydestä kohteeseen sekä nopeustietoja. (Liikennevirasto 2014, s. 9, 75–76) Baliisit asennetaan ratapölkyn keskelle, eikä asennus vaurioita juurikaan ratapölkkyä tai vaikuta muihin radan rakenteisiin. Baliisien vaikutus radan rakenteeseen ja sen heikkenemiseen tulee siitä, ettei baliisien kohdalla voida tukea rataa, jollei baliisia mahdollisine johtoineen ensin siirretä pois radalta. Tästä syystä rata voi jäädä tukematta baliisien kohdalta ja geometriaan syntyy epäjatkuuskohta. Sama ilmiö toistuu akselinlaskijoiden kohdalla.

2.2 Radan rakenteen luokittelu

Radat luokitellaan uusiin ja vanhoihin ratoihin perustuen rakennettavan kohteen luonteeseen. Uusien ratojen suunnittelussa noudatetaan osavarmuusmenetelmään perustuvaa mitoitusta, kun taas vanhojen ratojen suunnittelussa voidaan käyttää kokonaisvarmuusmenetelmää. Uuden radan alus- ja pohjarakenteiden käyttöikävaatimus on 100 vuotta. (Liikennevirasto 2018b, s. 11–13)

Päällysrakenne jaetaan kuuteen eri rataluokkaan: A, B₁, B₂, C₁, C₂ ja D, missä D-luokka on kaikista vaativin. Ratojen päällysrakenteiden luokittelu tehdään suurimpien sallittujen nopeuksien ja staattisten akselipainojen perusteella. Päällysrakenneluokka kertoo raiteen tukikerrosmateriaalista sekä kisko- ja ratapölkkytyypistä. (Liikennevirasto 2002, s.11–12) Rataverkon päällysrakenneluokat ovat esitettynä karttapohjalla kuvassa 7.

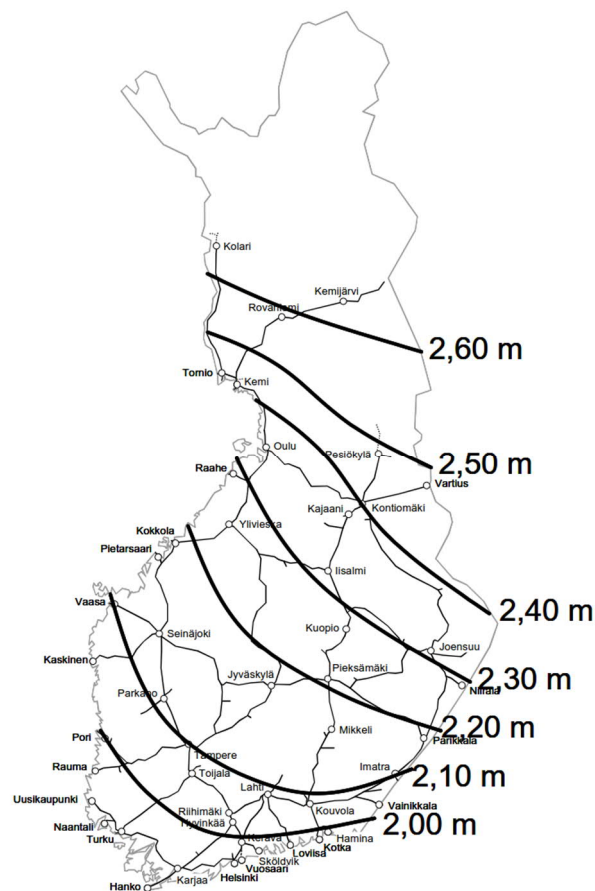


Kuva 7. Rataverkon päällysrakenneluokat. (Liikennevirasto 2016, liite 6 s. 20)

Radat jaotellaan alusrakenneluokittain viiteen luokkaan 0–4, joista 4 on kaikista vaativin luokka. Alusrakenneluokittelu perustuu henkilö- tai tavaraliikenteen suurimpaan nopeuteen ja tavaraliikenteen sallittuihin akselipainoihin. Jatkuvakiskoraiteella alusrakenneluokka on aina vähintään 1. Alusrakenneluokka vaikuttaa muun muassa radan rakenteen mitoitukseen ja sallittuihin painumiin. (Liikennevirasto 2018b, s. 16–18)

Ratarakenteen kokonaispaksuus määräytyy routamitoituksen kautta. Suomessa rakenteen paksuuden mitoittaminen routaa vastaan antaa nykyäsityksen mukaan riittävän kuormituskestävyyden uusille radoille nykyisillä akselipainoilla. (Kalliainen Kolisoja & Nurmi-kolu 2014, s. 9) Akselipainorajojen noston yhteydessä on kuitenkin arvioitava uudelleen, täytyykö mitoitus tehdä myös kuormituskestävyydelle.

Eristämättömän radan routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuus määräytyy roudan syvyyden mukaan kuvan 8 mukaisesti (Liikennevirasto 2018b, liite 1). Peltokankaan et al. mukaan routalevyillä voidaan ohentaa routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuutta, mutta uusilla radoilla pyritään välttämään routalevyjen käyttöä johtuen niiden heikentävästä vaikutuksesta radan jäykkyyteen. Perusparannettavilla radoilla routalevyn käyttö voi olla hyvä vaihtoehto esimerkiksi tukikerroksen vaihdon yhteydessä. (Peltokangas et al 2013, s. 32–33) Routalevyjen käyttöön ratarakenteessa täytyy aina hakea Liikenneviraston lupaa (Liikennevirasto 2018b, s. 22).



Kuva 8. Routimattomien rakennekerrosten paksuus. (Liikennevirasto 2018b, liite 1)

Kuten kuvasta 8 nähdään, rakennekerrospaksuus tulee verrattain paksuksi, kun mitoitus tehdään routaa vastaan. Kun rakennekerrokset mitoitetaan ainoastaan pohjamaan kestävyuden perusteella, saadaan tyypillisesti noin metrin paksuiset karkearakeiset rakennekerrokset (Li et al. 2016, s. 202–225). Mikäli siis rata perustetaan routimattomalle pohjamaalle ja käytetään asianmukaisesti routimattomia materiaaleja rakennekerroksissa, voitaisiin käyttää merkittävästi pienempiä rakennekerrospaksuuksia, kuin mitä kuvassa 8 on esitetty.

2.3 Radan geometria

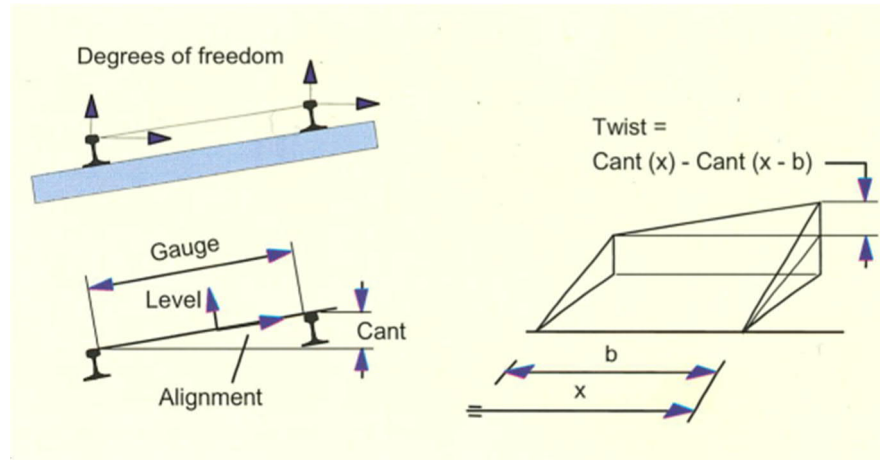
Radan geometrialla kuvataan radan sijaintia ja asentoa. Radan geometrian suunnittelulla pyritään minimoimaan dynaamisia kuormia ja mahdollistamaan yksikölle tasainen kulku. Radan geometriaa on määritelty standardeissa ja ohjeissa. Pääperiaatteet ja geometrian parametrit ovat samankaltaisia eri lähteissä, mutta määrittelyjen täsmällisyys ja radan geometrian merkitys vaihtelevat. Standardissa SFS-EN 13848-1 radan geometria on määritelty taulukossa 1 esitetyin parametrein.

Taulukko 1. Radan geometrian parametrit SFS-EN 13848-1 mukaan. (SFS EN 13848-1 - A1 2008, s. 8–19)

	Englanninkielinen termi	Suomenkielinen termi	Selitys
1	Track gauge	Raideleveys	Lyhin etäisyys kahden kiskon välillä kulkupinnasta mitattuna 0–14 mm kohtisuoraan alaspäin
2	Longitudinal level	Pituuskaltevuus	Muutos korkeusasemassa radan suuntaisten perättäisten kulkupintojen välillä
3	Cross level (cant/superelevation)	Kallistus	Vierekkäisten kulkupintojen korkeusero laskettuna kulmasta kulkupinnan ja vaakatason välillä
4	Alignment	Nuolikorkeus	Muutos sivusuunnassa radan suuntaisten perättäisten kulkupintojen välillä missä tahansa kiskossa ilmaistuna poikkeamana raiteen keskilinjasta
5	Twist	Kierous	Laskennallinen ero kahden määrättyllä etäisyydellä olevien kallistuksien välillä ilmaistuna gradienttina kahden mittapisteen välillä

Yksinkertaistettuna geometrian parametrit on esitetty kuvassa 9, joka on Esveldin oppikirjasta. Esveldin mukaan jokaisella kiskolla on 2 vapausastetta eli raiteella on 4 vapausastetta, jotka voidaan yleensä korvata vastaavalla systeemillä, joka koostuu kallistuksesta

(cant), korkeusasemasta (level), nuolikorkeudesta (alignment) ja raidevälistä (gauge). Kallistuksen muutos tietyllä matkalla (twist) tulee myös huomioida lisäterminä. (Esveld 2001, s. 15)



Kuva 9. Radan geometrian parametrit oppikirjan *Modern Railway Track* mukaan. (Esveld 2001, s. 15)

Standardin SFS-EN 13848-1 mukaan geometrian laatu muodostuu poikkeamien arvioinnista keskiarvoisiin, suunniteltuihin tai määriteltyihin geometrian parametreihin, mikä kasvattaa turvallisuushuolia tai jolla on korrelaatio matkustusmukavuuteen. (SFS EN 13848-1 - A1 2008, s. 6) Toisin sanoen, mitä parempi geometrian laatu, sen parempi turvallisuus ja matkustusmukavuus.

Standardin ajatuksena on, että TQI:t (track quality index) kuvaavat radan geometrian laatua radan geometrian parametrien ja mittaustulosten perusteella. Radan geometrian laatua tulisi arvioida mahdollisimman vähin TQI:n kuin mahdollista ja niiden algoritmit tulisivat olla käyttäjälle ymmärrettävissä. (SFS-EN 13848-6 2014, s. 7)

TQI:stä yleisin on keskihajonta, jolla kuvataan yksittäisen mittaustuloksen hajontaa tietyn osuuden mittaustulosten keskiarvosta. Muita TQI:tä ovat muun muassa yksittäisten poikkeamien arviointi, useiden parametrien keskihajontojen yhdistelmä, yksikön vasteeseen perustuvat mittaustavat sekä mittaustuloksen suuruuden ja frekvenssin suhteeseen perustuva arvo (PSD). (SFS-EN 13848-6 2014, s. 5–12)

Suomessa Liikenneviraston ohjeen, RATO 2 Radan geometria, mukaan radan geometria muodostuu pysty- ja vaakageometriasta sekä raidelevydestä. Rautateillä on käytössä ratakilometrijärjestelmä, johon raiteen teorettinen asema sidotaan koordinaatiston lisäksi. RATO 2:ssa on myös käsitelty aukean tilan ulottumaa (ATU). Aukean tilan ulottuma on se raidetta ympäröivä tila, jonka sisäpuolella ei saa olla laitteita tai kiinteitä rakenteita. ATU:n suuruus määräytyy muun muassa pää- tai sivuraiteen, suurkuljetusten ja kallistuksen mukaan. (Liikennevirasto 2010)

Pystygeometria määritellään ohjeen mukaan korkeusviivan taitepisteiden avulla. Suorat kaltevuusjaksot ja ympyränkaaren muotoiset kaltevuustaitteen pyöristyskaaret muodostavat raiteen korkeusviivan. Pystygeometria pyritään suunnittelemaan radan liikenteellisten tarpeiden mukaan. Vaakageometrian suunnittelussa määritellään raiteen keskilinjan sijainti vaakatasossa ja raiteen kallistus kaarteissa. Radan vaakageometria käsittää raiteen keskilinjan sijainnin vaakatasossa sekä raiteen kallistuksen. (Liikennevirasto 2010, s. 20, 27)

RATO 2:ssa todetaan radan geometrian suunnittelun vaikuttavan liikenteen sujuvuuteen ja matkustusmukavuuteen, turvallisuuteen ja elinkaarikustannuksiin. RATO:ssa painotetaan harkittua suunnittelua, jossa vältetään jatkuvaa raja-arvojen käyttämistä, ja sen sijaan pyritään päästä tasapainoiseen ratkaisuun rakennuskustannusten ja toimivuuden välillä. (Liikennevirasto 2010, s. 16)

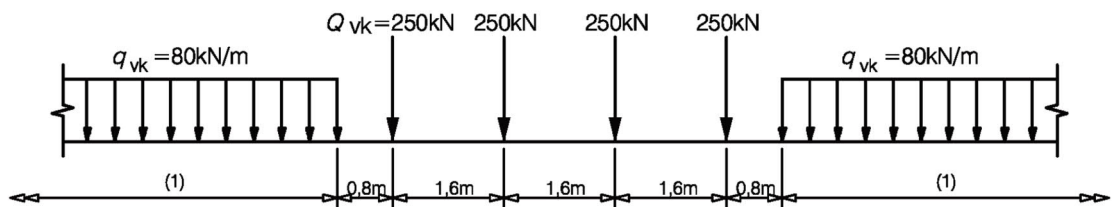
2.4 Ulkoiset kuormat

Ulkoisia kuormia ovat liikenteen aiheuttamat kvasistaattiset ja dynaamiset kuormat sekä tärinä, routanousu, veden liike rakenteissa ja eroosio. Kuormat voivat olla joko pysty-, vaaka- tai sivuttaissuuntaisia.

Liikenteen kvasistaattinen kuormitus

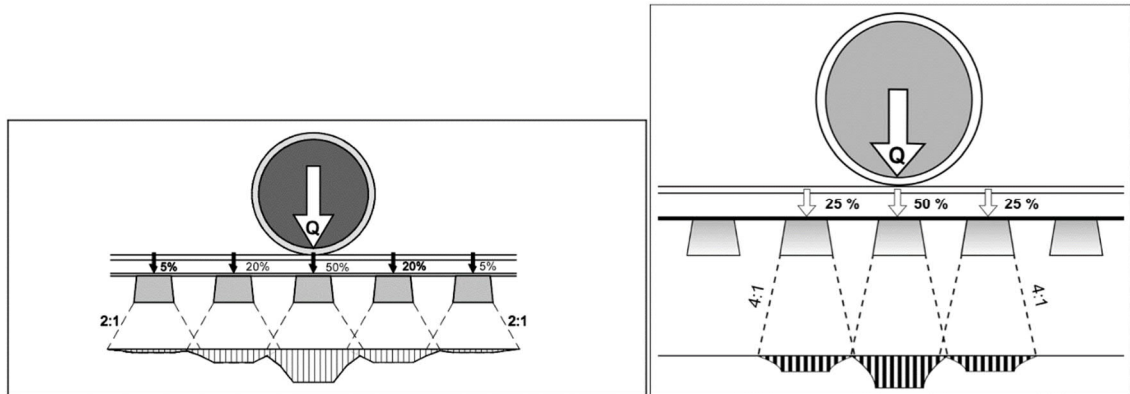
Kun junaliikenteen staattiseen kuormaan eli junakaluston painosta aiheutuvaan kuormaan lisätään kaarteissa olevan yksikön kompensoimaton pyöräkuorman lisäys sekä tuulikuorma, saadaan näiden summaksi yksikön aiheuttama kvasistaattinen kuormitus. (Esveld 2001, s. 57) Kvasistaattinen kuorma kuvaa tasaisesti kulkevan yksikön aiheuttamaa kuormitusta ratarakenteelle.

Junaliikenteen staattisten kuormien ajatellaan jakautuvan radalle standardissa SFS-EN 1991-2 esitetyn kuormituskaavion 71 mukaisesti (kuva 10). Kyseistä kuormituskaaviota käytetään uusien ratojen geoteknisessä mitoituksessa. Mitoittava kuormitus määräytyy YTE-rataluokan perusteella. Vanhoilla radoilla käytetään YTE-rataluokkaan perustuvia kuormituskaavioita ja vaatimuksia. (Liikennevirasto 2018b, s. 24–30)



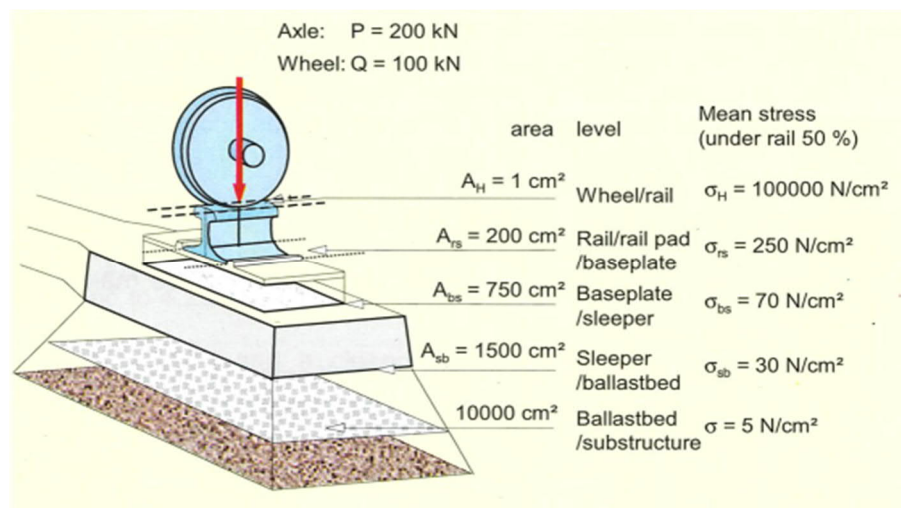
Kuva 10. Standardin mukainen kuormituskaavio 71 raideliikenteen staattisille kuormille. (SFS EN 1991-2 2004, s. 57)

Yksittäiseltä junan akselilta kuormien ajatellaan jakautuvan ratapölkkyiltä tukikerrokseen kuvan 11 ab mukaisesti. Kuva on idealisointi tapauksesta, jossa vierekkäiset ratapölkkyt ovat tukeutuneet tasaisesti ja radassa on keskimääräinen jäykkyys. Joustavalla radalla kuorma voi todellisuudessa jakautua laajemmalle alueelle, ja yhden ratapölkyn kuormitus on pienempi, kun taas jäykällä radalla vaikutukset ovat käänteiset (Peltokangas et al 2013, s. 44).



Kuva 11 ab. Vasemmalla (a) RAMO 11 ja oikealla (b) RATO 3 mukainen pystysuorien kuormien jakaantuminen ratapölkkyistä tukikerrokseen. (Liikennevirasto 2002, s. 12, Liikennevirasto 2018b, s. 31)

Kuormien voidaan ajatella jakautuvan ratarakenteeseen ja pohjamaahan kuvan 12 periaatteiden mukaisesti. Kuormat jakautuvat laajemmalle alueelle syvemmällä rakenteissa ja samalla jännitys (paine) pienenee. Tähän perustuen Suomessa ei ole nähty tarvetta mitoitaa ratarakennetta kuormituskestävyydelle, kun routamitoituksen takia rakenteet ovat erittäin paksuja ja jännitykset pohjamaassa oletetaan pieniksi.



Kuva 12. Kuormien jakaantuminen kisko-pyöräkosketuksesta pohjamaahan. (Esveld 2001, s. 14)

Liikenteen dynaaminen kuormitus

Yksikön liikkeen epätasaisuudesta voi aiheutua dynaamista kuormitusta. Yksikön liikettä voivat häiritä viat kalustossa tai radassa. Kaluston vikoja ovat muun muassa lovipyörät, jotka aiheuttavat voimakkaita impulsseja kiskoon. Yksikön nopeus ja kaluston teli- ja akselirakenne sekä jousitus vaikuttavat merkittävästi dynaamisen kuormituksen suuruuteen. (Korkeamäki 2011, s. 45, 52–56)

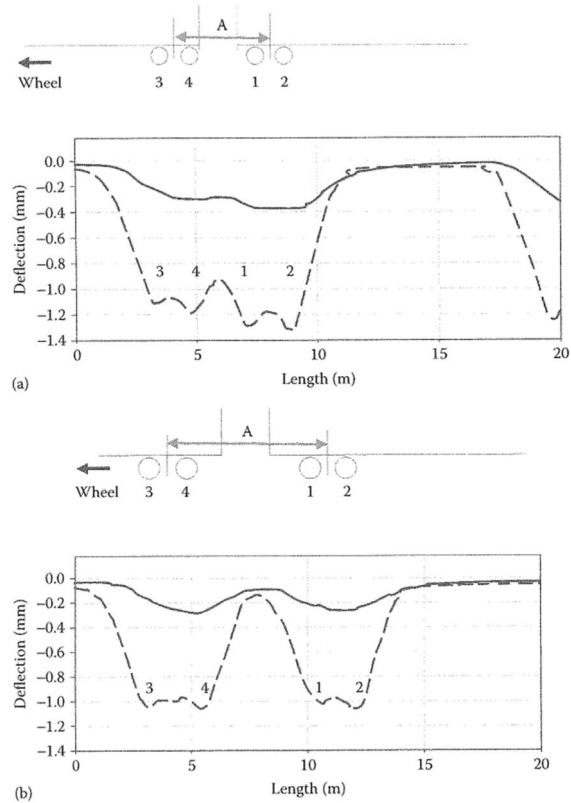
Radassa dynaamista kuormitusta lisääviä tekijöitä voivat olla radan viat tai rakenteelliset tekijät, jotka eivät tue kaluston häiriötöntä liikettä. Varsinaisia vikoja ovat muun muassa radan jäykkyyden suunnittelemattomat vaihtelut, roikkuvat ratapölkkyt, kiskoviat ja heikentynyt geometria. Rakenteellisia tekijöitä, jotka aiheuttavat dynaamisen kuormituksen lisäystä, ovat esimerkiksi eristysjatkokset (raidevirtapiirit) ja vaihteet. (Korkeamäki 2011, s. 45–52)

Dynaamisen kuormituksen suuruuteen vaikuttaa yksikön nopeus ja radan jäykkyyden vaihtelu, ja sillä voi olla moninkertainen staattiseen kuormaan verrattuna. Dynaaminen kuormitus on merkittävä tekijä radan kunnan heikkenemisessä. (Korkeamäki 2011, s. 47–48, Li et al. 2016, s. 42–43)

Toistokuormitus

Juna kuormittaa toistuvasti pistemäistä kohtaa radassa, kun jokainen akseli ylittää samaisen kohdan. Perättäiset kuormituskerrat ovat niin nopeita ja nopeasti toistuvia, etteivät maarakenteet reagoi niihin samalla tavalla kuin staattiseen kuormitukseen. Toistokuormituksen voidaan ajatella muodostuvan kuormituksen muodosta, kestosta, yksittäisen kuormituksen koosta, ajasta kuormitusten välillä ja kuormitusten kokonaismäärästä. (Li et al. 2016, s. 38–42)

Toistokuormituksen luonne vaikuttaa siihen, kuinka alla olevat rakenteet reagoivat kuormitukseen. Kuvassa 13 on havainnollistettu pohjamaan taipumaa lyhyen ja pitkän vaunun kuormituksen alla kahdella eri syvyydellä. Lyhyen vaunun telien välien välillä rakenteet ehtivät palautua paljon lyhemmän aikaa kuin pitkän vaunun telien välillä. Lyhyen vaunun kohdalla uusi kuormitusyksi alkaa paljon suuremman painuman aikana, mikä vaikuttaa kokonaispainumaan. (Li et al. 2016, s.39–41)



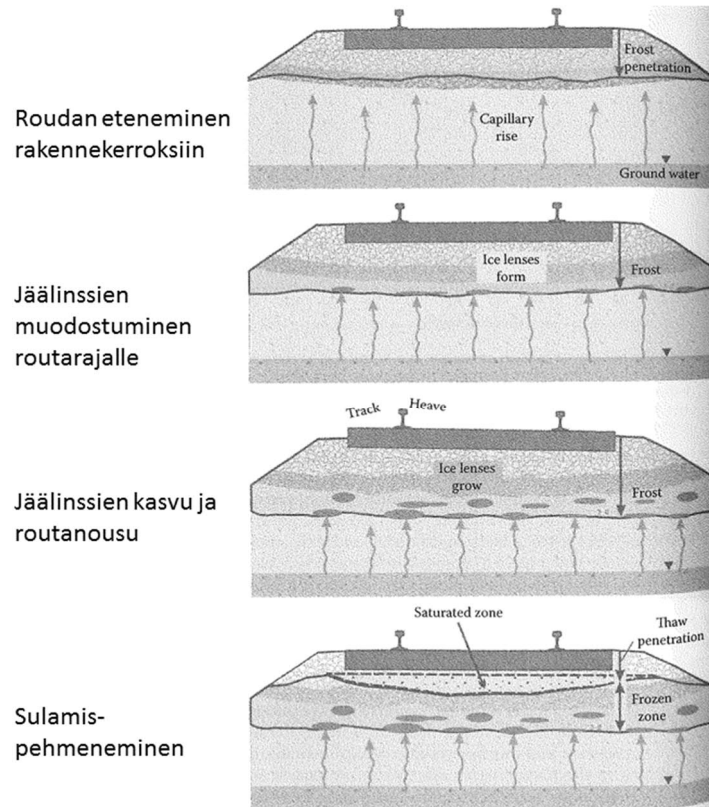
Kuva 13. Toistokuormitus (a) lyhyen vaunun alla (b) pitkän vaunun alla. (Li et al. 2016, s. 40)

Tärinä

Tärinä nähdään usein ympäristöhaitaksi, mutta sillä on myös vaikutuksia ratarakenteen kestävyys. Varsinkin paksuilla savikoilla, joilla on suuri kosteuspitoisuus, ohut kuiva-kuori ja ohuet rakennekerrokset, tärinä voi heikentää pohjamaata, kun liikennöidään suurilla nopeuksilla (Hakulinen 2017). Tärinä voi heikentää myös rakenneseosia. Esimerkiksi roikkuvat ratapölkkyt voivat jäädä värähtelemään yksikön pyöräkerran ylityksen jälkeen, mikä saattaa hienontaa tukikerrosainekäyttöä ja lyhentää ratapölkyn käyttöikä (Lundqvist & Dahlberg 2005, s. 74).

Routa

Kun maa alkaa jäätyä pitkän pakkasjakson seurauksena, puhutaan tällöin maan routaantumisesta. Routimista tapahtuu, kun routaantuneessa maassa routarajalle imeytyy vettä, joka jäätyessään muodostaa jäälinssejä ja jäätyneen maan pinta kohoaa. Routimisen edellytyksenä ovat pakkanen, routiva materiaali, vesi sekä yllä olevien maakerrosten ja rakenteiden aiheuttaman kuormituksen ylittyminen routimispaineesta. (Pylkkäinen & Nurmi 2015, s. 10, 65) Kuvassa 14 on havainnollistettu ratarakenteen routimista ja sulamispehmenemistä.



Kuva 14. Ratarakenteen routiminen ja sulamispehmeneminen. (Muokattu lähteestä: Li et al. 2016, s. 278)

Routiminen aiheuttaa poikkeamia radan rakenteeseen kahdessa vaiheessa, routanousussa ja sulamispehmenemisessä. Routanousu aiheuttaa geometriaan poikkeaman, joka voi olla suuruudeltaan jopa 20 mm. Sulamispehmenemisessä taas rakenteen lujuusominaisuudet heikentyvät merkittävästi, kun rakenne kyllästyy vedellä. Tällöin liikenteen kuormitus aiheuttaa suurempaa pysyvää muodonmuutosta. Routaongelmien takia rataverkolle asetetaan tilapäisiä nopeusrajoituksia, joiden tarkoituksena on vähentää ratarakenteeseen kohdistuvia dynaamisten kuormien lisäyksiä. (Pylkkäinen & Nurmikolu 2015, s. 35, 97, 198)

3. RADAN KUORMITUSKESTÄVYYS

Radan kuormituskestävyydelle ei ole vakiintunutta määritelmää, eikä sille ole dimensiota. Kuormituskestävyyttä on kuvattu eri lähteissä kykynä ottaa vastaan ja siirtää kuormia rakenteessa (Esveld 2001, s. 14, Tammirinne 2002, s. 151, Lichtberger 2011, s. 37–38). Kalliainen et al. ovat määritelleet radan kuormituskestävyyttä pitkälle. Heidän mukaansa radan kuormituskestävyyttä arvioitaessa tulee ottaa huomioon eri osakomponenttien toiminta ja keskinäiset vuorovaikutussuhteet ja tuntea rataa kohdistuvat kuormitukset sekä ympäristöstä aiheutuvat kuormitukset. (Kalliainen et al 2014, s. 158)

Tässä työssä radan kuormituskestävyydellä tarkoitetaan radan rakennekokonaisuuden kykyä vastustaa toistuvasta kuormituksesta johtuvia pysyviä muodonmuutoksia. Radan kuormituskestävyys on ajasta riippuvainen ja siihen vaikuttaa kaikkien radan komponenttien ominaisuudet, komponenttien yhteensopivuus, ympäristön olosuhteet sekä kuormituksen luonne ja näiden yhteisvaikutus.

Kun rataa kuormitetaan yli sen hetkisen kuormituskestävyyden, rataa syntyy pysyviä muodonmuutoksia, jotka havaitaan yleensä geometrian heikkenemisenä. Mikäli kuormituskestävyys on hyvällä tasolla, radan geometria heikkenee hitaasti. Jos taas kuormituskestävyys ei ole riittävällä tasolla, radan geometria heikkenee nopeasti. Radan kuormituskestävyydelle ei voida kuitenkaan antaa suoranaista arvoa, vaan radan vaurioituminen riippuu radan kuormituskestävyyden ja radan kuormituksen välisestä vuorovaikutuksesta tietyllä ajanjaksolla.

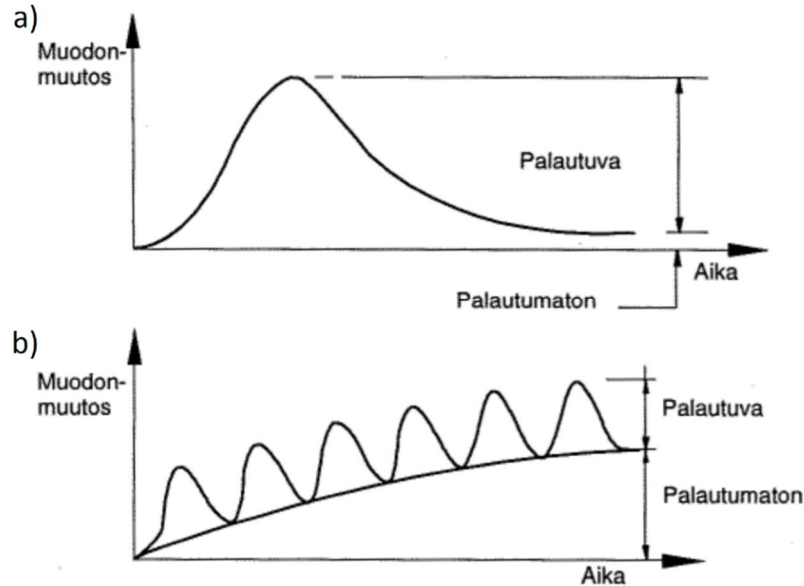
3.1 Radan kuormituskestävyyteen vaikuttavat tekijät

Radan kuormituskestävyyttä ei voida määrittää yksittäisen ominaisuuden tai mittaustuloksen perusteella. Tässä työssä keskitytään pääasiassa maarakenteiden vaikutuksiin radan kuormituskestävyyteen, vaikka kuormituskestävyyteen vaikuttaa ratarakenteen ja radan komponenttien muodostama kokonaisuus.

Yksittäisen radan komponentin vaikutus

Joillain rakenneosilla, kuten kiskoilla ja ratapölkyillä, on käyttöikä, jonka puitteissa niitä voidaan huoltaa, mutta käyttöiän päätyttyä ne tulee vaihtaa. Kiskon käyttöikään vaikuttaa valmistuksen ja asennuksen lisäksi käyttöiän aikana tehtävät korjaustoimenpiteet (Kauppinen 2011, s. 104–105). Ratapölkyillä käyttöiän aikana harvemmin tehdään korjaustoimenpiteitä, vaan vaurioituessa ne käytännössä aina vaihdetaan uusiin. Puuratapölkyjä voidaan korjata vahvistamalla kiskonaulojen tai raideruuvien kiinnityksiä sekä asentamalla ratapölkyn päihin naulalevyjä estämään halkeamia (Liikennevirasto 2000, s. 17).

Maarakenteilla taas on täysin erilainen elinkaari ratarakenteessa. Junaliikenteen toistokuormitus aiheuttaa palautuvaa ja pysyvää muodonmuutosta maarakenteisiin. Maarakenteissa yksittäiset partikkelit joustavat tai rikkoutuvat, huokostila partikkelien välillä voi muuttua ja rakeet voivat järjestyä uudelleen. (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 21–27) Toistokuormituksen aiheuttama palautuva ja pysyvä muodonmuutos on esitetty kuvassa 15 ab.



Kuva 15 ab. *Palautuva ja palautumaton painuma a) yksittäisessä kuormitusyhdessä b) toistokuormituksessa. (Ehrola 1996, s. 171)*

Maarakenteiden muodonmuutoksessa rakennekerrokset eivät varsinaisesti rikkoudu, vaan syntyvät siirtymät heikentävät radan geometriaa. Geometrian palauttaminen ilman juurisyyn korjaamista johtaa geometriavirheen uusiutumiseen hyvinkin nopeasti (Li et al. 2016, s. 453).

Yksittäisillä komponenteilla voi siis olla kahdenlaisia vaikutuksia kuormituskestävyyteen. Joko komponentilla on tietty käyttöikä, jonka päättymisestä seuraa komponentin vaihtamisen tarve tai komponentti vähitellen menettää kuormituskestävyyttään heikentäen koko radan kuormituskestävyyttä. Käytännössä komponenteilla voi olla kummankin tyyppisiä vaikutuksia radan kuormituskestävyyteen, mutta yleensä toinen näistä on määräävä.

Kun komponentilla on tietty käyttöikä, voidaan kuvitella komponentin suoriutuvan rakenteessa siihen asti kutakuinkin vakiona. Kun komponentin käyttöikä päättyy, ei sitä voida enää käyttää radassa, vaan se tulee kokonaan vaihtaa.

Toisenlainen yksittäisen komponentin vaikutus on sen heikkenemisestä aiheutuvat ongelmat radassa. Ikääntyessään komponentti ei varsinaisesti rikkoudu, vaan menettää kuormituskestävyyttään ja aiheuttaa muutoksia radassa. Komponenttia ei välttämättä voida

varsinaisesti korjata, vaan se tulee joko vaihtaa, sen kuormituskestävyyttä tulee tukea muilla komponenteilla tai sille kohdistuvaa merkitystä radan rakenteessa tulee pienentää.

Radan komponenttien yhteistoiminta

Ratarakenteessa on useita eri komponentteja, joilla on erilainen kuormituskestävyys. Komponenttien onnistuneella yhteensopivuudella yksittäisen komponentin toiminta tukee muiden komponenttien toimintaa. Epäonnistuneella yhteensopivuudella yksittäinen komponentti heikentää toisen komponentin kuormituskestävyyttä.

Esimerkiksi alhainen jäykkyys kiskossa jakaa kuormia isommalle alueelle tukikerrokseen. Yksittäiselle ratapölkylle kohdistuva rasitus on pienempää, kun kiskon jäykkyys on alhainen, ja ratapölkky todennäköisesti kestää rasitusta pidempään. Ratapölkyn alapuolella suuret taipumat voivat kasvattaa tukikerroksen hienonemisen todennäköisyyttä ja heikentää alapuolisen rakenteen toimivuutta. Mikäli tukikerros pääsee hienonemaan suurista taipumista johtuen, heikentää se myös ratapölkkyä, kun ratapölkyn alle muodostunut tyhjätila mahdollistaa ratapölkyn liikkeen kuormituksen alla ja ratapölkkyyn kohdistuu suuria iskuvoimia. (Peltokangas et al 2013, s. 41–51)

Radan komponenttien yhteensopivuus riippuu myös ajasta ja olosuhteista, eikä vain vakio-olosuhteissa toimivista komponenteista. Yksittäisen komponentin kuormituskestävyys voi muuttua ympäristön olosuhteista, kuten kosteudesta tai lämpötilasta johtuen, sekä myös ajan suhteen komponentin ikääntyessä. Komponenttien yhteensopivuus eri olosuhteissa voi muuttua radan kuormituskestävyyttä merkittävästikin. Ideaalitulanteessa komponenttien käyttöikä olisi mitoitettu keskenään samanpituisiksi, jolloin ratarakenteella olisi vain yksi käyttöikä ja välttyttäisiin jatkuvilta yksittäisiltä korjauksilta.

Kuormituksen luonteen vaikutus

Vaikka yleensä ajatellaan kuormituksen suuruuden olevan määräävä tekijä radan pysyvissä muodonmuutoksissa, voi kuormituksen luonteen vaikutus olla myös merkittävä. Kuormituksen suunta ja jaksoittaisuus aiheuttavat erilaisia seurauksia komponenteissa. Tästä syystä rata ja sen komponentit tulee olla mitoitettu niitä kuormitustyyppejä vastaan, joita ne kokevat.

3.2 Radan geometrian heikkeneminen

Ideaalitulanteessa vastarakennettu tai perusparannettu ratarakenne painuisi tasaisesti kaikkialta ja radan geometria vain siirtyisi alemmas, muttei muuten muuttuisi. Näin ei kuitenkaan ole, koska rataosan ratarakenne ei ole kauttaaltaan homogeeninen ja radassa on paikallaan pysyviä rakenteita kuten paalutettuja siltoja. Tietyissä paikoissa geometria heikkenee nopeammin kuin muualla ja geometrian heikkenemisessä voi olla eroja yhdessä

poikkileikkauksessakin. (Esveld 2001, s. 399) Tästä johtuen geometriaan tulee poikkeamia, jotka aiheuttavat junan kulkuun häiriöitä ja mahdollisesti rajoittavat junaliikennettä.

Esveld on luetellut kolme pääsyytä geometrian heikkenemiselle:

- 1) tukikerroksen painuminen joko tukikerroksen tai pohjamaan heikkouden johdosta
- 2) puutteet kiskojen suoruudessa
- 3) liikenteen dynaamisten kuormien vaihtelu. (Esveld 2001, s. 400)

Esveldin näkemys painottuu päällysrakenteen rooliin eikä ota huomioon, mitkä tekijät maarakenteissa ovat geometrian heikkenemistä edistäviä. Voidaan myös ajatella, että dynaamiset kuormat aiheutuvat muun muassa tukikerroksen painumisesta ja puutteista kiskojen suoruudessa, jolloin syy-seuraussuhde geometrian heikkenemisen syiden välillä jää epäselväksi.

Shentonin selitys geometrian heikkenemiselle on yllä mainittua laajempi. Hänen mukaansa geometrian heikkenemiselle on kuusi selittävää tekijää:

- 1) dynaamiset kuormat
- 2) kiskon muoto ja kunto
- 3) ratapölkkyväli
- 4) ratapölkyn tukeutumistilanne
- 5) tukikerroksen painumat
- 6) pohjamaa

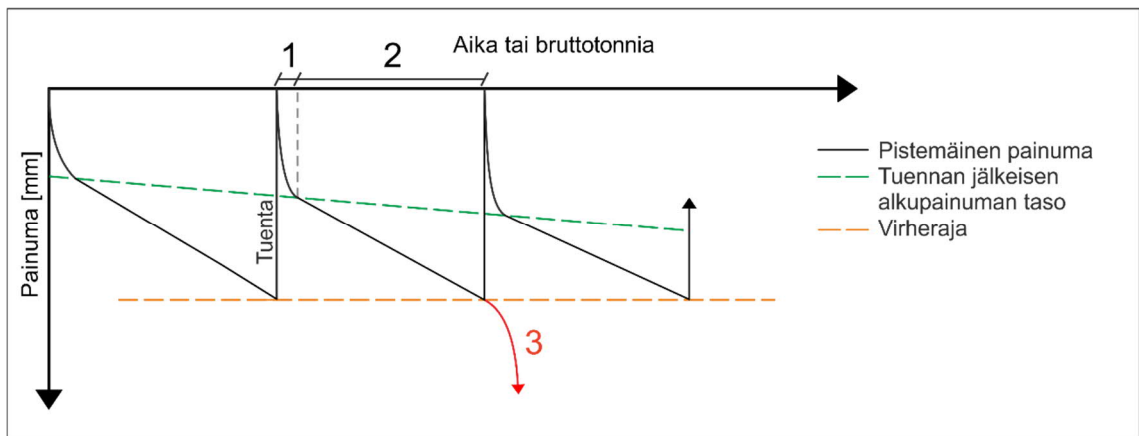
ja näiden kaikkien yhdistelmät ja yhteisvaikutukset. Shenton on myös esittänyt kantansa dynaamisten kuormien ja muiden tekijöiden väliselle suhteelle. Hänen mukaansa syyt 2–6 aiheuttavat dynaamisten kuormien lisäystä, mikäli yksikkö liikkuu kohtuullisella nopeudella. (Shenton 1985, s. 257–258) Shentonin selitys on kattava, mutta sekään ei ota kantaa, mikä maarakenteissa aiheuttaa geometrian heikkenemistä.

Maarakenteiden osalta Li & Selig esittivät, että pohjamaan ongelmat johtuvat kolmesta tekijästä:

- 1) vesi
- 2) hienorakeinen maa
- 3) kuormitus

sekä näiden yhteisvaikutuksesta (Li & Selig 1995, s. 17–18). Yhteenvetona kirjallisuuskäsitteistä voidaan todeta, että radan rakenteiden kunto sekä dynaaminen kuorma vaikuttavat radan geometrian heikkenemiseen. Vaikutussuhde näillä on kumpaankin suuntaan, eli dynaaminen kuorma heikentää rakenteiden kuntoa ja rakenteiden huono kunto aiheuttaa dynaamisen kuorman lisäystä.

Radan geometrian heikkeneminen ei ole ajan suhteen vakio, vaan radan geometrian heikkenemiselle voidaan tunnistaa kolme jaksoa. Jaksoja voidaan mitoittaa joko ajan tai bruttotonnien perusteella. Ensimmäinen jakso alkaa radan rakentamisen tai kunnossapitotoimien jälkeen. Silloin radan geometrian heikkeneminen on nopeaa, kun rata painuu liikenteen kuormituksen vaikutuksesta. Tätä seuraa toinen jakso, jossa geometrian heikkeneminen tapahtuu tasaisella melko hitaalla nopeudella. Kolmas jakso seuraa, kun radan geometria alkaa heikentyä taas nopeasti radan huonosta kunnosta johtuen. (Shenton 1985, s. 254–256, Dahlberg 2001, Lichtberger 2011, s. 393–396) Jaksollisuutta on havainnollistettu kuvassa 16.



Kuva 16. Periaatteellinen geometrian heikkenemisen jaksollisuus

Ensimmäinen jakso tulisi saada mahdollisimman lyhyeksi hyvän tukemisen ja tiivistämisen avulla. Toisen jakson pituus määrittää radan kuntoa ja se tulisi saada mahdollisimman pitkäksi. Rataa ei tulisi koskaan päästää kolmanteen jaksoon, vaan ennen sitä tulisi tehdä kunnossapitotoimenpiteitä. Kun geometria heikkenee määrätylle virherajalle, yleensä toimenpiteenä on raiteen tukeminen, jolla parannetaan raiteen geometriaa. Tukemisen jälkeen toisen jakson pituus voi olla lyhempi, mutta tukemisella saadaan radan geometrian virheet korjattua.

Huomattavaa on myös se, että geometrian palauttaminen alkuperäiselle tasolle ei varsinaisesti paranna geometriaa pitkällä aikavälillä. Tuennan jälkeinen alkupainuma kasvaa tuentakertojen myötä ja pelkän tukemisen pitkäaikaiset vaikutukset heikkenevät. Tästä ilmiöstä käytetään termiä tukikerroksen muisti (Lichtberger 2011, s. 445–446). Ilmiö johtaa lopulta siihen, että tuennan jälkeinen alkupainuman taso lähestyy virherajaa, eikä pelkällä tukemisella enää saavuteta hyötyä, vaikka sitä jatkuvasti tehtäisiin. Jotta toista jaksoa saadaan pidennettyä ja tuennan jälkeinen alkupainuman taso hallittua, täytyy poistaa varsinainen vian aiheuttaja.

Kirjallisuuden mukaan tuennallakin voidaan ylläpitää geometriaa käyttämällä niin sanottua suunniteltua ylinostoa, mutta menetelmä ei ole käytössä Suomessa. Menetelmän tarkoituksena on nostaa painumat yli tavoitellusta geometriasta, jolloin tuennan jälkeisen

alkupainuman jälkeen rata asettuu suunniteltuun geometriaan. (Lichtberger 2011, s. 447–448, Peltokangas & Nurmikolu 2015, s. 72–74)

Radan geometrian heikkenemisnopeudelle on jotakin arvioita. Esveldin mukaan radan pystygeometrian heikkenemisnopeus on:

- minimissään 1–2 mm/100 MGT (sata miljoonaa bruttotonnia)
- maksimissaan 10 mm/100 MGT. (Esveld 2001, s. 402)

Kuitenkin on vaikeaa sanoa yleistä heikkenemisnopeutta, sillä nopeus ei ole vakio ja geometrian heikkenemistä voidaan mitata ja laskea useilla eri tavoilla, joiden tulokset eroavat toisistaan. Kun puhutaan geometrian heikkenemisnopeudesta, täytyy tehdä selväksi, mitä aikaväliä ja heikkenemisen vaihetta tarkoitetaan sekä miten nopeus on laskettu. Tuntojen ja routanousun vaikutus on myös huomioitava laskennassa.

Myös kuormitustasolla voi olla vaikutusta geometrian heikkenemisnopeuteen. Sama bruttotonnimäärä voi tuottaa erilaisia muodonmuutoksia ratarakenteeseen, mikäli ylityskertoja on eri määrä eli akselipainot ovat eri suuruiset. Kuorman aiheuttamalla jännityksellä ja siitä aiheutuneella suhteellisella muodonmuutoksella ei ole lineaarista yhteyttä (Brecciaroli & Kolisoja 2006, s. 22–23).

Kuormitustasoa rautateillä määrittää kvasistaattisten akselipainojen lisäksi dynaaminen kuorma ja siksi bruttotonniinkin perusteella on vaikea selittää yksittäisen kohteen käyttäytymistä. Sama akseli voi aiheuttaa eri tasoisia jännityksiä eri kohdassa rataosaa riippuen dynaamisista kuormista. Tästä syystä geometrian heikkenemisnopeuden vertaileminen eri rataosien välillä bruttotonneissa sekä tietyllä aikavälillä on hankalaa, sillä yksittäinen akselikin kuormittaa rataa eri jännitystasolla eri tilanteissa.

Radan rakenteen heikkenemistä on pyritty kuvaamaan erilaisilla malleilla. Muun muassa Sato on esittänyt yhtälön radan rakenteen poikkeamien kasvulle julkaisussa *Japanese Studies on Deterioration of Ballasted Track* (Sato 1995). Euroopassa on kehitetty muun muassa ORE deterioration model, TU Munich settlement model sekä British Rail Research track deterioration model MARPAS. Lisätietoa radan heikkenemisen malleista on esimerkiksi artikkelissa *Some railroad settlement models—a critical review* (Dahlberg 2001). Radan heikkenemisen malleja on tehty erilaisiin käyttötarkoituksiin ja niillä on omat ominaisuutensa. Yksikäsitteistä vastausta tai mallia ratarakenteen käyttäytymisestä ei ole vakiintunut.

3.3 Radan kunnan mittaaminen

Radan kuntoa voidaan mitata joko radan geometrian perusteella tai radan rakenteellisen kunnan arvioinnin perusteella. Radan geometrian virheet kertovat jo realisoituneista ongelmista, kun taas rakenteellisen kunnan arvioinnin perusteella voidaan myös ennakoita

kehittyviä ongelmia. Tässä työssä tiedonlouhintaan on saatu dataa radan geometriamittauksista, radan taipumamittauksista, maatutkauksesta ja lasermittauksesta. Geometrian ja taipuman mittaustapoja sekä maatutkausta on käsitelty seuraavissa kappaleissa laajemmin. Muita radan kunnan mittaustapoja on esitelty yleisemmällä tasolla.

3.3.1 Radan geometrian tarkastus

Radantarkastus antaa ensikäden syötteen radan geometriavirheiden tutkimiseen. Radantarkastuksella selviää ongelmien laajuus ja kriittisyys. Yksittäisellä radantarkastuksella ei yleensä päästä käsiksi ongelmien juurisyihin, vaan niiden selvittämiseksi tarvitaan eri mittaustulosten yhdistämistä ja arviointia. Geometriavirheitä voidaan käsitellä yksittäisinä poikkeamina, raiteen aseman muutoksena tietyllä matkalla tai jaksottaisena virheenä, joka aiheuttaa herätteen liikkuvassa kalustossa (Li et al. 2016, s. 389).

Radan geometrian heikkenemistä voidaan arvioida kahdesta eri näkökulmasta. Ensimmäinen tapa on seurata radan absoluuttista geometrian kehittymistä eli absoluuttisen sijainnin muutosta. Toinen tapa on arvioida radan geometriassa esiintyvien poikkeamien suuruutta, ja niiden kehittymistä ajan suhteen. Radan geometrian tarkastus perustuu Suomessa jälkimmäiseen tapaan. Pohjimmiltaan radan poikkeamien mittaamisessa ei olla kiinnostuneita ratarakenteen varsinaisesta käyttäytymisestä, vaan kaluston käyttäytymisestä radalla. Absoluuttisessa geometrian seurannassa saadaan esille myös ne siirtymät, jotka eivät kaluston kulkuun vaikuta.

Standardeissa SFS-EN 13848-2–5 on käsitelty radan mittaamista ja tarkastamista. Radan tarkastusta voidaan standardin mukaan hyödyntää radan laadun seurantaan, kunnossapidon suunnitteluun ja radan geometriaan liittyvän turvallisuuden varmistamiseen. Radantarkastusvaunulla on tarkoitus

- mitata radan geometriaparametreja
- mitata mittauksen aikana radalla kuljettua matkaa
- yhdistää kaksi edellistä, jotta voidaan kohdentaa tarkalleen tiettyyn sijaintiin raja-arvojen ylittäviä mittaustuloksia tai muita radan ominaisuuksia
- tallentaa parametrit joko paperille tai tietokoneella luettavaan muotoon
- laskea muut geometrian parametrit (kallistuksen muutos, kaarteet) perustuen mitattuihin parametreihin
- prosessoida mitattu data, mieluusti radantarkastusvaunussa, jotta voidaan analysoida radan geometrian parametreja
- tallentaa analysoinnin tulokset, mieluusti radantarkastusvaunussa, helposti siirrettävään tietokantaan. (SFS-EN 13848-2 2006, s. 9)

Mitattujen geometriaparametrien tulisi vastata EN 13848-1 standardissa asetettuja vaatimuksia. Kaikki EN 13848-1 mukaisten parametrien mittaukset tulisi tehdä ja tallentaa

mittauksen aikana ja ne tulisi olla graafisesti tallennettuna ja analysoitavissa sijaintiperusteisesti. (SFS-EN 13848-2 2006, s. 9)

Suomessa on kansallinen ohje RAMO 13 radan päällysrakenteen tarkastuksesta. Radan tarkastusta tehdään radoilla radan liikennöitävyyden ja turvallisuuden varmistamiseksi (Liikennevirasto 2004, s. 15). Radan tarkastustarve riippuu radan kunnossapitotasosta. Radan kunnossapitotasot on jaettu kahdeksaan luokkaan 1AA–6, joissa 1AA on vaativin luokka. 1AA-kunnossapitotasolla tarkastusvaunulla ajetaan tarkastusajo kuusi kertaa vuodessa ja alhaisimmalla kunnossapitotasolla 6 tarkastusajo ajetaan pääraiteilla kaksi kertaa vuodessa ja sivuraiteilla kerran kolmessa vuodessa. Tarkastusvaunuajojen lisäksi vaaditaan kävelytarkastuksia sekä vaihdetarkastuksia. (Liikennevirasto 2004, s. 18)

Suomessa käytössä oleva radantarkastusvaunu Ttr1 51 (Emma) mittaa mittaustelioiden ja antureiden avulla raiteen asentoa sekä ajolangan sijaintia. Radantarkastusvaunun mittaustarkkuutta ei ole ilmoitettu, mutta on kerrottu, ettei tuloksissa esiinny virheiden ylikorostuneisuutta, eikä ajosuunnalla tai nopeudellakaan ole vaikutusta tuloksiin (Ratahallintokeskus 2005b, s. 16). Radantarkastusvaunu mittaa poikkeamia geometriassa suhteessa 12 metrin mittakantaansa, joka koostuu kahdesta eri akselivälisestä, 5 ja 7 metristä.

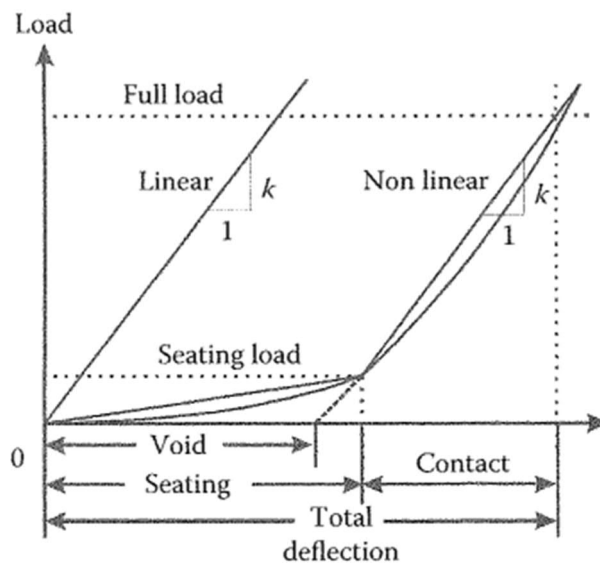
3.3.2 Jäykkyyden mittaaminen

Radan pystysuuntainen jäykkyys muodostuu radan eri rakenneosien jäykkyydestä eli kyvystä vastustaa pystysuuntaisia taipumia. Taipumat rakenneosissa aiheutuvat ylittävän yksikön aiheuttamasta kuormituksesta. (Wang et al. 2016, s. 89–90) Jäykkyyden yhteydessä käytetään yleensä termejä jäykkyys, taipuma, jousto ja palautuva painuma, jotka pohjimmiltaan kuvaavat samaa ilmiötä. Rakennustekniikassa taipumalla yleensä viitataan jonkin yksittäisen rakenneosan kuten palkin taipumaan, mutta tässä yhteydessä sillä tarkoitetaan ratarakenteen pystysuuntaista siirtymää.

Radan pystysuuntaiseen jäykkyyteen vaikuttavat kaikista eniten pohjamaan maalajit ja niiden kerrospaksuudet. Muita merkittäviä tekijöitä ovat ratapölkkyjen tukeutumistila ja joustavat elementit kuten välilevyt ja pohjaimet. (Peltokangas et al 2013, s. 179) Ratapölkkyjen tukeutumistilalla tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin kuormat siirtyvät ratapölkyn päistä tukikerrokseen. Jos tukeutumistila ei ole hyvä, ratapölkyn päiden alle voi jäädä tyhjättilaa, joka mahdollistaa ratapölkyn liikkeen kuormituksessa, mikä aiheuttaa tukikerroksen sepelin hienonemista ja geometrian heikkenemistä (Lundqvist & Dahlberg 2005).

Radan jäykkyydellä on merkittävä vaikutus ratarakenteen vaurioitumiseen. Yleisesti voidaan todeta, että jäykkä rata vaurioituu vähemmän kuin joustava rata, mutta tilanne ei ole niin yksiselitteinen. Esimerkiksi yksittäisiin ratapölkkyihin kohdistuu sitä suuremmat rasitukset, mitä jäykempi rakenne on kyseessä. Voidaankin ajatella, että paras tilanne jäykkyyden osalta saavutetaan valitsemalla optimaalinen arvo tai vaihteluväli radan kokonaisjäykkyydelle. (Peltokangas et al 2013, s. 51)

Yksittäisestä mitatusta radan taipuman arvosta on vaikea sanoa, mikä aiheuttaa joustoa radassa. Kun samasta kohtaa mitataan taipumia eri kuormitustasoilla, voidaan päätellä, onko ongelma raiteissa vai maarakenteissa. Mikäli suhteellisen pienillä kuormilla raiteeseen aiheutuu suuri taipuma, jonka jälkeen suuremmilla kuormilla taipuma on huomattavasti vähäisempää, voi olla kyse ratapölkkyjen huonosta tukeutumistilanteesta tai muista ongelmista raiteissa. Suuri, mutta tasaisesti kuormituksen mukaan kasvava taipuma viittaa taas ongelmiin rakennekerroksissa tai pohjamaassa. Kuvassa 17 on esitetty kaksi kuvaajaa, joista vasemmanpuolinen esittää tasaisesti kuormituksen mukaan kasvavaa taipumaa. Oikeanpuoleinen kuvaaja taas esittää tilannetta, jossa rakenteessa on tyhjättilaa (Void) ennen kuin rata asettuu kuormituksen alla (Seating) kuormitus alkaa rasittaa rata-rakennetta (Contact). (Li et al. 2016, s. 422–426)



Kuva 17. Kuormituksen ja taipuman välinen suhde. (Li et al. 2016, s. 424)

Jäykkyyden muutoskohdissa eli epäjatkuvuuskohdissa ratarakenne kokee suurempia kuormia kuin homogeenisen jäykkyyden alueella. Jäykkyys voi muuttua useasta syystä kuten pohjaolosuhteiden vaihtelusta, taitorakenteista tai huonosta tuennasta johtuen. Kaikkia näitä kuitenkin yhdistää se, että näihin kohteisiin syntyy usein geometriavirheitä. (Luomala et al. 2015, s. 101)

On huomattu, että geometriavirheitä voi syntyä myös paikkoihin, joissa jäykkyys ei muutu ja toisaalta geometriavirheitä ei aina havaita paikoissa, joissa on jäykkyyseroja. Radan taipumalla ja geometriavirheillä on silti vahva korrelaatio, ja yleensä ne tapaukset, joissa suoraa korrelaatiota ei ole, selittyvät kunnossapidon toimilla. Jos geometriassa ei havaita virheitä selkeän jäykkyyseron kohdalla, voi kyseessä olla vasta tehdyt kunnossapitoimet, jotka ovat palauttaneet radan geometrian oikeaan asemaan. Jos taas geometriassa havaitaan virhe, vaikkei jäykkyyseroa ole, voi tämä johtua kunnossapidossa aiheutuneesta epätasaisuudesta. (Luomala et al. 2015, s. 45–49)

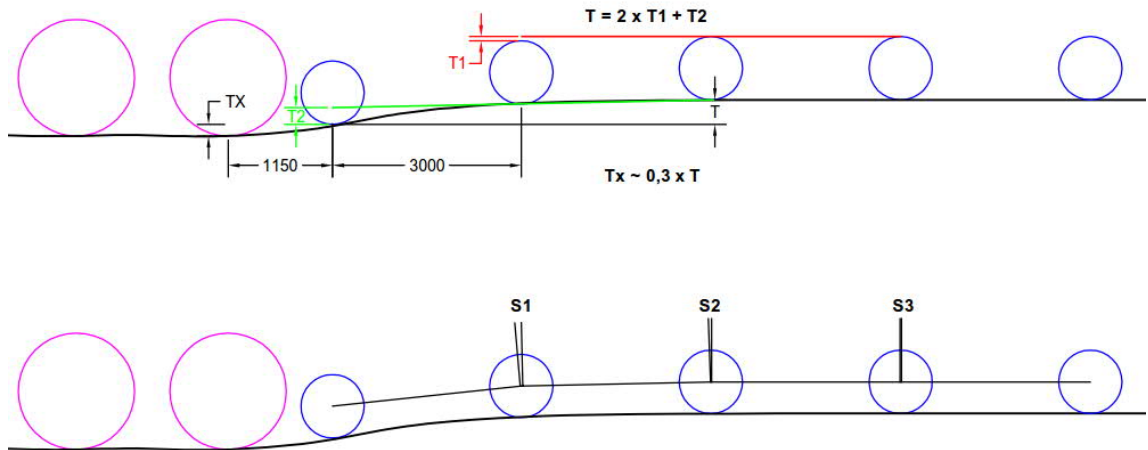
Myös radan sivuttaissuuntainen jäykkyys on tärkeä ominaisuus radalle. Radan sivuttaissuuntainen jäykkyys syntyy ratapölkyn ja tukikerroksen kitkasta ja ratapölkyn ympäröivästä tukikerrosmateriaalista. Heikko sivusuuntainen jäykkyys voi aiheuttaa raiteen äkillisen sivuttaisaseman muutoksen esimerkiksi kiskon lämpölaajenemisesta johtuvan hellekäyrän. Radan heikko pystysuuntainen jäykkyys on oleellisempaa pitemmän aikavälin stabiliteetissa enemmän kuin äkillisissä rakenteellisissa muutoksissa. (Li et al. 2016, s. 426)

Radan jäykkyyttä voidaan mitata eri menetelmillä. Menetelmät voidaan jakaa joko pistemäisiin tai jatkuviin mittauksiin. Suomessa tyypillisimmät taipuman mittauslaitteet rautateilla ovat pudotuspainolaite (pistemäinen mittaus) ja kuvassa 18 esitetty Stiffmaster (jatkuva mittaus). Muita käytössä olevia menetelmiä ovat muun muassa siirtymä- ja kiihtyvyyssanturit sekä geofonit. Radan jäykkyyden mittausmenetelmiä on esitelty laajemmin väliraportissa Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen (Peltokangas et al 2013).



Kuva 18. *Jatkuvatoiminen taipumamittauslaite Stiffmaster kiinnitettynä sepelivaunuun. (Luomala et al. 2017, s. 284)*

Tässä työssä taipuman arvot on saatu jatkuvatoimisesta mittalaitteesta Stiffmasterista. Se on Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitetty ja rakennettu laite, jolla voidaan mitata palautuvaa painumaa jatkuvalla mittauksella. Mittaus perustuu radan pystysuuntaisen geometrian mittaamiseen sekä kuormitetun akselin että kuormittamattoman akselin alla. Mittalaitteen sepelivaunuun kiinnitettävä versio koostuu viidestä omasta akselista, ja se kiinnitetään kuormittavan kaluston runkoon. Akselit ovat kolmen metrin etäisyyksillä toisistaan. Kuvassa 19 on esitetty mittalaitteen periaatekuva. (Luomala et al. 2015, s. 11–12, Luomala et al. 2017, s. 283–284)



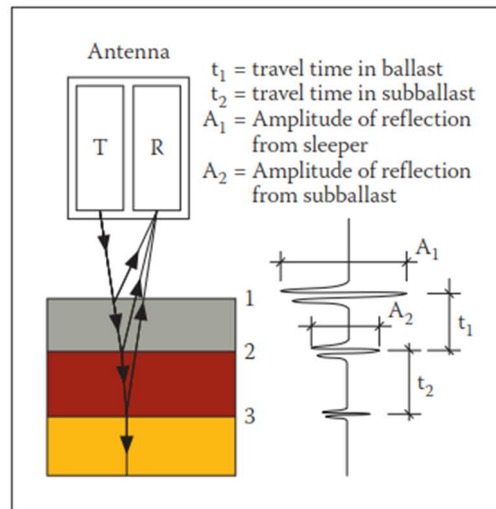
Kuva 19. Sepelivaunuun kiinnitetyn Stiffmasterin mittausperiaate. (Luomala et al. 2017, s. 284)

Mittalaite kiinnitetään liikkuvan kaluston akseliin, josta mitataan kuormitetun akselin aiheuttama painuma. Kuormitetun geometrian mittaamisessa kaksi ensimmäistä akselia toimivat referenssipisteinä, kun taas kuormittamaton geometria määritetään ensimmäisen akselin suhteena toisen ja kolmannen akselin referenssipisteeseen. Tarkemmin mittalaitetta ja sen toimintaa on käsitelty Liikenneviraston raportissa Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja arviointi sekä artikkelissa Assessment of Track Quality Using Continuous Track Stiffness Measurements. (Luomala et al. 2015, s. 12, Luomala et al. 2017)

Mittalaitteessa mittaustarkkuuteen vaikuttaa eniten laitteen kalibrointi. Mittavirhettä aiheuttavat muun muassa kaarteet, pyörien epäpyöreys ja negatiiviset taipumat vakavissa jäykkyydenvaihteluissa ja sidekiskoissa. Kaarteiden aiheuttamaa mittavirhettä on mahdollista korjata esimerkiksi laskemalla keskiarvon kahteen suuntaan tehdyistä mittauksista. Kolmen metrin mittakanta kadottaa tiettyjen aaltopituuksien vaihtelua ja korostaa toisia. (Luomala et al. 2015, s. 17–22)

3.3.3 Maatutkaus

Maatutkauksen (Ground Penetrating Radar, GPR) tarkoituksena on tuottaa tietoa rakenteen maakerroksista radiotaajuisten sähkömagneettisten aaltojen mittauksen avulla. Periaatteena on, että mittalaite lähettää rakennekerroksiin sähkömagneettisia aaltoja, jotka heijastuvat rakennekerrosrajoista, jonka jälkeen ne havaitaan vastaanottimen avulla. Kuvassa 20 on havainnollistettu mittaus- ja tulkintaprosessia. Maatutkaus on rakennetta rikkomaton menetelmä ja sen tuloksista voidaan tulkita muun muassa maakerrosrajoja, maa-ainemateriaalin vesipistoisuutta ja herkkyyttä pysyville muodonmuutoksille. Maatutkatuloksista voidaan tulkita myös routalevykohteita, rumpuja ja kallionpinnan syvyyttä. (Silvast & Nurmikolu 2015, s. 45–49, Li et al. 2016, s. 372, Saarenketo 2016, s. 1274)



Kuva 20. Maatutkan peruseriaate. (Vorster & Gräbe 2013, s. 70)

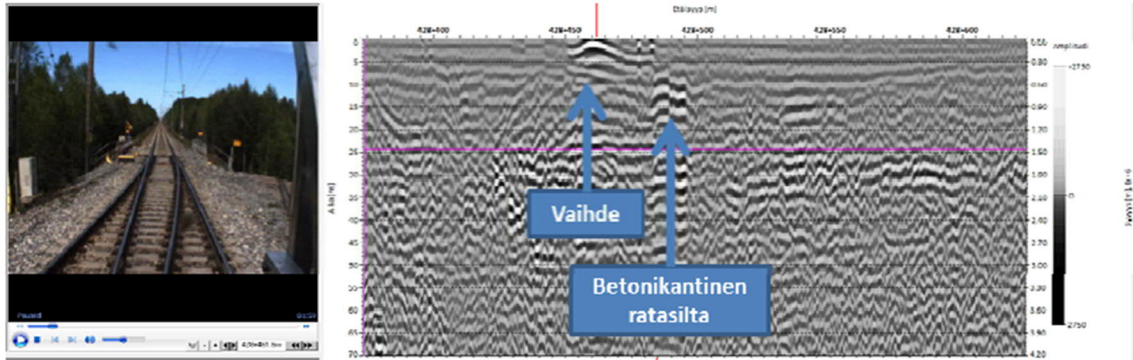
Sähkömagneettisten aaltojen heijastumiseen vaikuttaa materiaalin sähköiset ominaisuudet, jotka koostuvat magneettisesta susceptibiliteetista, sähkönjohtavuudesta ja dielektrisyydestä. Suomessa magneettista susceptibiliteettiä ei tarvitse huomioida, sillä se ei aiheuta eroja sähkömagneettisen aallon etenemiseen. (Silvast & Nurmikolu 2015, s. 11)

Sähkönjohtavuus eli väliaineen sähkönjohtokyky kuvaa vapaiden varausten liikkumista väliaineessa. Mitä suurempi sähkönjohtavuus materiaalilla on, sitä enemmän maatutkasignaali vaimenee. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että hienorakeinen materiaali vaimentaa signaalia paljon, eikä signaali pääse syvälle, kun taas karkearakeisessa materiaalissa voidaan saada arvoja syvemmältä. (Silvast & Nurmikolu 2015, s. 11)

Dielektrisyydellä kuvataan väliaineen kykyä varautua ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta eli polarisoitua. Dielektrisyyden kertoo pääasiassa maamateriaalin vapaan veden määrästä, sillä veden dielektrisyyden arvo on suuri (81) verrattuna ilman (1) tai kiinteän aineen arvoihin (3-5). (Silvast & Nurmikolu 2015, s. 11) Koska kosteuden vaikutus on määräävä dielektrisyyden mittauksissa, voivat korkeat arvot indikoida hienorakeisen materiaalin lisäksi huonoa kuivatustilannetta.

Maatutkauksessa mitataan signaalin kulkuaikaa ja heijastumista maarakenteista, joita määräävät aineen dielektrisyyden ja sähkönjohtavuus. Maatutkasignaalin taajuutta säätämällä voidaan saada dataa eri syvyyksiltä. Matalataajuisen (400 MHz) antennit mittaavat syvemmältä kuin korkeataajuiset (1000 MHz). Parhaimmillaan voidaan päästä noin 4–8 metrin syvyydelle. (Silvast & Nurmikolu 2015, s. 14–16)

Häiriöitä maatutka-aineistoon aiheuttavat muun muassa hienoaineskerrokset, metalliesineet, sekä ratarakenteet kuten kiskot, ratapölkkyt ja tasoristeykset. Maatutkatuloksissa häiriöt näkyvät selkeästi poikkeavina heijasteina (kuva 21). Maatutkatulosten lisäksi häiriölähteitä voidaan arvioida videokuvasta, jonka perusteella voidaan antaa tarkkoja selityksiä yksittäiselle häiriölle. (Silvast & Nurmikolu 2015, s. 21–23)



Kuva 21. Häiriöiden aiheuttajia maatutka-aineistossa. (Silvast & Nurmikolu 2015, s. 22)

3.3.4 Muut mittaustavat

Muita radan mittausmenetelmiä ovat muun muassa laserkeilaukset, penkereen leviämisen mittaukset, lämpötilamittaukset, ultraäänimittaukset ja kairaukset.

Laserkeilauksella voidaan saada kolmiulotteinen kuva radan ympäristöstä, joka esitetään pistepilvenä. Pistepilven avulla voidaan arvioida muun muassa ojasyvyyyksiä, aukean tilan ulottumaa tai perättäisten mittausten perusteella penkereen leviämistä. Hyvinä puolina laserkeilauksessa ovat mittauksen kattavuus ja sen tekemisen vaivattomuus. Huonoina puolina ovat työläs tulosten käsittely ja kasvillisuuden, sateen ja sumun, sähköradan ja vastaavien esteiden heikentävät vaikutukset mittatarkkuuteen. (Silvast & Nurmikolu 2015, s. 31–33)

Penkereen leviämisen seurannan avulla voidaan tarkastella penkereen deformaatiokäyttäytymistä ja siten arvioida muun muassa pohjamaan jäykkyyttä. Penkereen leviämistä voidaan arvioida esimerkiksi laserkeilauksilla ja siirtymäantureilla. Penkereen leviämisessä tuloksia saadaan pitkällä aikavälillä ja tarkimpia tuloksia saadaan pengerluiskan yläosasta. Alempana kasvillisuus voi häiritä ainakin laserkeilausta. (Kalliainen & Koli-soja 2013, s. 79)

Ultraäänitarkastuksella voidaan tarkastaa kiskojen sisäisiä vikoja. Viat havaitaan tällä menetelmällä varhaisessa vaiheessa, jolloin kunnossapitotoimet voidaan suunnitella hyvissä ajoin. Ultraäänitarkastuksen periaate vastaa kutakuinkin maatutkausta, eli menetelmä perustuu lähetettyjen ultraäänten heijastumiseen ja heijasteiden tulkintaan. Tarkastuksella voidaan tunnistaa halkeamatyyppejä ja vikojen sijainteja. (Kauppinen 2011, s. 68–79)

Maarakenteiden kunnan selvittämiseksi voidaan tehdä erilaisia pohjatutkimuksia. Rata-penkereestä voidaan myös ottaa näytteitä ja tutkia niistä laboratoriossa esimerkiksi vesipitoisuutta, humuspitoisuutta ja rakeisuutta. Kerrosrajojen selvittämisessä voidaan käyt-

tää esimerkiksi CPTU-kairausta ja siipikairauksella voidaan arvioida suljettua leikkauslujuutta hienorakeisissa maalajeissa. (Ratahallintokeskus 2005a, s. 3–7) Kairausten tekeminen ja näytteiden ottaminen on aina pistemäistä, eikä voida varmuudella sanoa, kuinka pohjaolosuhteet vaihtelevat edes muutamien metrien päässä pohjatutkimuskohteesta. Useilla pohjatutkimuksilla saadaan kuitenkin pohjaolosuhteiden vaihteluista arvio, ja pohjatutkimukset ovat varmin tapa selvittää maan rakenneominaisuuksia.

Kaikkein laadukkainta aineistoa radasta saadaan, kun yhdistetään useita eri tietolähteitä. Kun tiedetään ongelmat radan geometriassa, radan rakenteellinen kunto sekä tehdyt kunnossapitotoimenpiteet, voidaan arvioida radan kunnossapitotarpeita paljon tarkemmin kuin yksittäisten mittaustulosten tai tietolähteiden perusteella.

3.4 Geometriavirheiden korjaaminen

Kun geometriapoikkeama kasvaa yli sille sallittujen virherajojen, radan geometria tulee korjata. Suomessa on tällä hetkellä käytössä kolme virheluokkaa C, D ja *, mistä C-luokan virhe on alkava virhe, D-luokan virhe korjattava lähitulevaisuudessa ja *-luokan virhe välittömästi korjattava (Liikennevirasto 2004, s. 19). Kansainvälisessä standardissa EN 13848-5 virheluokat on jaoteltu hälytysrajan ylittäviin (AL), puuttumisrajan ylittäviin (IL) ja välittömiä toimenpiteitä vaativiin (IAL) luokkiin (SFS-EN 13848-5 2017, s. 6).

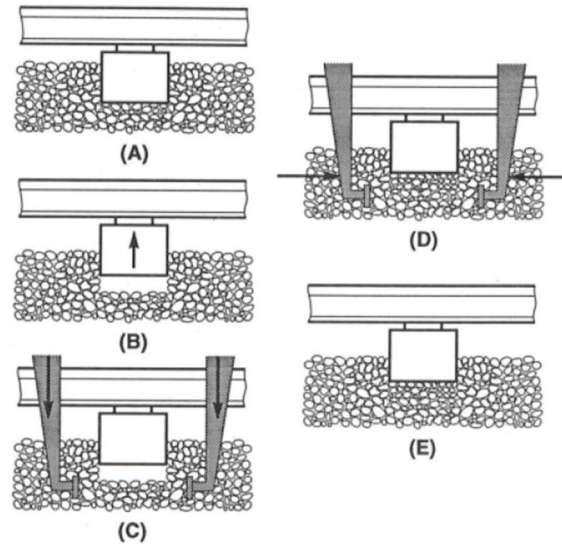
Li et al. ovat tunnistaneet kolme kunnossapitotoimenpidettä, joita käytetään radan rakenteeseen ja tuentaan liittyvien ongelmien korjaamiseen:

- 1) päällysrakenteen huoltaminen (tukeminen, kivipuhallus, stabilointi)
- 2) tukikerroksen materiaalin puhdistus
- 3) kuivatuksen parantaminen. (Li et al. 2016, s. 31)

Näiden lisäksi Suomessa käytetään pengervervityksiä ja vastapenkereitä ongelmakohteiden stabiliteetin parantamiseen. Kun kunnossapitotoimilla ei enää saada tarpeeksi hyötyjä, täytyy radalle tehdä perusparannus, jossa voidaan tehdä suurempia parantamistoimenpiteitä.

Tukeminen

Raiteen tukeminen on tyypillisin tapa korjata geometriavirhe. Raiteen tukemisessa raide nostetaan haluttuun asemaan ja raideseveli tiivistetään ratapölkkyjen ympärillä ja alla. Tukeminen ei varsinaisesti korjaa rakennetta, vaan se ainoastaan palauttaa geometrian haluttuun asentoon. (Li et al. 2016, s. 453) Tukemisen peruseräite on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Tukemisen perusperiaate. (Peltokangas & Nurmikolu 2015, s. 30)

Tuentaa tehdään pääasiassa kolmesta syystä:

- 1) uuden tai perusparannetun radan tukemistarve ja jälkituennat
- 2) laajemman rataosuuden läpituenta
- 3) geometriavirheestä johtuva kunnossapitotuenta. (Peltokangas & Nurmikolu 2015, s. 28)

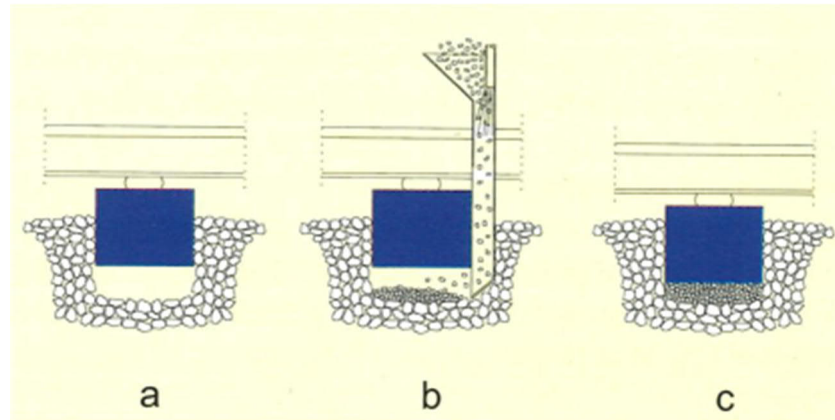
Tukemista ei tulisi tehdä tarpeettomasti, koska tuennalla on havaittu olevan haittavaikutuksia tukikerrokselle. Tuennassa tukikerroksen kiviaines rikkoutuu ja löyhtyy. Rikkoutunut kiviaines heikentää ratapölkkyjen tukeutumistilaa, kasvattaa routimisriskiä sekä lisää muodonmuutosherkkyyttä. (Peltokangas & Nurmikolu 2015, s. 11, Li et al. 2016, s. 453)

Tukemisella on havaittu olevan haittavaikutuksia myös pohjamaahan, kun rakennekerrokset ovat erittäin ohuet. Pohjamaalle voi aiheutua suurempia jännityksiä, kun jännitykset uudelleenjakautuvat tukikerroksessa tuennan vaikutuksesta. Tuennassa tukikerroksen jäykkyys voi pienentyä, kun liikenteen alla saavutettu tiiviys hävitetään, mistä seuraa jännitysten keskittymistä jäykempien kohtien kautta pienemmälle alueelle pohjamaassa. Vaikka tukikerroksen jäykkyyden heikkeneminen ei ole pitkäkestoista, voivat tiheästi toistuvat tuentakerrat aiheuttaa geometrian heikkenemisen nopeutumista, kun tukikerros on jatkuvasti löyhä. (Li 2000, s. 312–313) Tällä ilmiöllä ei pitäisi olla vaikutusta Suomen rataverkolla, koska Suomessa rakennekerrospaksuudet ovat tyypillisesti paksuja.

Stone blowing

Stone blowing eli vapaasti käännettynä kivipuhallus on menetelmä, jossa tuennassa käytetyn tiivistämisen sijaan ratapölkyn alapuolelle puhalletaan paineilmalla kiviainesta korjaamaan ratapölkyn asentoa. Tarkoituksena kivipuhalluksessa on se, ettei saavutettua tukikerroksen jäykkyyttä ratapölkynalaisen tyhjätilan alla rikottaisi, vaan tyhjätila täytetään

kiviaineksella. Tällä estetään niin sanottu tukikerroksen muisti eli tukikerroksen nopea palautuminen heikentyneeseen asemaan. (Esveld 2001, s. 369) Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Stone blowing:in eli kivipuhalluksen periaate. (Esveld 2001, s. 369)

Kivipuhalluksessa käytetyn materiaalin tulee olla tarpeeksi hienorakeista, että sitä voidaan paineilmalla puhaltaa ratapölkyn alle, mutta myös samalla tarpeeksi karkearakeista, jottei se valu raideseppelin sekaan huokosraoista. Parhaiten soveltuvaksi raekooksi on havaittu noin 12,5–17 mm. (Li et al. 2016, s. 458)

Kivipuhallus aiheuttaa paljon skeptisyyttä, sillä käytetty raekoko on noin puolet sallitusta tukikerroksen materiaalista. Ongelmana nähdään muun muassa raiteen sivuttaissuuntaisen jäykkyys, kun ratapölkkyt lepäävät pienempien kivien päällä, jotka toimivat kuin laakereina. Myös käytetyn kiviaineksen kestävyys junakuormien alla ja kuivatuksen toimivuus herättävät epäilyksiä. (Lichtberger 2011, s. 465–467)

Vanhoilla radoilla voi tosin olla jo lähtötilanteessa niin jauhaantunut tukikerros, että sepelin raekoko on lähellä kivipuhalluksessa käytettävän materiaalin raekokoa. Tässä tilanteessa kivipuhalluksesta voi olla paljon enemmän hyötyä kuin raiteen tukemisestä. Kivipuhalluksella voidaan mahdollisesti parantaa epäjatkuvuuskohtia, kun esimerkiksi sillan päädyn ulkopuolisten ratapölkkyjen alle lisätään kiviainesta löyhdyttävän tukemisen sijaan. (Li et al. 2016, s. 458–460)

Sepelinpuhdistus

Sepelinpuhdistuksessa tukikerros poistetaan, seulotaan, sekaan lisätään uutta sepeliä ja tukikerros täytetään sepelillä poistamatta päällä olevaa raidetta (kuva 24). Sepelinpuhdistus tehdään, kun tukikerroksen käyttöikä on tullut päähänsä, eikä tuennoilla enää saada raidetta pysymään asemassaan tukikerroksen jauhaantuneisuuden vuoksi. (Li et al. 2016, s. 461)



Kuva 24. Sepelinpuhdistuskone työssä. (Lichtberger 2011, s. 546)

Sepelinpuhdistus on niin iso kunnossapitotoimenpide, että se mielletään jo perusparannushankkeen piiriin (Nurmikolu & Kolisoja 2010, s. 8). Sepelinpuhdistuksessa radasta tulee irrottaa muun muassa kaikki maadoitukset, raidevirtapiirit ja baliisit. Sepelinpuhdistuksessa tulee myös huomioida mahdollisia esteitä tukikerroksessa, kuten lähelle maanpintaa aurattuja kaapeleita.

Kuivatuksen parantaminen

Hyvän kuivatuksen ylläpitäminen on yhtä tärkeää kuin tukikerroksen karkearakeisuuden ylläpitäminen. Molemmissa tapauksissa pyritään välttämään veden heikentävää vaikutusta ratarakenteessa, vaikkakin kuivatuksessa ongelmat näkyvät vasta pitkällä aikavälillä. Samoin kuin ongelmat, kuivatuksen hyödyt näkyvät vain pitkällä aikavälillä, mutta kuivatuksen vaikutus tulee selväksi perusparannuksen tarpeissa. Kuivatuksen parantamisen keinoina ovat muun muassa ojien kunnossapito ja tukkeutuneiden rumpujen avaaminen. (Li et al. 2016, s. 460–461)

Vastapenger

Vastapenger on edullinen tapa lisätä pohjamaan stabiiliteettia. Toimenpiteessä mitoitetaan tarpeeksi suuret massat olemassa olevan penkereen sivuille, jotta vaarallisin liukupinta muuttuu kauemmaksi ratapenkereestä, jolloin liukupinta pitenee ja stabiiliteetti paranee. Ongelmaksi menetelmässä voi muodostua kokonaispainumat tai sivukaltevan maaston stabiiliteetti. Vastapenger täytyy levittää riittävän laajalle alueelle ja painumat tulee laskea tarkasti etukäteen. (Tiehallinto 2003, s. 10–11) Myös kuivatukselta tulee huolehtia, ettei vastapengerä rakenneta ojan päälle tai muulle veden kulkureitille.

Oikean korjaustoimenpiteen tai -toimenpiteiden valitseminen vaatii tietämyksen siitä, miksi geometria on heikentynyt. Raidetta voidaan tukea suunniteltuun asemaan tuntematta juurisyitä, mutta geometria tulee heikkenemään nopeasti takaisin huonoon kuntoon, jollei pystytä tunnistamaan heikkenemisen aiheuttajaa ja korjata kyseistä ongelmaa.

4. TIEDONLOUHINTA

Tässä luvussa esitellään tiedonlouhinnan pääpiirteet sekä työssä sovelletun tiedonlouhinta-menettelyn ja -ohjelmiston käyttäminen. Aihetta on käsitelty pääasiassa radan mittauksista tuotetun datan tiedonlouhinnan kannalta.

4.1 Tiedonlouhinnasta yleisesti

Tiedonlouhinta, KDD (Knowledge Discovery from Data, Data mining), on tiedon etsimistä suurista määristä dataa. Tiedonlouhinta tehdään joka päivä monilla eri aloilla. Se esiintyy arjessa tutuimpana hakukoneiden käytössä. Hakukoneisiin, kuten Googleen, syötetään louhittava asia hakusanan muodossa ja hakukone louhii saatavilla olevasta datasta sopivia hakutuloksia louhinnan tekijälle. Tiedonlouhinnan avulla saadaan valtavasta datavarannosta louhinnan tekijää kiinnostavat asiat esille. Tiedonlouhintaan prosessina kuuluvat kuvan 25 mukaiset vaiheet riippumatta tiedonlouhinta-menettelmästä. (Han et al. 2011, s. 5–8)

1) Datan puhdistaminen	• Taustamelun ja ristiriitaisen datan poistaminen
2) Datan yhdistäminen	• Datan yhdistäminen eri tietolähteistä yhteen tietokantaan
3) Datan valitseminen	• Tiedonlouhintaan liittyvän datan valitseminen tietokannasta
4) Datan valmistelu	• Datan muokkaaminen formaattiin, jota tiedonlouhinta-menettelmä käyttää
5) Tiedonlouhinta	• Prosessi, jossa datasta irrotetaan kiinnostavia säännönmukaisuuksia
6) Säännönmukaisuuksien arviointi	• Kiinnostavien säännönmukaisuuksien valikointi asetettujen vertailuperusteiden mukaisesti
7) Tiedon esittäminen	• Tiedon visualisointi käyttäjälle

Kuva 25. Tiedonlouhinnan vaiheet. (Han et al. 2011, s. 6–8)

Lopputuloksena tiedonlouhinnasta saadaan käyttäjää kiinnostavaa tietoa datastaan. Käyttäjän vastuulle jää tiedon merkityksen arviointi. Tilastollinen merkityksellisyys ja kausaaliiteetit tulee arvioida itse. Jokin tulos voi olla erittäin yleinen, mutta mikäli se ei ole tilastollisesti merkittävä, tulosta ei voida välttämättä hyväksyä. Kausaaliiteetin arvioinnissa käyttäjän täytyy tietää, ovatko yhdessä esiintyvät ilmiöt toistensa syitä vai seurauksia, vai onko jokin kolmas selittävä tekijä, joka näitä yhdistää.

Esimerkkinä kausaliteetin vaikutuksesta voidaan ajatella kuvitellun tiedonlouhinnan tulokseksi, että kesäisin syödään paljon jäätelöä ja kesäisin on paljon hukkuneita. Kuitenkaan ei ole järkevää olettaa, että jäätelön syöminen johtaa hukkumiseen, vaan niillä on jokin muu yhteinen selittävä tekijä, kesä. Toisena esimerkkinä ratarakenteessa voi esiintyä geometriavirheitä paikoissa, joissa on routalevy. Voi olla, että ongelmia on pyritty korjaamaan lisäämällä routalevy, mutta vian aiheuttaja on ollut jossakin muualla rakenteessa ja ongelmat ovat jääneet. Huonon geometrian syynä ei siis välttämättä ole routalevy, vaikka routalevy ja heikko geometria esiintyisivätkin samanaikaisesti datassa. Tiedonlouhinnan tulokset eivät ole välttämättä yksiselitteisiä, vaan tapauskohtaista tulosten tulkintaa tarvitaan.

Tiedonlouhintaa voidaan tehdä erilaisista lähtökohdista. Tiedonlouhinta voi perustua esimerkiksi todennäköisyyslaskentaan, logiikkaan tai neuroverkkoihin. Todennäköisyyslaskentaan perustuvat menetelmät kuten bayesilaiset menetelmät soveltuvat sellaisen tiedon louhintaan, jossa tilastolliset jakaumat voidaan olettaa. Logiikkaan perustuvat menetelmät toimivat hyvin tiedon kuvailuun ja yleisten trendien etsimiseen. Neuroverkkoihin perustuvissa menetelmissä matemaattiselle mallille opetetaan tietty säännönmukaisuus ja malli toistaa oppimaansa säännönmukaisuutta uudelle datalle. Yhteistä kaikille on suuri datan määrä ja tarve saada tietoja siitä datasta. Puhutaankin big datasta, kun tarkoitetaan niin suuria datamääriä, ettei niitä voida luontevasti tulkita ilman koneiden apua.

4.2 GUHA-menetelmä

GUHA (General Unary Hypotheses Automaton) on menetelmä, joka luo hypoteeseja automaattisesti perustuen empiirisen dataan, ja on siten tiedonlouhintamenetelmä. GUHA:n voi kääntää vapaasti suomeksi yleinen hypoteesiautomaatti. GUHA-menetelmä perustuu logiikkaan, ja se voidaan jakaa kolmeen toimintoon: syötettävän datan määrittelyyn, koneelliseen käsittelyyn (ydintoiminto) ja tulosten esittämiseen. (Hájek & Havránek 1978, s. 302–303) GUHA-menetelmä on deskriptiivinen eli kuvaileva tiedonlouhintamenetelmä. Toisin sanoen sen tarkoituksena ei ole kertoa johtopäätöksiä tai ennustaa, vaan kuvailla louhittua dataa.

GUHA-menetelmällä tutkitaan suurta matriisimuotoista dataa, joka voi sisältää mitä tahansa symboleja. GUHA-menetelmä ei testaa dataa annettuja hypoteeseja vastaan, vaan sen sijaan se tuottaa itse hypoteeseja, joita data tukee. Täten GUHA-menetelmällä ei voida esittää suoraa kysymystä datasta, vaan menetelmän on tarkoitettu tuottaa itse kiinnostavia yhteyksiä, joita tulisi tutkia tarkemmin. GUHA-menetelmässä ei tarvitse olettaa datan tilastollisesta jakaumasta mitään, mutta tekijän pitää osata luokitella data oikein ja tulkita tuloksia. (Turunen 2010a)

GUHA-menetelmä toimii 0 ja 1 perusteella, jolloin lähtödata pitää muuttaa binääriseen muotoon esimerkiksi asettamalla data tiettyihin luokkiin. Taulukossa 2 on havainnollistettu datan muuttamista binääriseen muotoon. Binäärisen datan avulla voidaan määrittellä, onko arvo tosi (1) vai epätosi (0). (Turunen 2010b)

Taulukko 2. Absoluuttisten arvojen muuttaminen binääriseen muotoon. (Muokattu lähteestä: Hájek & Havránek 1978, s. 304)

Mittauspiste	Taipuman arvo	Taipuma < 1,0 mm	Taipuma 1,0–2,0 mm	Taipuma > 2,0 mm
A	0,9	1	0	0
B	1,3	0	1	0
C	1,4	0	1	0
D	1,8	0	1	0
E	2,2	0	0	1

GUHA-menetelmässä laskenta perustuu siihen, että löydetään kaikki mahdolliset, mutta vain tärkeät hypoteesit. Tämä aiheuttaa haasteita tulosten löytämiseksi, sillä nämä ehdot poissulkevat toisensa: jos löydetään kaikki, löydetään jotain muutakin kuin tärkeät. GUHA-menetelmässä hyödynnetään yleistettyjä kvanttoreita, joilla tulokseksi saadaan hypoteeseja, jotka ovat esimerkiksi muotoa *melkein kaikki*, *useimmat* tai *huomattavan erilainen osajoukko*. (Hájek & Havránek 1978, s. 301–303, Järvenpää & Turunen 2012, s. 2)

Tuloksena saatuja hypoteeseja ei ole verifioitu, vaan data ainoastaan tukee niitä. Tässä vaiheessa tiedonlouhinnan tekijän tulee käyttää omaa harkintakykyään valitakseen pätevät hypoteesit. Tähän liittyy erityisesti jo aiemmin mainittu kausaliteetti. Tekijän vastuulla on arvioida saadut hypoteesit tilastollisesti merkittäviksi ja myös järkeviksi muiden tutkimusten ja soveltuvien teorioiden avulla. (Turunen 2010a)

Tässä työssä käytetty matriisimuotoinen data on rakennettu siten, että jokainen rivi vastaa yhtä metriä radassa. Tällä metrin osuudella on eri ominaisuuksia, jotka on esitetty eri sarakkeissa (kuva 26). Esimerkiksi kuvassa 26 maalatun rivin data kertoo, että radassa on siinä kohtaa metrin mittainen osuus rataa, jonka korkeuspoikkeamasta 20 metrin laskentapituudella lasketun R^2 -arvon kasvu on $0,512 \text{ mm}^2/\text{a}$, ojasyvyys kummallakin puolen on noin 1,7 m, suhteellinen alusrakennekosteus on 23,15 ja niin edelleen. Näiden arvojen perusteella tiedonlouhinta testaa, sopiiko rivi hypoteesiin vai ei ja esittää ne hypoteesit, joihin on löytynyt riittävästi hypoteesia puoltavia rivejä.

Countm	KP_R2_20m	KP_R2_50m	KP_SD_20m	VO10mMin	OO10mMin	AIRakKost	PohjKost	Kallistus	Routeeri	Vaihde	Siita	MaaKallioLeik	Epajatkv	TukiPaks	AIRakPaks	PengerPaks	Maapaks
97477	0,678	0,402	0,305	-1,58	-1,575	2,03	1,46	1,1	0	0	0	4	0	0,572	1,01	0,786	2,368
97478	0,568	0,395	0,255	-1,585	-1,588	4,3	1,92	1,1	0	0	0	4	0	0,57	1,007	0,793	2,37
97479	0,582	0,396	0,261	-1,585	-1,595	7,5	2,76	1,1	0	0	0	4	0	0,566	1,005	0,798	2,369
97480	0,741	0,389	0,333	-1,585	-1,632	10,7	3,6	1	0	0	0	4	0	0,562	1,003	0,804	2,369
97481	0,701	0,385	0,323	-1,585	-1,637	13,9	4,44	0,9	0	0	0	4	0	0,561	1,02	0,795	2,376
97482	0,606	0,378	0,277	-1,585	-1,657	17,1	5,28	0,9	0	0	0	4	0	0,56	1,036	0,787	2,383
97483	0,613	0,369	0,276	-1,585	-1,676	19,34	6,44	1	0	0	0	4	0	0,561	1,052	0,784	2,397
97484	0,602	0,383	0,271	-1,585	-1,676	20,62	7,92	0,9	0	0	0	4	0	0,563	1,067	0,788	2,418
97485	0,592	0,388	0,278	-1,589	-1,677	21,9	9,4	0,9	0	0	0	4	0	0,565	1,083	0,791	2,439
97486	0,482	0,385	0,233	-1,61	-1,685	23,18	10,88	0,8	0	0	0	4	0	0,562	1,079	0,808	2,449
97487	0,513	0,39	0,234	-1,661	-1,693	24,46	12,36	0,7	0	0	0	4	0	0,56	1,074	0,824	2,458
97488	0,512	0,311	0,234	-1,664	-1,703	23,15	13,01	0,7	0	0	0	4	0	0,561	1,073	0,836	2,47
97489	0,513	0,332	0,235	-1,719	-1,713	19,25	12,83	0,7	0	0	0	4	0	0,565	1,076	0,842	2,483
97490	0,483	0,362	0,23	-1,719	-1,713	15,35	12,65	0,8	0	0	0	4	0	0,57	1,078	0,848	2,496
97491	0,496	0,366	0,249	-1,719	-1,717	11,45	12,47	0,8	0	0	0	4	0	0,573	1,068	0,885	2,526

Kuva 26. Ote louhittavasta datasta.

4.3 LISp-Miner-ohjelmisto

LISp-Miner on GUHA-menetelmään perustuva Prahan kauppakorkeakoulussa (University of Economics, Prague) kehitetty tiedonlouhintaohjelmisto. (Simunek & Rauch) LISp-Miner-ohjelmistoon on yhdistetty kuusi eri GUHA-laskentamoduulia, joista kolmea on käytetty tämän työn tiedonlouhinnoissa. Tässä työssä käytetyt laskentamoduulit ovat 4ft-Miner, SD4ft-Miner ja Ac4ft-Miner.

4ft-Miner-moduuli esittää datasta niitä tekijöitä (attribuutteja), jotka esiintyvät useimpien yhdessä, kun saadaan haluttu tulos (succedent) määriteltyjen ehtojen puitteissa määrättyllä yleistetyllä kvanttorilla. Kvanttoreita ovat esimerkiksi keskiarvoista suurempi riippuvuus, keskiarvoista pienempi riippuvuus ja toivottujen ja ei-toivottujen tulosten suhde.

SD4ft-Miner-moduulilla (*Set Differs from set*) voidaan etsiä toisistaan selvästi erottuvia osajoukkoja. Tämän avulla voidaan tutkia, miten asiat vaikuttavat saman lopputuloksen yleisyyteen. Ac4ft-Miner-moduulilla (*Action*) voidaan tutkia samanlaisten joukkojen käyttäytymistä, kun yhtä asiaa muutetaan. Moduulilla saadaan selville yksittäisen tekijöiden muutoksien vaikutukset muuten vakiona pysyvässä joukossa.

LISp-Miner:in tiedonlouhinnan tekemiseen kuuluvat pääperiaatteiltaan seuraavat vaiheet:

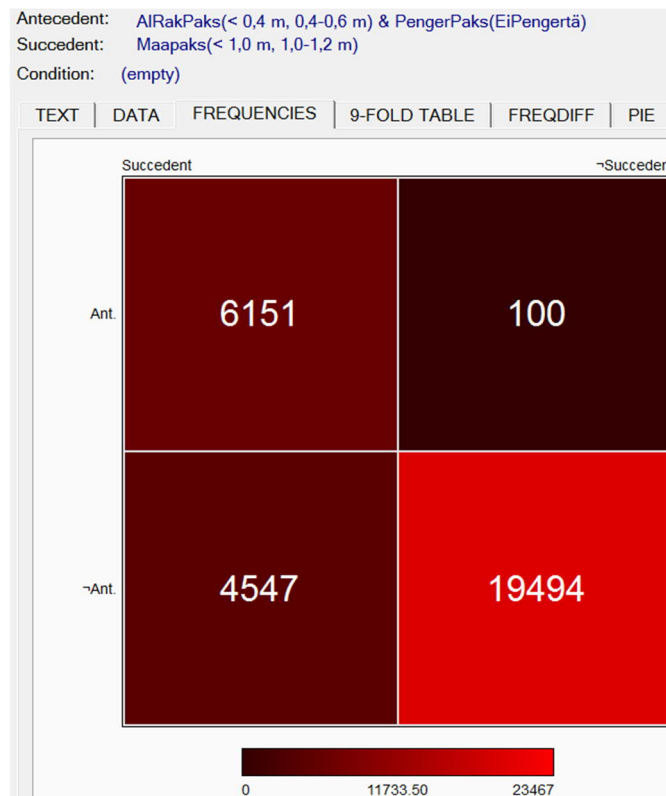
- 1) Käsitellään data, jotta sitä voi louhia: muoto, rajat, luokat.
- 2) Asetetaan Antecedent-muuttujaksi sellainen tekijä, jonka vaikutusta halutaan tutkia. Näitä voidaan valita useita ja kiinnittää toisiinsa parametreilla esim. ”ja” ”tai”.
- 3) Asetetaan Succedent-muuttujaksi sellainen tekijä, joka halutaan seuraukseksi.
- 4) Päätetään, kuinka pienellä osajoukolla on merkitystä eli Base-arvo.
- 5) Valitaan yleistetty kvanttori eli se, millä perusteella päätetään, onko riittävän suuressa osajoukossa tietyn verran haluttuja tapauksia.

LISp-Miner:issa voidaan asettaa myös ehtoja, esimerkiksi jonkin yksittäisen attribuutin on oltava mukana louhinnassa. Tällä tavoin voi rajata louhintaa helposti esimerkiksi vain kallioleikkauksille, suuren geometrian heikkenemisnopeuden aluille tai muille kiinnostaville kohteille.

Tuloksina saadut hypoteesit esitetään ensin listana, jossa merkittävin tulos esitetään ylimpänä. Kun yksittäisen hypoteesin avaa, näkee sen kontingenssitaulukon eli nelitaulukon. Kontingenssitaulukko on tiedonlouhinnan tulos. Kontingenssitaulukkoa luetaan siten, että:

- vasen ylänurkka kertoo niiden yksittäisten louhittavien rivien lukumäärän, jossa kaikki ennakkoehdot (Antecedent) sekä seuraukset (Succedent) ovat toteutuneet
- oikea ylänurkka kertoo niiden yksittäisten louhittavien rivien lukumäärän, jossa kaikki ennakkoehdot ovat toteutuneet, mutta seuraus on ollut jotakin muuta kuin haluttu
- vasen alanurkka kertoo ne arvot, joissa ennakkoehdot eivät ole täysin toteutuneet, mutta lopputulos on ollut silti halutun mukainen
- oikea alanurkka kertoo ne arvot, joissa ennakkoehdot eivätkä seuraukset ole toteutuneet.

Käsitellään esimerkkinä erään hypoteesin kontingenssitaulukon (kuva 27) tulkinta. Tiedonlouhinta hypoteesin takana on tarkoituksella tehty mahdollisimman yksinkertaisesta asiasta. Tästä syystä hypoteesista saatavat tiedot ovat itsestäänselvyyksiä.



Kuva 27. LISp-Miner:issa hypoteesista esitettävä kontingenssitaulukko.

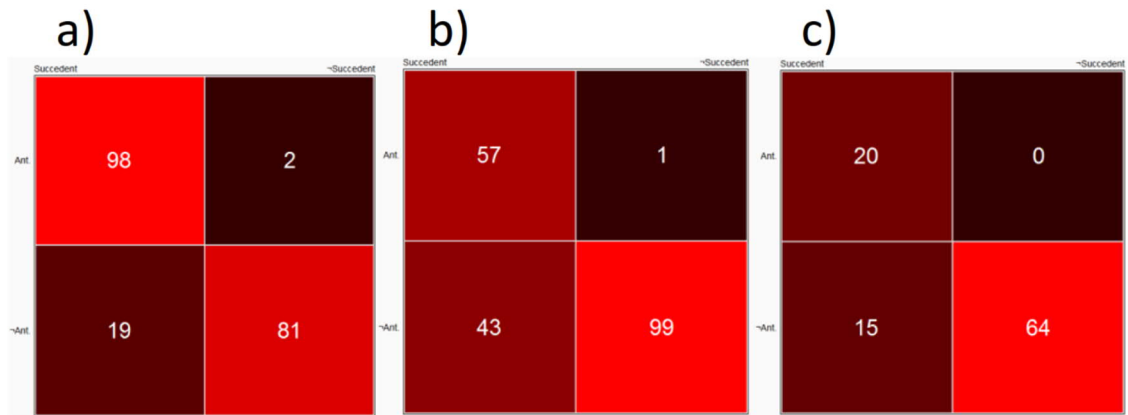
Hypoteesissa kerrotaan, että ennakkoehtoina (Antecedent) ovat alusrakenteen alle 0,6 metrin paksuus ja se, ettei rakenteessa ole pengertä. Seurauksena (Succedent) hypoteesissa on, että ratarakenteen maarakenteiden paksuus on alle 1,2 metriä. Rajauksia (Condition) ei ole annettu.

Ylärivin luvut kertovat, että datassa on yhteensä 6 251 (6 151 + 100) yksittäistä riviä, joissa ennakkoehdot toteutuvat. Kun louhittua dataa on metrin välein, on ehdot täyttävää homogeenistä rataa yhteensä saman verran eli 6 251 metriä. Näistä 6 251 metrillä homogeenista rataa 6 151 metrillä maarakenteiden paksuus on ollut alle 1,2 metriä ja 100 metrillä jotain muuta kuin alle 1,2 metriä. Tuloksista ei voida suoraan tulkita, mitä muut 100 metriä sisältävät, jolloin arvot voivat olla hyvin lähellä tai hyvin kaukana 1,2 metrillä.

Alarivin luvut kertovat niistä tapauksista, joissa ennakkoehdot eivät ole toteutuneet. Datassa on 24 041 metriä (4 547 m + 19 494 m) rataa, joissa ennakkoehdot eivät ole toteutuneet, eli valtaosa radasta ei täytä hypoteesin ennakkoehtoja. Radasta, joka ei täytä jollain tapaa ennakkoehtoja, 4 547 metrillä rakennekerrosten paksuus on silti alle 1,2 metriä. Sellaista rataa, jossa jotkin ennakkoehdot eivät ole toteutuneet ja rakennekerrosten paksuus on jotain muuta kuin alle 1,2 metriä, on 19 494 metriä.

Tyypillisesti alarivillä on enemmän ratametrejä kuin ylärivillä. Tämä johtuu siitä, että homogeenista rataa on hyvin vähän usean ehdon toteutuessa. Esimerkkihypoteesissa on kaksi hyvin yleistä ennakkoehtoa ja silti ennakkoehdot täyttävää rataa on vain 21 %. Kun ehdot sisältävät muuttujia, jotka käsittävät vain pienen osan radasta, on luonnollista, ettei valtaosa radasta täytä kyseisiä ehtoja. Hypoteeseihin voidaan vaikuttaa muuttamalla ennakkoehtojen tekijöitä, niiden luokkia, merkitsevän osajoukon kokoa tai louhinnan kvantoreita.

Kontingenssitaulukon tietoja voidaan esittää myös suhteellisina arvoina. Suhteellisia arvoja voidaan esittää riveittäin, sarakkeittain tai esimerkiksi summana (kuva 28). Ylärivin arvoista 98 % kuuluu seurausten mukaiseen rataan, eli maarakenteiden paksuus on alle 1,2 metriä. Alarivillä vastaava luku on 19 %. On siis erittäin paljon yleisempää, että ennakkoehtojen mukaisella radalla maarakenteiden paksuus on alle 1,2 kuin muualla rataosalla.



Kuva 28. Tiedonlouhinnan tulokset ilmoitettuna suhteellisina lukuina a) riveittäin b) sarakkeittain c) summana.

Sarakkeittain jaoteltuna huomataan se, että 43 % alle 1,2 metrin paksuisista rakenteista johtuvat muista syistä kuin ennakkoehdoista. Muihin kuin alle 1,2 metrin paksuisiin maarakenteisiin johtaa vain 1 % ennakkoehtojen mukaisesta radasta, kun sitä verrataan muuhun rataa. Suhteellisten summien perusteella nähdään, että valtaosalla radasta (64 %) ennakkoehdot eivät jollain tapaa toteudu, eikä maarakenteiden paksuus ole alle 1,2 metriä.

Esimerkin osalta voidaan todeta että, rata, jota ei ole rakennettu penkereelle ja jonka alusrakennepaksuus on alle 0,6 metriä, johtaa lähes aina alle 1,2 metrin maarakenteiden paksuuteen. Tuloksesta voidaan tulkita, että on myös tapauksia, joissa tukikerroksen paksuus on ohuella rakenteella niin suuri, että maarakenteiden paksuus on yhteensä yli 1,2 metriä, vaikka pengertä ei ole ja alusrakenne on alle 0,6 metrin paksuinen. Vaikka tukikerrosta ei ole millään tavalla mainittu hypoteesissa, se on ainoa puuttuva palanen, kun on mainittu maarakenteiden yhteispaksuus, alusrakenteen paksuus ja se, ettei pengertä ole. Kun tarkastellaan dataa hypoteesin taustalla, huomataan, että oletamus oli oikein, sillä niillä 100 metrillä ennakkoehdot täyttävästä radasta, jonka maarakenteiden paksuus ei ole alle 1,2 metriä, tukikerroksen paksuus on erittäin suuri. Kuvassa 29 on esitetty hypoteesin taustalla ollutta dataa, jossa vihreä väri edustaa hypoteesia tukevia rivejä ja punainen niitä kumoavia. Muut rivit edustavat niitä paikkoja, joissa ennakkoehdot eivät ole toteutuneet.

Antecedent: AIRakPaks(< 0,4 m, 0,4-0,6 m) & PengerPaks(EiPengertä)
 Succedent: Maapaks(< 1,0 m, 1,0-1,2 m)
 Condition: (empty)

TEXT	DATA	FREQUENCIES	9-FOLD TABLE	FREQDIFF	PIE	BAYES
#	A	S	AIRakPaks	PengerPaks	Maapaks	TukiPaks
510	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
511	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
512	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
513	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
514	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
515	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
516	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
517	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
518	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
519	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
520	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
521	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
522	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
523	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	< 1,0 m	> 650 mm
524	1	1	< 0,4 m	EiPengertä	1,0-1,2 m	> 650 mm
525	1	1	0,4-0,6 m	EiPengertä	1,0-1,2 m	> 650 mm
526	1	1	0,4-0,6 m	EiPengertä	1,0-1,2 m	600-650 mm
527	1	1	0,4-0,6 m	EiPengertä	1,2-1,4 m	> 650 mm
528			0,6-0,8 m	EiPengertä	1,2-1,4 m	> 650 mm
529			0,6-0,8 m	EiPengertä	1,2-1,4 m	> 650 mm
530			0,6-0,8 m	EiPengertä	1,2-1,4 m	> 650 mm
531			0,6-0,8 m	0,5-1,0 m	2,0-2,2 m	> 650 mm
532			0,6-0,8 m	0,5-1,0 m	2,0-2,2 m	600-650 mm
533			0,8-1,0 m	0,5-1,0 m	2,0-2,2 m	600-650 mm
534			0,8-1,0 m	0,5-1,0 m	2,0-2,2 m	600-650 mm
535			0,8-1,0 m	0,5-1,0 m	2,2-2,4 m	550-600 mm
536			0,8-1,0 m	0,5-1,0 m	2,2-2,4 m	550-600 mm
537			0,8-1,0 m	0,5-1,0 m	2,2-2,4 m	500-550 mm
538			0,8-1,0 m	0,5-1,0 m	2,2-2,4 m	500-550 mm
539			0,8-1,0 m	0,5-1,0 m	2,2-2,4 m	500-550 mm
540			0,8-1,0 m	0,5-1,0 m	2,2-2,4 m	550-600 mm
541			0,8-1,0 m	0,5-1,0 m	2,2-2,4 m	550-600 mm

Kuva 29. Hypoteesin taustalla olevan datan tulkintaa LISP-Miner –ohjelmassa.

Toinen tulkinta hypoteesista on se, että vaikka ennakkoehtojen mukainen rata johtaa lähes aina alle 1,2 metrin maarakenteiden paksuuteen, kuitenkin vähän alle puolet alle 1,2 metrin paksuisista maarakenteista muodostuvat jostain muusta kuin ennakkoehtojen mukaisesta radasta. Yksinkertaistettuna tämä tarkoittaa sitä, että ennakkoehtojen mukainen rata johtaa lähes aina haluttuun seuraukseen, mutta haluttu seuraus toteutuu usein muistakin syistä kuin ennakkoehtoista. Tämän tiedonlouhinnan tuloksena saatiin useampia saman tyyppisiä hypoteeseja.

Tulosten tietoarvo on hyvin vähäinen ja esimerkin tarkoituksena oli ensisijaisesti osoittaa tiedonlouhinnan tulosten tulkintaa mahdollisimman yksinkertaisella tapauksella. Yleensä louhinnoissa etsitään radan geometrian heikkenemiseen tai muuhun ominaisuuteen johtavia arvoja, eikä näin yksinkertaisia hypoteeseja ole raportoitu myöhemmin.

Käyttäjän vastuulla on valita sopiva näkökulma, arvioida tulos tilastollisesti ja todistaa se soveltuvan teorian avulla järkeväksi. Tulosta tulee tarkastella eri näkökulmista, jotta saadaan kokonaisvaltainen kuva siitä, mitä tulos tarkoittaa. Kuten edellä mainittu esimerkki osoittaa, tiedonlouhinnan tulos (kontingenssitaulukko) ei kerro vielä kaikkea, vaan tulosta täytyy analysoida ja tulkita. Tämä vaatii tietämystä sekä louhittavasta ilmiöstä että tiedonlouhinnasta.

4.4 Tiedonlouhinnan soveltaminen radan kuormituskestävyyteen

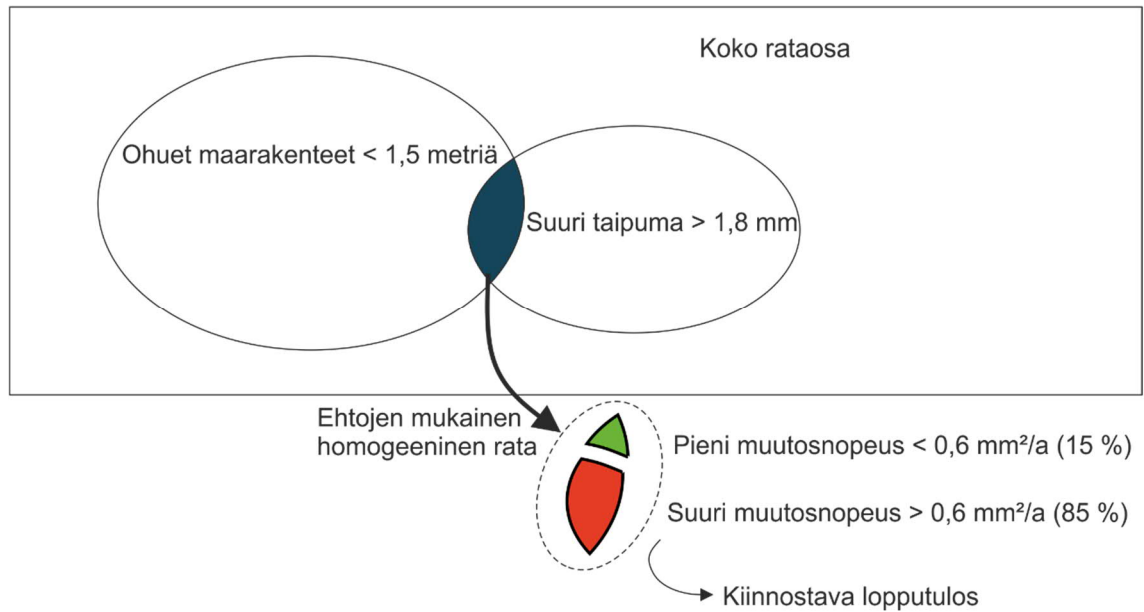
Rautatiet ovat mielenkiintoinen tiedonlouhinnan kohde, sillä niistä on paljon erityyppistä dataa, jota voi olla hankala tulkita pelkästään ihmisvoimin. Ratarakenteessa on monimutkaisia vaikutussuhteita ja monet asiat toimivat yhdessä. Radoista on myös määrällisesti paljon mittausdataa, mikä luo hyvän pohjan tiedonlouhinnan lähtödatalle.

GUHA-menetelmä soveltuu radan kuormituskestävyyden tutkimiseen hyvin siksi, että se ei perustu todennäköisyyslaskentaan, jolloin ei tarvitse tietää datan tilastollista jakaumaa. Toistaiseksi tällaisia oletuksia ei voida tehdä, jolloin menetelmä luo hyvät edellytykset tiedonlouhintaan. Neuroverkkojen käyttö taas on erittäin monimutkaista ja lopputulosten selitettävyyden on vaikeaa.

Datan jakaminen luokkiin soveltuu hyvin kuormituskestävyyden tiedonlouhintaan. Esimerkiksi jokainen taipuman arvo voisi periaatteessa olla oma luokkansa, jota louhitaan. Tämä kuitenkin ei ole tarpeen, sillä yleensä halutaan tietää, onko arvo suuri, pieni vai jotain siltä väliltä. Luokkien käyttämisellä vältytään myös huippuarvojen korostumiselta, eikä mittaustarkkuudella ole niin suurta roolia.

GUHA-menetelmä voi antaa suuntaa sille, mitä radan kuormituskestävyydestä pitäisi tutkia. Mikäli aina samat asiat esiintyvät tiedonlouhinnan tuloksissa tietyn geometrian heikkenemisnopeuden kanssa yhdessä, niitä tulisi tutkia tarkemmin. Pelkällä GUHA-menetelmällä ei voida antaa tai ainakaan ei tulisi antaa suoria vastauksia siitä, miksi ratarakenne heikkenee.

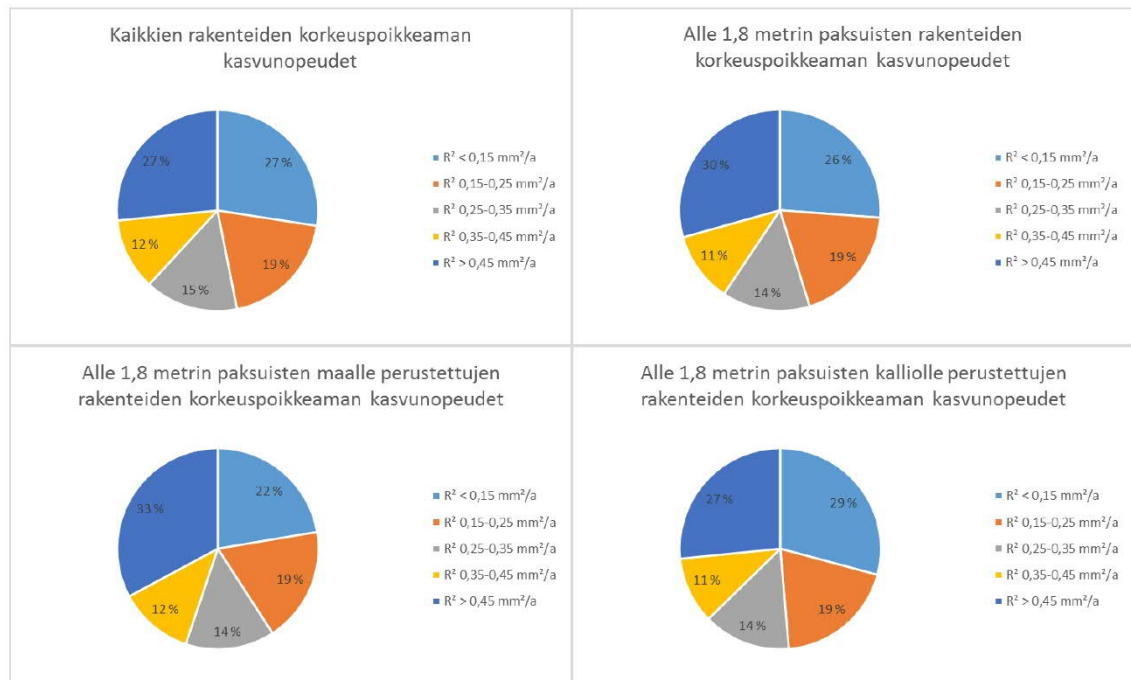
Tiedonlouhintaan ja etenkin sen tuloksiin täytyy asennoitua oikein, jotta tiedonlouhinnasta voi tehdä johtopäätöksiä. Tulokset koskevat yleensä hyvin pientä osaa radasta, josta suuri osa käyttäytyy tietyllä tavalla. Jos ajattelee koko rataosan kannalta, että esimerkiksi 300 metriä radasta käyttäytyy aina tietyllä tavalla 29 kilometrin matkalla, voivat tulokset tuntua merkityksettömiltä. Tässä täytyy pitää mielessä, että tulokset kuvastavat vain tietynlaisen radan käyttäytymistä. Toisin sanoen 29 kilometrin matkalta valitaan uusi kokonaisuus, joka kuvastaa sellaista homogeenista rataa, jonka käyttäytymisestä ollaan kiinnostuneita. Rakenteet ja radan ominaisuudet vaihtelevat paljon varsinkin vanhoilla radoilla, jolloin koko radasta tietynlainen homogeeninen rata vastaa lähtökohtaisesti vain pientä osaa. Kuvassa 30 on havainnollistettu tätä.



Kuva 30. Esimerkki tiedonlouhinnan rajaamasta homogeenisesta radasta.

Kuten kuvassa 30 esitetään, yleensä radasta hyvin marginaalinen osa täyttää ne ehdot, joita sille on annettu, vaikka ehtoja olisikin vähän. Tästä ehtojen mukaisesta homogeenisesta radasta on saatu tulos, että se useimmiten johtaa tiettyyn lopputulokseen. Sen jälkeen asiaa tarkastellaan useista näkökulmista ja testataan myös käännteisten ennakkoehtojen lopputulokset. Tämän jälkeen voidaan vetää johtopäätöksiä siitä, onko tiedonlouhinta tuottanut järkevän tuloksen. Hyväksytyyn tiedonlouhinnan lopputuloksen perusteella voidaan arvioida kausaliteettia ja taustateoriaa ilmiölle maarakenteiden puolelta.

GUHA-tiedonlouhinnalla ei ole tarkoituksenmukaista louhia erittäin yksinkertaisia asioita. Esimerkiksi geometrian heikkenemisnopeuden selittäminen pelkällä maarakenteiden paksuudella sujuu parhaiten taulukko-ohjelmalla, eikä niinkään tiedonlouhintaohjelmistolla. Kuvissa 31 a-d on esitetty Excelissä lasketut jakaumat korkeuspoikkeaman kasvunopeuksista rantaradan esimerkikohteessa koko datasta, alle 1,8 metrin paksuisilla rakenteilla ja alle 1,8 metrin paksuisilla rakenteilla jaoteltuna maaperustukselle tai kallio-
perustukselle.



Kuva 31. Korkeuspoikkeaman kasvunopeudet rantaradan esimerkkijaksolla a) koko datasta b) < 1,8 metrin paksuisilla rakenteilla c) alle 1,8 paksuisilla rakenteilla, jotka ovat maaperustuksella d) alle 1,8 paksuisilla rakenteilla, jotka ovat kallioperustuksella.

Kuvista 31 a-d nähdään, että koko datasta ja ohuilla rakenteilla on hyvin vähän eroa prosentuaalisissa arvoissa. Eroja löytyy, kun tarkastellaan alle 1,8 metrin paksuisia rakenteita jaoteltuna maaperustukselle tai kallioperustukselle. Nähdään, että kalliolle perustettujen radan korkeuspoikkeaman kasvunopeudet ovat tyypillisesti pienempiä kuin maalle perustettujen radan. Kun tulokset yhdistetään, alle 1,8 metriä paksut rakenteet vaikuttavat käyttäytyvän kuten koko rata yleensäkin käyttäytyy.

GUHA-tiedonloushinta antaa vastauksen niistä tapauksista, joissa lopputulos on joko tiettyssä luokassa tai jossakin (missä tahansa) muussa luokassa. Jos halutaan tulos, jossa lopputulos on yleisempää kuin muut tulokset, ei esimerkiksi pelkällä rakennepaksuuden loushinnalla saataisi yhtäkään hypoteesia kuvien 31 a-d perusteella. Tämä johtuu siitä, että luokat ovat melko samankokoisia ja eroja niissä on hyvin vähän eri tilanteissa. Mikäli näin yleisiä kysymyksiä haluttaisiin esittää, täytyisi tekijät jaotella erittäin karkeisiin luokkiin. Kysymyksen täytyy olla riittävän tarkka ja ennakkoehtoja sekä luokkia riittävän monta, jotta tiedonloushintaa on järkevää tehdä ja siitä saadaan järkeviä tuloksia.

Aiemmin on pyritty ennustamaan radan geometrian heikkenemistä tiedonloushinnan avulla. (Guler et al. 2011, Vale & Lurdes 2013, Andrade & Teixeira 2015) Geometrian heikkenemisen ennustaminen on hyödyksi ennakoivan kunnossapidon suunnittelussa ja optimoinnissa. Tämä on kuitenkin hieman kyseenalainen lähtötilanne, jollei pyritä tutkimaan niitä syitä, miksi radan geometria heikkenee, vaan arvioidaan ainoastaan heikkenemisen kehittymistä.

5. RADAN KUORMITUSKESTÄVYYDEN ARVIOINTI TIEDONLOUHINNAN AVULLA

Työssä tehty tiedonlouhinta ja siihen liittyvät toimenpiteet on esitetty tässä luvussa. Tiedonlouhinta edeltävä lähtödataan perehtyminen ja sen käsittely ovat erittäin tärkeä vaihe tiedonlouhinnassa. Ennen tiedonlouhinta tehty virheet kertaantuvat tiedonlouhinnassa, joten lähtötietojen käsittelyyn on kiinnitetty erityistä huomiota. Tiedonlouhinnassa esitetyt kysymykset sekä saadut tulokset on myös raportoitu tässä luvussa.

5.1 Tutkimuskohteet

Tiedonlouhinta varten lähtötietoja oli kahdelta tutkimuskohteelta, Karjaa–Ervelä-rataosuudelta sekä Kouvola–Kotka-rataosalta. Karjaa–Ervelä-välin ja Kouvola–Kotka-välin data louhittiin rinnakkain ja vasta lopuksi verrattiin tarkemmin saatuja tuloksia. Saatavilla olevassa datassa oli eroja kohteiden välillä. Kotkasta oli tehty kattavammin analyyskejä ratarakenteesta, mutta kunnossapitohistoria puuttui ja radantarkastusvaunun dataa oli vain muutamalta vuodelta.

Merkittäviä ratateknisiä eroja tutkimuskohteiden välillä on pohjamaan ja kalliopinnan vaihteluissa. Karjaa–Ervelä-rataosuus on erittäin vaihtelevaa pohjaolosuhteiltaan ja homogeenistä rataa on lopulta melko vähän. Tällä välillä on useita tunneleita ja kallioleikkauksia, joiden välissä on pehmeikköjäkin. Kouvola–Kotka-rataosa on taas paljon homogeenisempi, eikä kyseisellä osuudella ole tunneleita. Kouvola–Kotka-välin tavaraliikenteen bruttotonnimäärä oli vuonna 2016 10,3 MGT, mikä on yli kolme kertaa enemmän kuin Karjaa–Ervelä-välillä (Liikennevirasto). Kouvola–Kotka-rataosa on myös lähes kaksi kertaa pidempi kuin Karjaa–Ervelä-rataosuus.

Kohteiden valinnalla ei sinänsä ole väliä, sillä vain datan laatu ja siitä etsittävät asiat merkitsevät. On kuitenkin hyvä tunnistaa, minkälaisessa ympäristössä toimitaan. Kyseessä on kummassakin tapauksessa erittäin vanha rata. Vanhoilla radoilla on tyypillisesti laajalti ohuita rakennekerroksia ja muita rakenneratkaisuja, jotka eivät välttämättä täytä nykypäivän vaatimuksia.

Radan tuntemuksen avulla voidaan pyrkiä arvioimaan esiintyneiden hypoteesien ja analyysien pätevyyttä. Mikäli haluttaisiin tutkia esimerkiksi tunneleiden vaikutuksia, tarvittaisiin rataosa, jossa on paljon tunneleita ja verrata sitä toiseen rataosaan, jossa on tunneleita. Tämän työn tiedonlouhinnoissa ollaan kiinnostuneita ratarakenteen maarakenteista. Näiltä osin rataosat ovat melko saman tyyppiset, sillä molemmat ovat vanhoja ratoja, joilla on paikoin ohuita rakenteita ja joilla käytetyt materiaalit ovat todennäköisesti otettu radan välittömästä läheisyydestä.

Karjaa–Ervelä

Tutkimusdataa on Karjaan ja Ervelän liikennepaikkojen väliltä rantaradalta kilometriväliltä 87+225–119+000, mikä vastaa noin 29 kilometrin matkaa. Kilometrivilillä on voimassa olevan Karjaa–(Turku) käyttöohjeen 0400 109 E 20277 M mukaan:

- 1 liikennepaikka, Pohjankuru
- 7 tunnelia
- 7 alikulkua/alikulkusiltaa
- 3 ratasiltaa
- 9 ylikulkusiltaa
- 2 vaihdetta (pääraiteella) (Liikennevirasto 2017).

Rataosalla vapaanaolon valvonta on toteutettu raidevirtapiirein ja rata on sähköistetty. Kyseisellä välillä ei ole tasoristeyksiä. Lisäksi lähtötietojen perusteella nähdään, että tutkimusvälillä on useita kallioleikkauksia, routalevykohteita sekä paaluille perustettua rataa.

Turku–Karjaa-rataosuus on valmistunut vuonna 1899, jonka jälkeen rataosalle on tehty useita oikaisuja ja perusparannuksia sekä vuonna 1995 valmistunut sähköistys. Rantaran edellinen perusparannus valmistui vuonna 1995, ja uusi perusparannushanke päällysrakenteen ja tunneleiden osalta on käynnistynyt. (Ratahallintokeskus 2008, s. 14–15, Nuutinen 2018, s. 18)

Kouvola–Kotka

Kouvolan ja Kotkan väliltä dataa on kilometriväliltä 192+000–242+600, mikä vastaa noin 53 kilometrin matkaa. Kouvolan ja Kotkan välillä on käyttöohjeen 0400 109 E 20503 N mukaan:

- 4 liikennepaikkaa
- 20 alikulkua/alikulkusiltaa
- 6 ratasiltaa
- 12 vaihdetta (mittauksia koskevalla läntisellä raiteella)
- 9 ylikulkusiltaa
- 1 tasoristeys (Liikennevirasto 2018a).

Vapaanaolon valvonta Kouvolan ja Kotkan välillä on toteutettu osin raidevirtapiirien ja osin akselinlaskijoiden avulla. Koko osuus on sähköistettyä rataa. Lähtötietojen perusteella rakenteissa on paikoitellen routalevyjä ja muutamia kallioleikkauksia. Tunneleita välillä ei ole.

Kouvola–Kotka-rataosa on valmistunut vuonna 1890 yksiraiteisena, jonka jälkeen kaksiraiteisia osuuksia on lisätty Kouvola–Juurikorpi-välille 1950-luvulla ja 1990-luvulla.

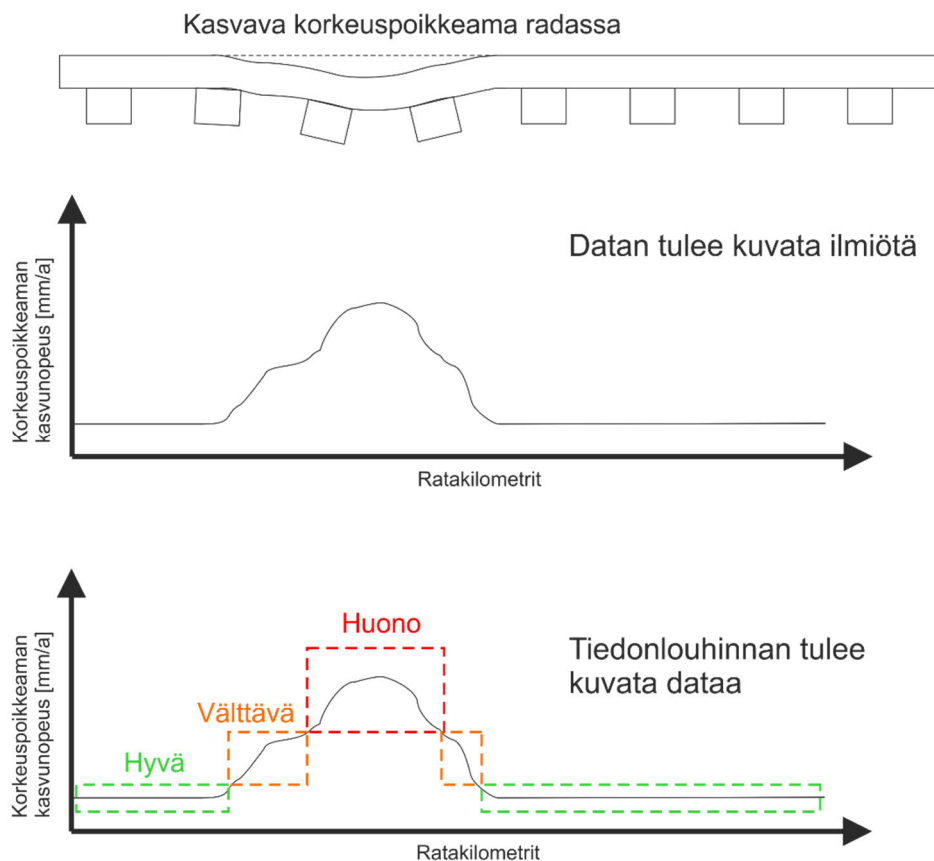
2000-luvulla päällysrakenne on uusittu koko rataosuudelle. Rataosalla liikkuu sekä henkilö- että tavaraliikennettä, mutta väylä on varsin tärkeä tavaraliikenteen satamakuljetuksille. (Liikennevirasto 2015, s. 8–9)

5.2 Louhittava data

Louhittavassa datassa on tärkeä ymmärtää, miten data on rakennettu ja mitä eri parametrit tarkoittavat. Louhittava data Karjaa–Ervelä-väliltä on matriisi, jossa on 28 saraketta ja 29 355 riviä. Kouvola–Kotka-rataosalta dataa on 32 saraketta ja 52 907 riviä.

5.2.1 Datan rakentaminen

Louhittava data täytyi kerätä eri lähteistä ja yhdistää yhteen tiedonlouhintaan soveltuvaan formaattiin. Jokaisella louhittavalla parametrilla on omat ominaisuutensa, jotka tulee ottaa huomioon. Louhittavia parametreja tulee käsitellä tiedonlouhinnan tulosten sekä datan kuvaavuuden näkökulmista. Datan tulee kuvata siihen liittyvää ilmiötä ja tiedonlouhinnan parametrien tulee kuvata datasta tulkittavia tuloksia (kuva 32). Tällöin tiedonlouhinta kuvaa tapahtuvaa ilmiötä oikein.

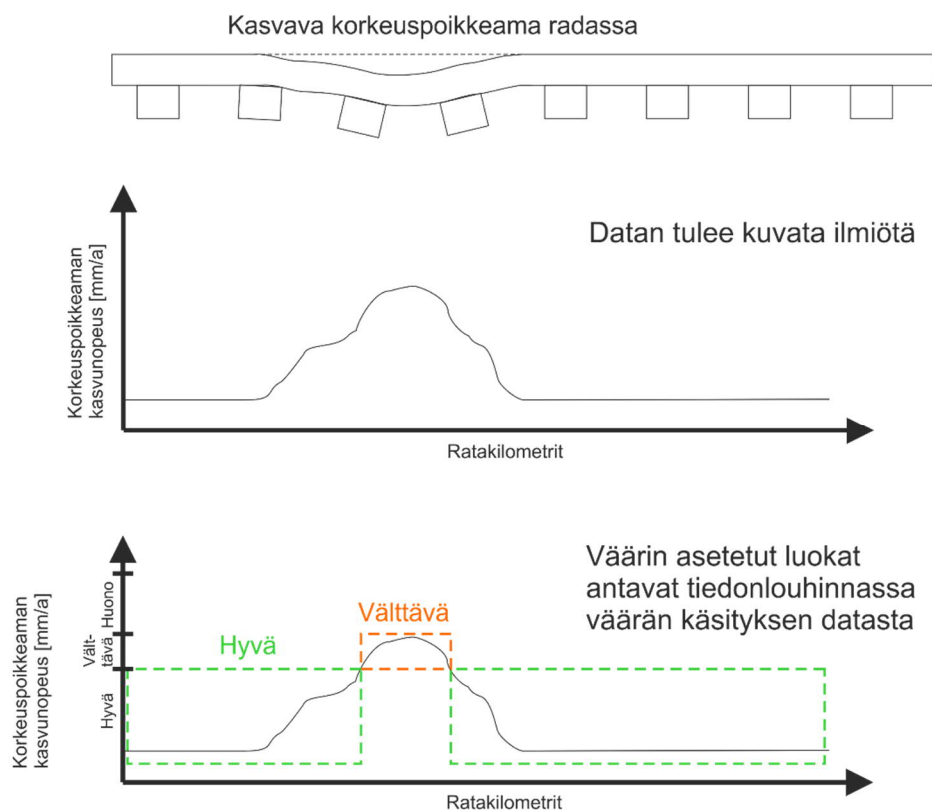


Kuva 32. Tiedonlouhinnan ja todellisen ilmiön vastaavuus.

Tiedonlouhinnassa käytetyt luokitukset ja luokkien rajat ovat erittäin tärkeitä. Niiden perusteella jaotellaan rata haluttuihin ennakkoehdoin ja seurauksiin. Rajoja voidaan asettaa eri perusteilla. Jotkut arvot on syytä jaotella luokkiin ”kyllä” tai ”ei”, kun taas toiset numeroarvoihin perustuviin luokkiin.

Numeroarvoihin perustuvia luokituksia on käytetty esimerkiksi kerrospaksuuksissa ja ojasyvytydessä. Maakerrosten paksuuden osalta päädyttiin tekemään useita luokkia ja käyttämään useita luokkia kerralla. Tällöin saadaan liukuva luokkayhdistelmä, jonka avulla nähdään, miten paksuuden vaihtelu muuttaa lopputulosta ja mikä on se paksuus, jossa vaihdos tapahtuu. Ojasyvytyden arvio ei ole täysin tarkka, jolloin on riittävää tietää, milloin ojasyvyys on erittäin pieni, erittäin suuri tai jotain siltä väliltä, ja valita luokat tämän mukaisesti.

Luokkia ja niiden rajoja testattiin useaan otteeseen eri louhinnoilla ennen lopullisten louhintojen tekemistä. Luokkien rajojen määrittely liittyy vahvasti tiedonlouhinnan ja datan vastaavuuden yhteyteen. Data voi kuvata ilmiötä hyvin, mutta väärin valitut luokat voivat tehdä lopputuloksista täysin hyödyttömiä. Muuttamalla esimerkikuvan 32 luokkia kuvan 33 mukaiseksi tiedonlouhinnan tuloksissa ei enää esiinny huonoa rataa ollenkaan. Siksi täytyykin tietää, mitä luokkien rajat kuvastavat, jotta ne voi asettaa oikein.



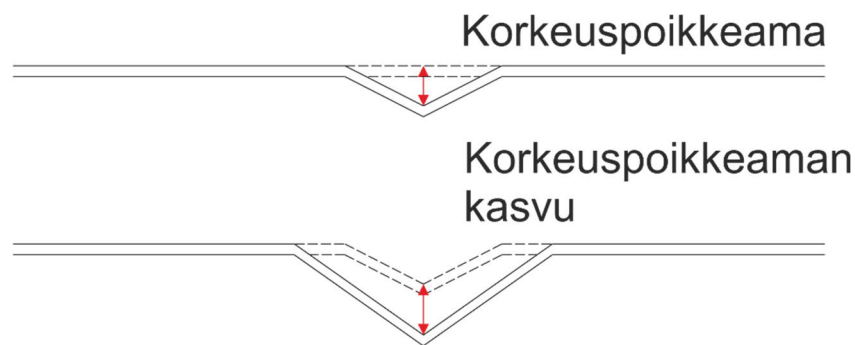
Kuva 33. Tiedonlouhinta antaa väärän käsityksen, jos asetetut luokat eivät vastaa ilmiötä ja dataa.

Eri mittausmenetelmien ja -kertojen mittaustulokset on vaikea kohdistaa. Vaikka mittauksen sijainnit olisivat ilmoitettu, voivat ne olla jonkin verran sivussa joko mittaustavan, dokumentointitavan tai tiedonkäsittelyn takia. Mittausten kohdistaminen voitaisiin tehdä melko tarkastikin, jos kaikkien mittausten raakadata olisi saatavilla ja siitä pystyttäisiin tunnistamaan tiettyjä kohdistavia paikkoja. Tässä työssä kohdistaminen on tehty datan perusteella mahdollisimman tarkasti saatujen lähtötietojen puitteissa. Tarkinta tietoa on saatavilla radan mittauksista, mutta esimerkiksi kunnossapitohistorian sijainnit ovat suurpiirteisempiä.

5.2.2 Geometrian heikkenemisnopeus ja korkeuspoikkeaman kasvunopeus

Geometrian heikkenemisnopeus on koko tiedonlouhinnan perusta, sillä sen perusteella määritellään, onko rata hyvää vai huonoa. Kuten luvussa 3 mainittiin, toistuva liikennekuormitus aiheuttaa radassa pysyviä muodonmuutoksia, jotka ilmenevät poikkeamina radan geometriassa. Kun radan kuormituskestävyys on hyvä, poikkeamia syntyy vain vähän. Jos taas kuormituskestävyys ei ole riittävä, poikkeamia syntyy paljon ja ne kehittyvät nopeasti. Yksittäinen poikkeama geometriassa voi johtua useasta eri asiasta, eikä poikkeama välttämättä kerro vielä radan kuormituskestävyydestä. Siksi geometrian heikkenemisen nopeutta voidaan pitää hyvänä indikaattorina realisoituneesta puutteellisesta kuormituskestävyydestä.

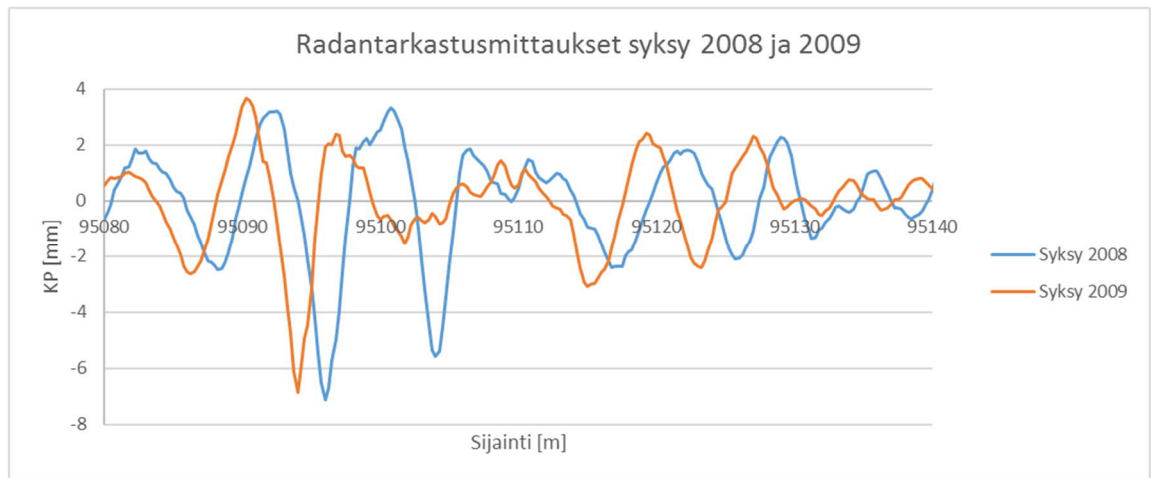
Geometrian heikkenemisnopeudelle ei ole vakiintunutta laskentatapaa tai määritelmää. Suomessa ainoa saatavilla oleva jatkuva geometrian mittausdata on radantarkastusvaunun mittaustulokset. Kyseessä ei ole absoluuttisen geometrian mittaus, vaan poikkeamien mittaus 12 metrin mittakannalla. Mittaustuloksista on käytetty korkeuspoikkeamaa, koska se kuvastaa parhaiten maarakenteissa tapahtuvia muodonmuutoksia. Geometrian heikkenemisnopeutta on tässä työssä kuvattu korkeuspoikkeaman kasvulla (kuva 34) tietyllä aikavälillä. Näitä kahta termiä voidaan tässä työssä käyttää synonyymeina, mutta geometrian heikkenemisnopeus voitaisiin laskea muillakin perustein, mikäli muita jatkuvia radan geometrian mittauksia olisi Suomessa käytössä.



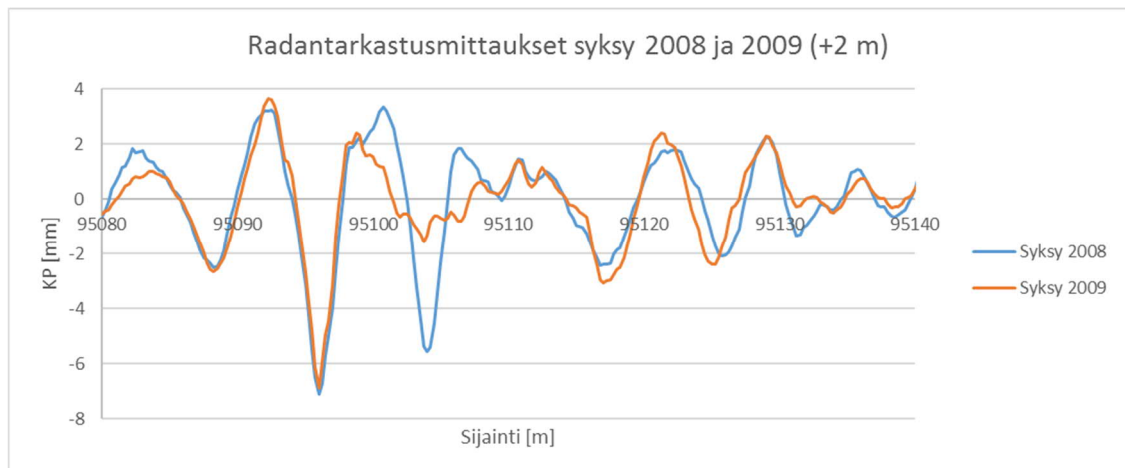
Kuva 34. Korkeuspoikkeama ja korkeuspoikkeaman kasvu.

Korkeuspoikkeaman mittausten käsittely

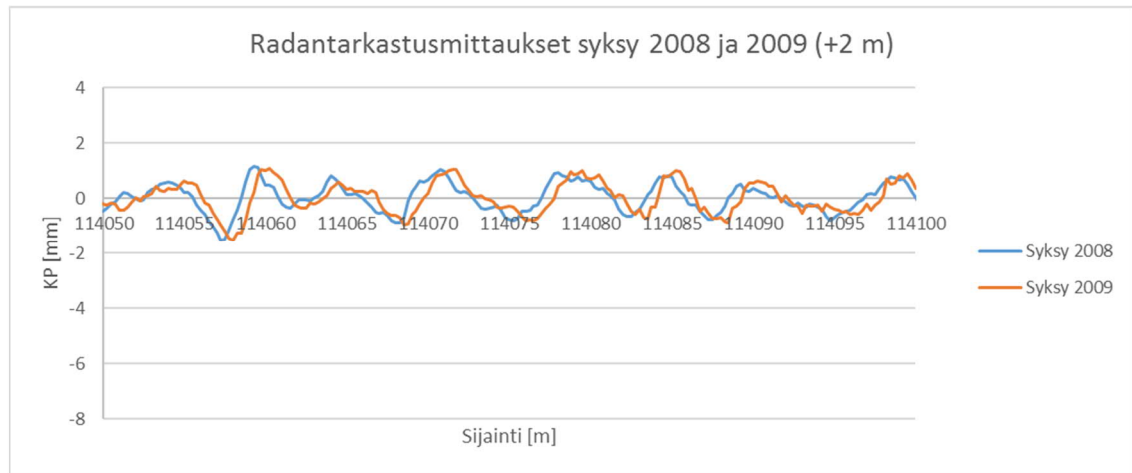
Radantarkastusmittausten tuloksia ei voida sellaisenaan käyttää kasvunopeuden laskentaan tulosten kohdistamisen takia. Kuvassa 35 on havainnollistettu kahden peräkkäisen syysmittauksen tuloksia ja kuten nähdään, tulokset ovat noin kaksi metriä eri kohdissa. Kuvassa 36 vuoden 2009 mittausten sijainteihin on lisätty 2 metriä ja mittaukset kohdistuvat tässä kohtaa paremmin. Tällä ei voida silti korjata ongelmaa, koska niin kuin kuvasta 37 nähdään, kohdistus on 20 km jälkeen jälleen virheellinen, tosin tällä kertaa siten, että jälkimmäinen mittaus on edeltävää niin sanotusti metrin edellä. Jos huippuja ei saada kohdistumaan täsmälleen samaan kohtaan, ei kasvunopeutta voida suoraan mittaustulosten perusteella laskea.



Kuva 35. Kahden peräkkäisen syksyn radantarkastusmittauksen korkeuspoikkeamat.



Kuva 36. Kahden perättäisen syksyn radantarkastusmittauksen korkeuspoikkeamat, jossa jälkimmäistä mittausta on siirretty 2 metriä eteenpäin.



Kuva 37. Kahden perättäisen syksyn radantarkastusmittauksen korkeuspoikkeamat, jossa jälkimmäistä mittausta on siirretty 2 metriä eteenpäin eri kohdassa kuin edellisessä kuvassa.

Kohdistuksen lisäksi toinen ongelma on tulosten huojunta nollan molemmin puolin. Tiedonlouhinnassa määritellään luokkia, joihin arvot kuuluvat. Jos tulokset ovat kymmenen metrin matkalla -6 mm ja 4 mm välillä, sen kyseisen alueen sisällä rata kuuluu jokaiseen eri luokkaan, vaikka tarkoitus oli kuvata suuria poikkeamia yhdellä luokalla. Radantarkastusmittausten itseisarvollakaan ei ongelmasta päästä, sillä tulokset käyvät nollassa, mikä kertoisi tiedonlouhinnassa radan olevan siinä kohtaa täysin hyvää, vaikka todellisuudessa kyse voi olla aivan päinvastaisesta. Radantarkastusmittausten kohdistusongelmien ja tulosten huojunnan takia radantarkastusmittausten tuloksia täytyy käsitellä. Kirjallisuudessa on mainittu kaksi käytössä olevaa tapaa käsitellä radantarkastusmittausten tuloksia: keskihajonta ja running roughness (Li et al. 2016, s. 395–401).

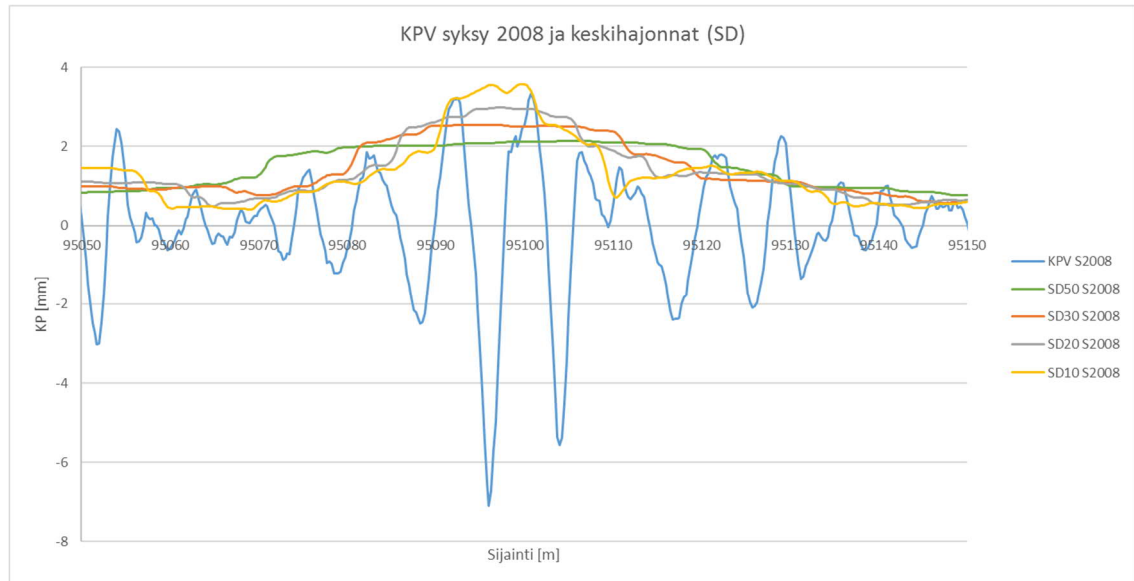
Keskihajonta (SD)

Keskihajonta (SD, Standard Deviation) kuvaa havaintojen (mittaustulosten) keskittyneisyyttä, eli kuinka kaukana keskiarvosta havainnot keskimäärin ovat (Tilastokeskus). Korkeuspoikkeamien kohdalla mittaus vaihtelee nopeasti suuren ja pienen luvun välillä, jolloin keskihajonta kasvaa. Keskihajonnan muutos ei kerro poikkeaman suuruusluokasta, vaan siitä, kuinka paljon poikkeama on kasvanut. Tällöin kuvataan geometrian heikkene- misen suuruutta, eikä oteta huomioon lähtötasoa. Tämä on merkittävä etu, sillä mittausten alussa rataa ei ole perusparannettu tai uusittu, jolloin jo ensimmäisessä mittauksessa on poikkeamia.

Keskihajontaa voidaan laskea liukuvana tai määrättyllä jaksolla. Liukuva keskihajonta tarkoittaa sitä, että jokaisessa mittauspisteessä lasketaan keskihajonta ympäröivien mittausten mukaan määrättyllä matkalla. Keskihajonnan voi laskea myös siten, että jokainen mittauspiste keskihajonnan pituuden matkalta saa saman keskihajonnan arvon. Tällöin rata luokitellaan tiettyjen pituisiin jaksoihin, joita edustavat niiden keskihajonnat. Keskihajonnan määrittäminen tietyn pituisiin jaksoihin peittää pistemäisiä ongelmakohtia, eikä

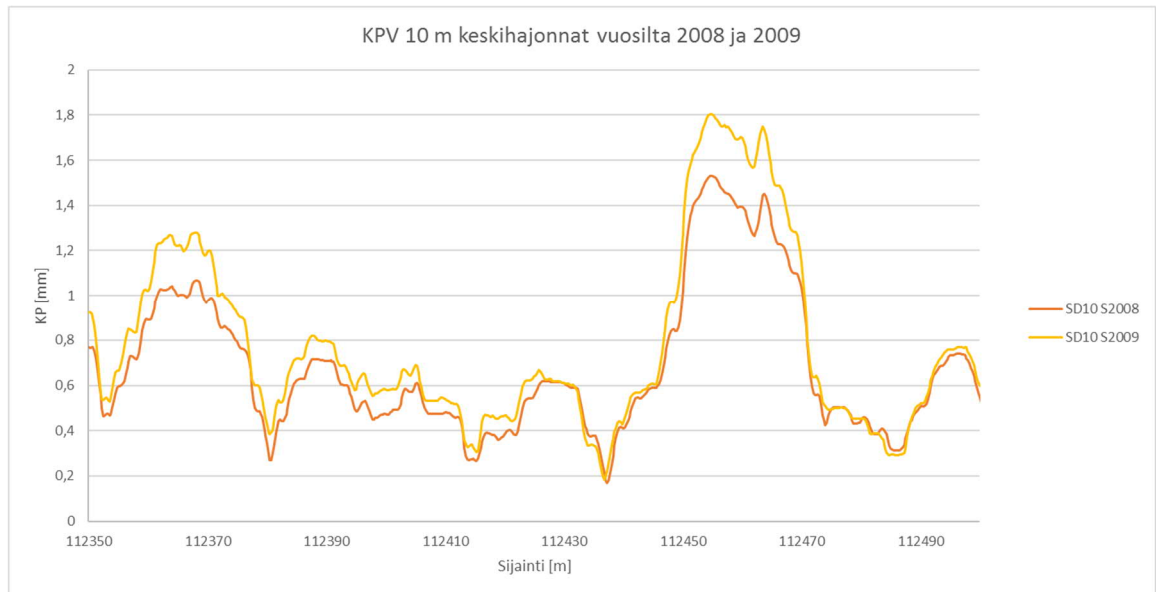
kuvaa radan todellista käyttäytymistä (Li et al. 2016, s. 396–398). Tästä syystä päädyttiin käyttämään ainoastaan liukuvia keskihajontoja.

Kun keskihajonnan erilaisia laskentapituuksia testattiin (kuva 38), huomattiin, että keskihajonnan pienet laskentapituudet kuvaavat paremmin korkeuspoikkeamien huippuja kuin suuret. Suurella laskentapituudella keskihajonnan kuvaaja laajenee, jolloin pienet huiput katoavat ja ongelmakohteet näkyvät ympäröivällä hyvällä radalla. Esimerkiksi sillan tai tunnelin päässä olevat poikkeamat heijastuvat pitkälle jäykkään rakenteeseen, vaikkei jäykässä rakenteessa olisi ongelmia.



Kuva 38. Eri laskentapituuksien keskihajontojen käyttäytymistä.

Pienillä laskentapituuksilla keskihajonnan ongelmaksi voi muodostua tulosten kohdistuminen ja siksi 10 ja 20 metrin laskentapituuden keskihajontoja testattiin vielä perättäisten vuosien keskihajontojen kanssa. 10 metrin laskentapituuden keskihajonnassa kohdistus osui noin puolen metrin tarkkuudella kohdilleen (kuva 39). 20 metrin laskentapituuden keskihajonnassa tulokset kohdistuivat alle puolen metrin tarkkuudella.



Kuva 39. Perättäisten syysmittausten 10 metrin laskentapituuden keskihajontojen kohdistuminen.

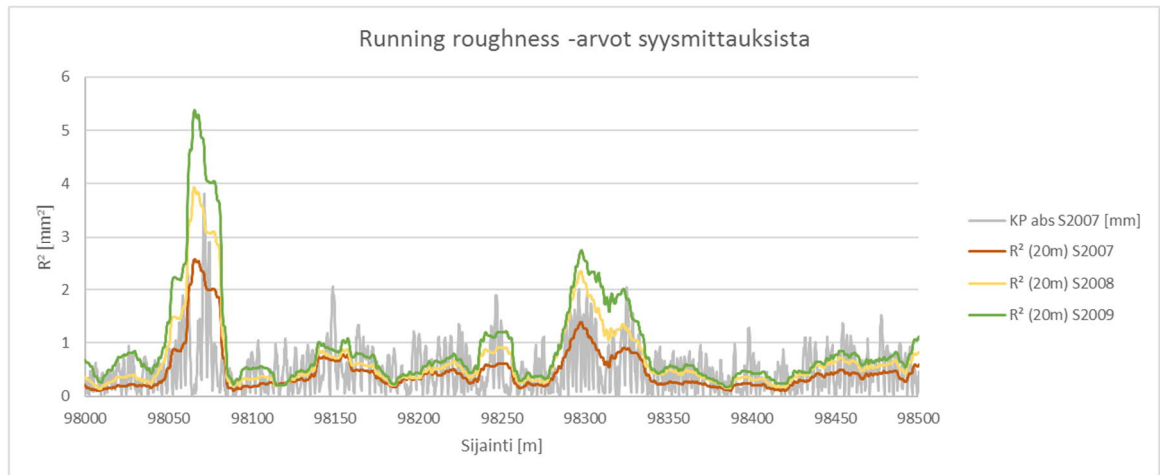
Running roughness (R^2)

Running roughness eli vapaasti käännettynä kulkupinnan epätasaisuus kuvaa poikkeamien toisen potenssin keskiarvoa tietyllä matkalla liikkuvassa ikkunassa. Running roughness (R^2) voidaan laskea kaavalla

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}, \quad (1)$$

missä d on radantarkastusvaunun mittaama poikkeama ja n on mittausten lukumäärä tarkasteltavalla matkalla. (Li et al. 2016, s. 398–399)

Running roughness -arvoja testattiin perättäisiltä syysmittauksilta (kuva 40). Syksyn 2007 running roughness -arvo korreloi hyvin kyseisen mittauksen korkeuspoikkeaman itseisarvon kanssa. Lisäksi perättäisten syksyjen running roughness arvot kohdistuivat hyvin keskenään.

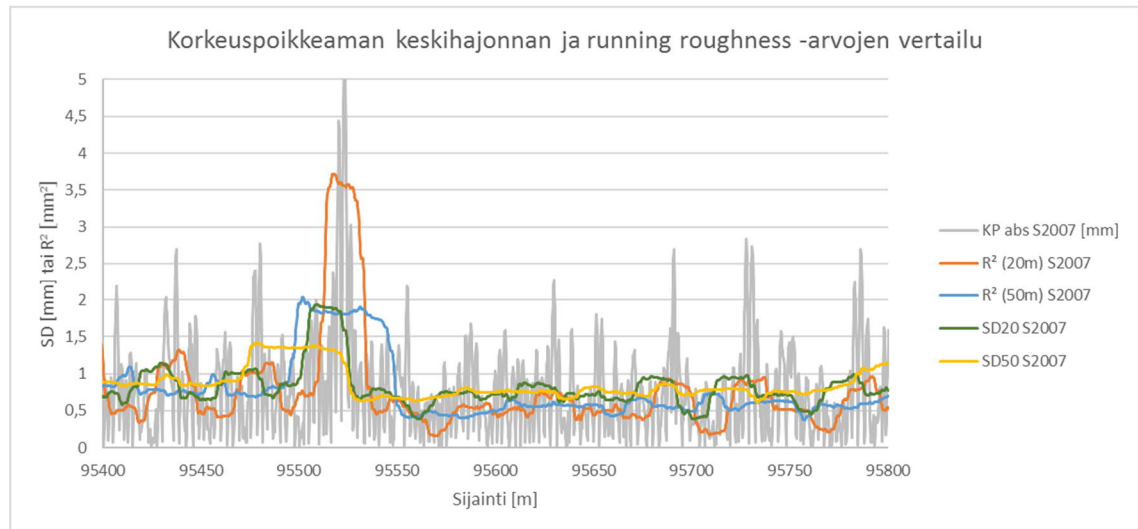


Kuva 40. Perättäisten syysmittausten running roughness -arvot ja syksyn 2007 korkeuspoikkeaman itseisarvo.

Keskihajonnan (SD) ja running roughness -arvon (R^2) vertailu

Vakiintunutta käytäntöä geometriapoikkeamien arvioinnille ei ole. Eri maissa on käytössä eri laskentapituuksia keskihajonnalle ja running roughness -arvoille. Isossa-Britanniassa käytetään 35, 70 ja joissain tapauksissa 140 metrin laskentapituuksia. Yhdysvalloissa taas on käytössä brittiläisen yksikköjärjestelmän mukaan 31, 62 ja 124 jalkaa, mikä vastaa noin 10, 20 ja 40 metrin laskentapituuksia. Isossa-Britanniassa käytettävä 35 metrin laskentapituuden kerrotaan vastaavan keskipitkää ja 70 metrin pitkää laskentapituutta. (Li et al. 2016, s. 396–398)

Näiden perusteella testattavaksi valittiin 20 ja 50 metrin laskentapituudet, koska vertailtavaksi haluttiin melko pienipiirteinen ja keskisuuri laskentapituus. Syksyn 2007 korkeuspoikkeaman mittauksista laskettiin 20 ja 50 metrin laskentapituuden keskihajonnat sekä running roughness -arvot. Esimerkki näin lasketuista tuloksista on esitetty kuvassa 41.



Kuva 41. Korkeuspoikkeaman keskihajonnan ja running roughness -arvojen kohdistuminen.

Parhaiten korkeuspoikkeamaa myötäilee 20 metrin laskentapituuden running roughness -arvo. Piikit sen ja korkeuspoikkeaman välillä ovat kohdistuneet parhaiten ja vaihtelut näkyvät selkeimmin. 20 metrin laskentapituuden keskihajonta reagoi myös hyvin korkeuspoikkeaman vaihteluun, mutta arvojen kohdistuminen ei ole täsmällistä. 20 metrin laskentapituuden keskihajonnan huiput osuvat noin 5–7 metriä varsinaista korkeuspoikkeaman huippuarvoa edelle.

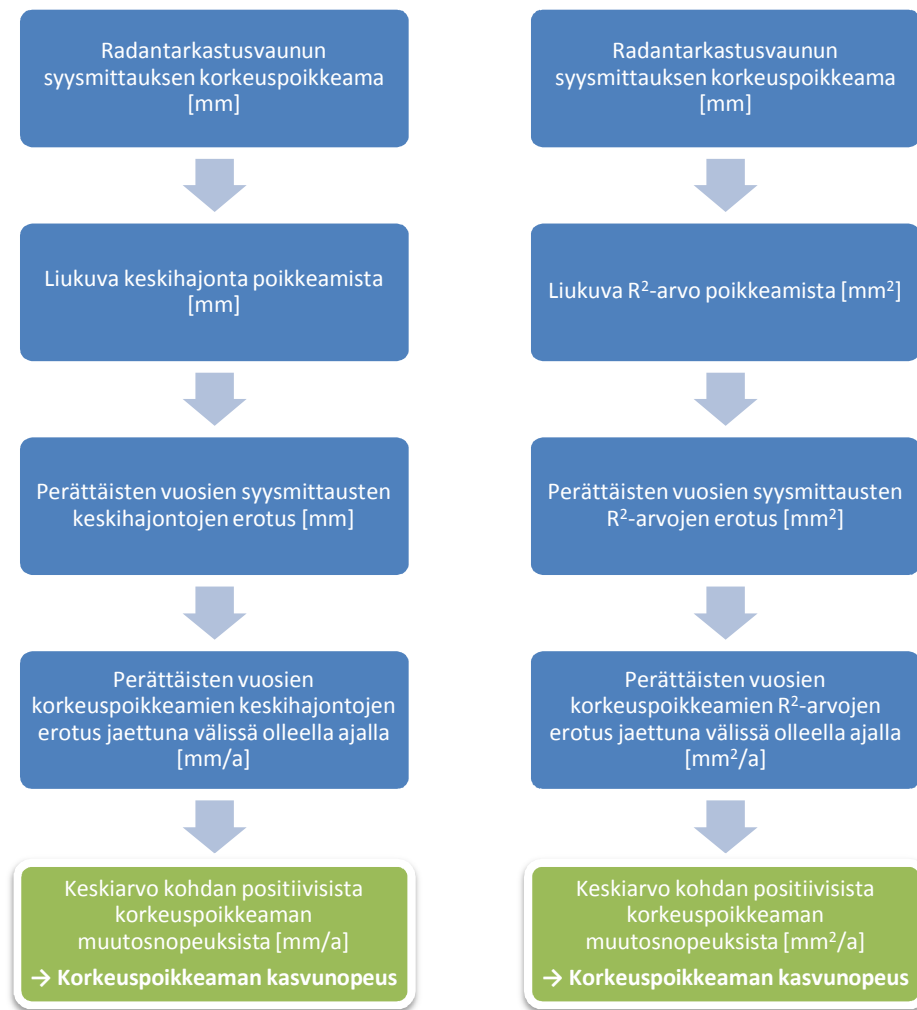
50 metrin laskentapituuden running roughness -arvo ja keskihajonta mukailevat korkeuspoikkeamaa tasaisemmin. Pienet vaihtelut eivät näy selvästi ja välillä trendi voi olla täysin vastakkaisen suuntainen 20 metrin laskentapituuteen verrattuna. 50 metrin laskentapituuden keskihajonta ei kohdistu oikein huippujen suhteen ja se piilottaa yksittäisiä kohteita, jolloin sitä ei voida pitää parhaana mahdollisena indikaattorina huonosta geometriasta.

Tiedonlouhinnassa päädyttiin käyttämään 20 metrin laskentapituuden running roughness -arvoja. Tiedonlouhintoja tehtiin myös keskihajonnoilla ja 50 metrin laskentapituuden running roughness -arvoilla tulosten tarkastamiseksi. Kuitenkin varsinainen raportoitu louhinta on tehty vain yhdellä tavalla laskettuna, jotta eri tuloksia voidaan vertailla. Tiedonlouhinnan tulosten arvioinnissa täytyy olla kriittinen ja tarkastaa, vastaako louhinnan korostamat muutosnopeudet todellisesti kyseistä kohdetta.

Korkeuspoikkeaman kasvunopeuden laskenta

Kasvunopeuden laskenta on esitetty kummastakin korkeuspoikkeamaa kuvaavasta arvosta, keskihajonnasta ja running roughness -arvosta. Korkeuspoikkeaman kasvunopeuden laskenta aloitetaan laskemalla liukuvat keskihajonnat tai running roughness -arvot radantarkastusvaunun mittaustuloksista. Tämän jälkeen arvoa verrataan edellisen vuoden

arvoon ja saadaan korkeuspoikkeaman vuosittainen kasvu. Negatiivinen kasvu viittaa siihen, että osuudella on tehty kunnossapitotoimenpiteitä ja positiivinen kasvu indikoi geometrian heikkenemistä. Tämän jälkeen luvuista on suodatettu pois negatiiviset arvot, eli ne arvot, joissa geometria on parantunut, jotta vain geometrian heikkeneminen on edustettuna. Lopuksi vuosittaisista korkeuspoikkeamien kasvunopeuksista on laskettu keskiarvo, joka edustaa kyseistä paikkaa. Laskennassa on käytetty syysmittauksia, sillä niiden välillä ei pitäisi olla suurta vuosittaista olosuhteiden vaihtelua toisin kuin esimerkiksi kevätmittauksissa roudan sulamisen vaihtelun takia. Kuvassa 42 on havainnollistettu korkeuspoikkeaman kasvunopeuden laskentaprosessi.



Kuva 42. Geometrian heikkenemisnopeutta edustavan korkeuspoikkeaman kasvunopeuden laskenta keskihajonnasta ja R^2 -arvosta.

Hyvinä puolina tässä menetelmässä ovat sen nopeus ja objektiivisuus. Laskennan tekeminen kestää enintään minuutteja ja ihmisen tulkintaa ei juuri tarvita, kun kaikki laskenta tehdään kaavoilla. Huonona puolena voi pitää sitä, että kohteissa, joissa on vain yksi tai yksittäisiä kasvunopeuksia, yksittäisten vuosien geometrian heikkenemisnopeudet korostuvat. Tällainen tilanne on yleensä paikoissa, joissa on niin paljon ongelmia, että joutu-

taan tukemaan lähes vuosittain. Tällöin yksittäiset tulokset tuentojen välillä ovat verrattain suuria. Tiedonloughinnassa tämä on lähinnä vain etu, koska tällä tavoin ongelmakohteet korostuvat. Huippuarvojen korostuminen ei häiritse tiedonloughintaa, sillä siinä käytettävät luokat voidaan asettaa ilman ylärajaa, jolloin suuri heikkenemisnopeus on vain tietyn kynnyksarvon ylittävä nopeus, eikä absoluuttisella arvolla ole väliä. Suurempana ongelmana voidaan pitää sitä, jos ainoa heikkenemisen arvo ei kuvaisikaan kohteen käyttäytymistä.

Aikaisemmin datasta on laskettu geometrian heikkenemisnopeus myös heikkenemisnopeuden kulmakertoimen tulkinnasta. (Malassu 2016, s. 80–86) Tässä on laskettu lineaarinen regressio niistä perättäisistä tuloksista, jotka edustavat samaa heikkenemisnopeusjaksoa. Mikäli kohteessa on ollut tuentoja ja sen jälkeen eri heikkenemisnopeus, on kohteella useita eri heikkenemisnopeuksia, joista otetaan kohdetta edustava keskiarvo. Hyvänä puolena tässä menetelmässä on huippuarvojen tasaantuminen. Huonoja puolia ovat menetelmän hitaus, subjektiivisuus, heikkenemisajanjaksojen pituuksien huomioimatta jättäminen ja datan suuren määrän tarve. Datan käsittelyyn menee useita päiviä ja heikkenemisjaksot arvioidaan käsin. Heikkenemisjaksojen keskiarvo ei huomioi sitä, kuinka pitkiä heikkenemisjaksot ovat, vaan käsittelee eri kestoiset heikkenemisjaksot tasa-arvoisesti.

Kun jatkuvaa radan heikkenemisdataa on heikosti saatavilla, esimerkiksi tuentojen takia, ei muutosnopeutta saada lineaarisella regressiolla ollenkaan. Tämä on erittäin iso haitta tiedonloughinnassa, koska kaikista ongelmallisimmat kohteet jäävät tällöin ilman mitään arvoja ja samalla tiedonloughinnan ulkopuolelle. Jos radantarkastusvaunun mittausdataa olisi saatavilla enemmän ja tiedettäisiin kunnossapitotoimet tarkemmin, voitaisiin lineaarista regressiota hyödyntää paremmin. Lämpimämmissä maissa lineaarista regressiota voidaan käyttää paremmin, kun ei tarvitse ottaa vuodenaikojen vaihtelua huomioon mitaustulosten vertailussa, jolloin tuentojen väliltä saadaan enemmän dataa käyttöön.

Geometrian heikkenemisnopeus

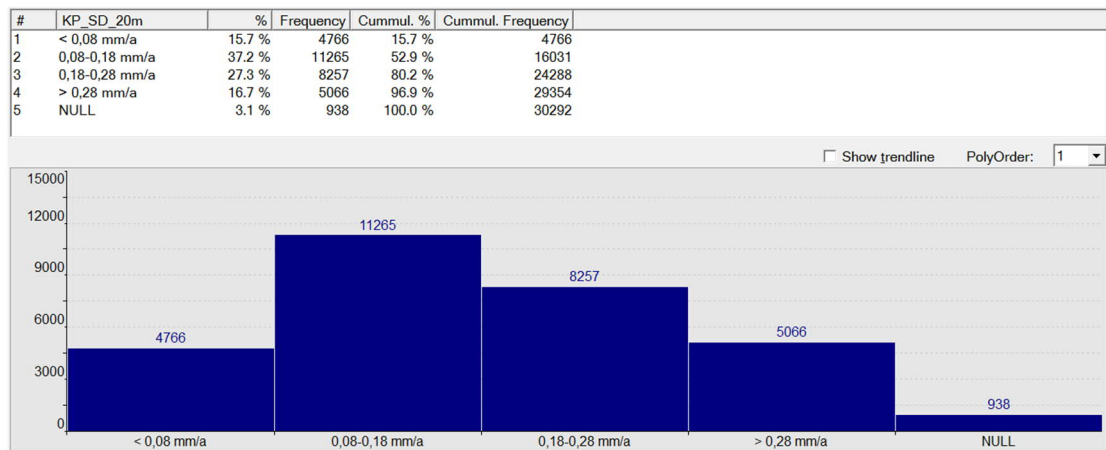
Kirjallisuudessa radan geometrian heikkenemisnopeudeksi on ilmoitettu minimissään 1–2 mm/100 MGT ja maksimissaan 10 mm/100 MGT (Esveld 2001, s. 402). Rantaradan vuosittainen tavaraliikenne oli vuonna 2016 2,9 miljoonaa bruttotonnia Karjaa–Ervälä-välillä (Liikennevirasto 2016). Sovittamalla kirjallisuudesta saatu geometrian heikkenemisnopeus rantaradan bruttotonneihin saadaan, että geometrian heikkeneminen rantaradalla voisi olla minimissään 0,02–0,08 mm/vuosi ja maksimissaan 0,28 mm/vuosi.

Kun Karjaa–Ervälä-välin keskihajonnalla lasketuista vuosittaisista korkeuspoikkeaman muutosnopeuksista lasketaan keskiarvo huolimatta siitä, onko geometria heikentynyt vai parantunut (rata tuettu), saadaan tulokseksi 0,05 mm/vuosi. Arvo vastaa kirjallisuudesta johdettua hyvän geometrian heikkenemisen arvoa 0,02–0,08 mm/vuosi. Tähän perustuen

voidaan arvioida, että radan tukemisella ylläpidetään hyvän tasoista geometrian heikkenemisnopeutta.

Valitsemalla vain positiiviset muutosnopeudet, keskimääräiseksi geometrian heikkenemisnopeudeksi saadaan 0,19 mm/vuosi. Geometrian heikkenemisnopeuden mediaani on 0,17 mm/vuosi. Eli kun tuennan vaikutuksia ei oteta huomioon, heikkenemisnopeuden keskiarvo tutkitulla osuudella on suuren ja pienen heikkenemisnopeuden välillä.

Geometrian heikkenemisnopeus jaettiin tasaisesti luokkiin < 0,08 mm/vuosi, 0,08–0,18 mm/vuosi, 0,18–0,28 mm/vuosi ja > 0,28 mm/vuosi. Kuvassa 43 on esitetty tilastoja korkeuspoikkeaman 20 metrin laskentapituuden keskihajonnan kasvunopeuksista. Tilastot puoltavat luokkien valitsemista edellä mainitulla tavalla, sillä erinomaista rataa (< 0,08 mm/a) ja erittäin huonoa rataa (> 0,28 mm/a) on suunnilleen yhtä paljon ja ne ovat harvinaisempaa kuin keskiarvoinen heikkenemisnopeus.

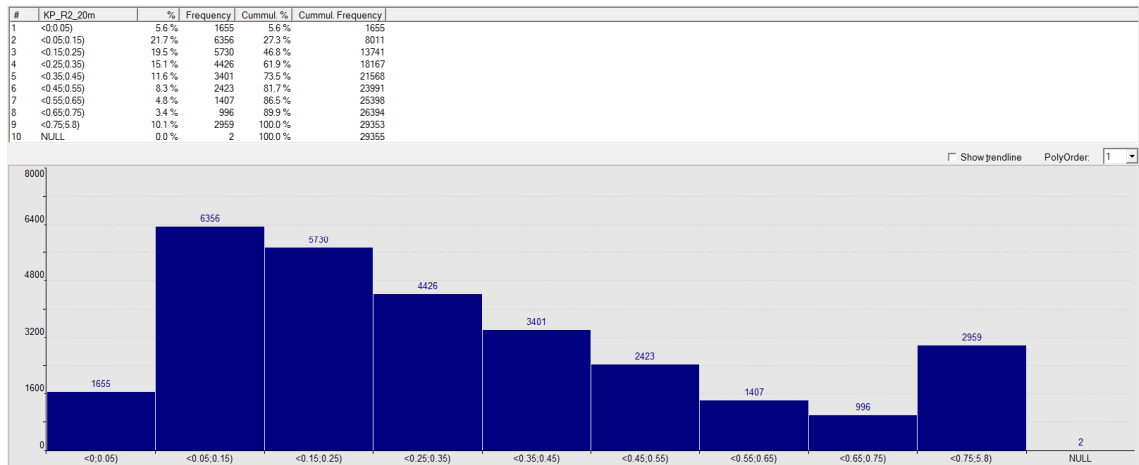


Kuva 43. 20 metrin laskentapituuden korkeuspoikkeaman keskihajonnan kasvunopeuden jakautuminen Karjaa–Ervelä-välillä.

Keskiarvoista paremmin suoriutuvaa rataa (0,08–0,18 mm/a) on määrällisesti enemmän kuin keskiarvoista huonommin suoriutuvaa rataa (0,18 mm/a–0,28 mm/a). Tämä johtuu siitä, että suurissa arvoissa on merkittävästi suurempia arvoja kuin 0,28 mm/vuosi. Geometrian heikkenemisnopeuden maksimiarvot ovat yli 1 mm/vuosi, jolloin määrällisesti ratametrejä on keskiarvon yläpuolella vähemmän kuin alapuolella. Tämä jaottelu toimii hyvin siksi, että on suotuisempaa olettaa radan huonon kunnan olevan poikkeus ennemmin kuin sääntö.

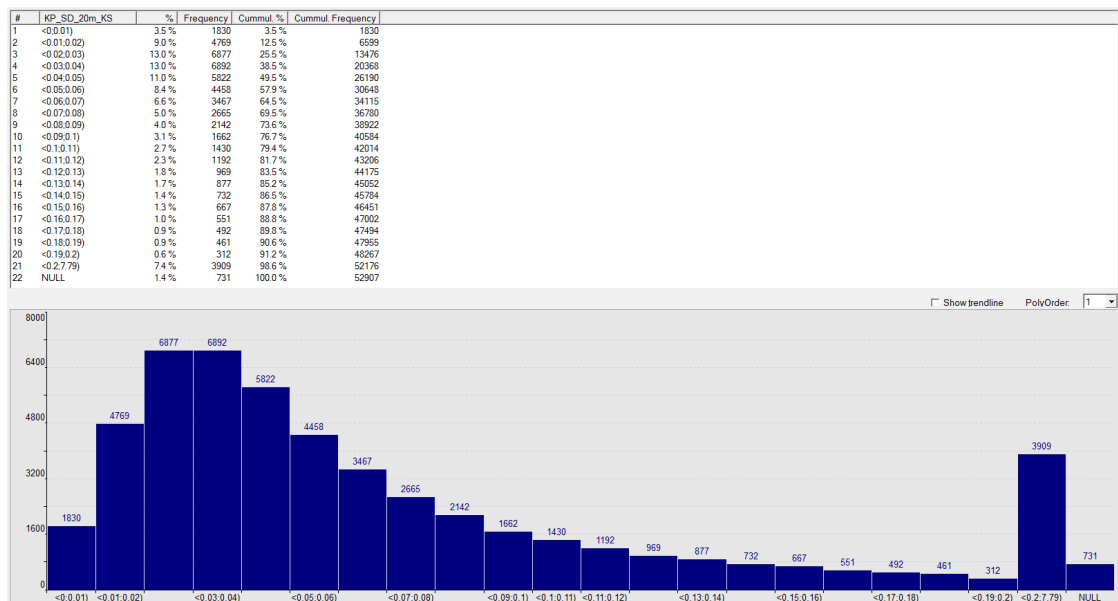
Running roughness -arvoilla samanlaista kirjallisuuteen perustuvaa luokkien määrittelyä ei voida tehdä. Keskihajonnan luokkien käyttäminen ei ole vaihtoehto, sillä keskihajonta ja running roughness -arvot eivät vastaa toisiensa kokoluokkaa. Running roughness -arvojen suhteen päädyttiin käyttämään tasaisesti jaettuja luokkia, joiden äärimmäiset luokat vastaavat kumpikin 5–10 % radasta (kuva 44). 20 metrin running roughness -arvojen keskiarvo Karjaa–Ervelä-väliltä on 0,36 mm²/a ja mediaani 0,27 mm²/a. Suuri osa radasta (62 %) on alle keskiarvon, mikä kertoo siitä, että suurimmat arvot ovat paljon

suurempia kuin keskimääräiset arvot. Tämä ei sinänsä ole yllättävää, sillä poikkeamista lasketaan toinen potenssi, jolloin suuret arvot kasvavat suhteessa enemmän kuin pienet.



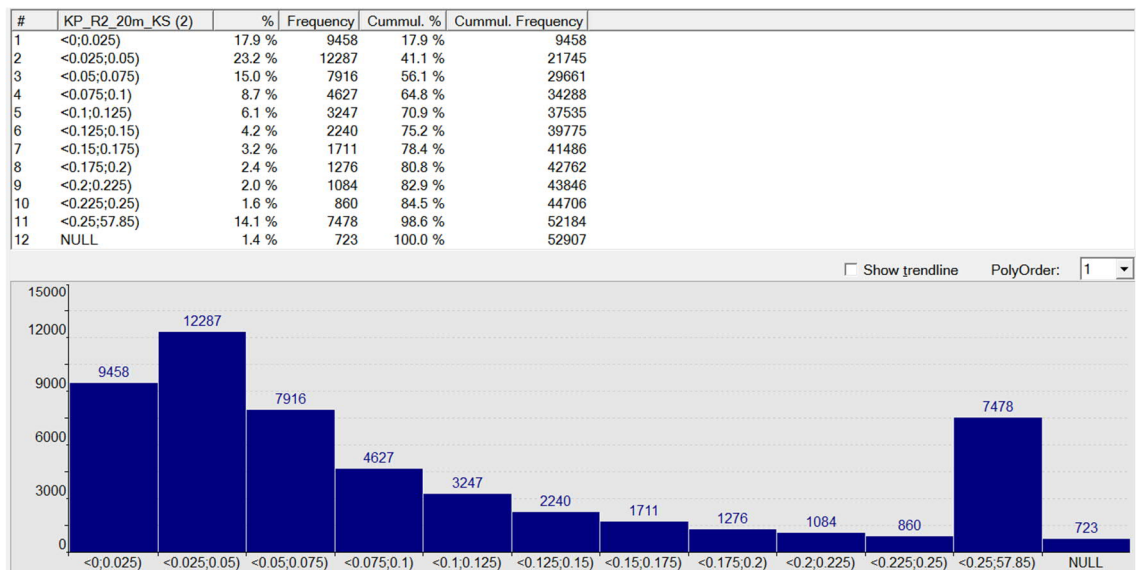
Kuva 44. 20 metrin laskentapituuden running roughness -arvojen kasvun jakautuminen Karjaa–Ervelä-välillä.

Kouvola–Kotka-rataosalla liikenteen bruttotonnit ovat merkittävästi suuremmat kuin Karjaa–Ervelä-välillä. Voisikin olettaa, että korkeuspoikkeaman kasvu on myös suurempaa Kouvola–Kotka-rataosalla. Näin ei kuitenkaan ole, vaan Kouvola–Kotka-rataosan keskiarvoinen korkeuspoikkeaman keskihajonta 20 metrin laskentapituudella on 0,1 mm/a, mikä on vähän yli puolet Karjaa–Ervelä-välin keskiarvosta. Myös korkeuspoikkeaman kasvun jakautuminen on painottunut enemmänkin ääriarvoihin ja korkeuspoikkeaman keskihajonnan kasvun mediaani onkin vain 0,05 mm/a. Valtaosa radasta (77 %) korkeuspoikkeaman keskihajonnan kasvu jää alle keskiarvon. Korkeuspoikkeaman keskihajonnan kasvu Kouvola-Kotka-rataosalta on esitetty kuvassa 45.



Kuva 45. 20 metrin laskentapituuden korkeuspoikkeaman keskihajonnan kasvunopeuden jakautuminen Kouvola–Kotka-rataosalla.

Myös running roughness -arvojen kasvussa oli eroja tutkimuskohteiden välillä. Kouvola–Kotka-rataosalla myös running roughness -arvot ovat keskiarvoisesti pienempiä kuin Karjaa–Ervelä-välillä. Kouvola–Kotka-välillä korkeuspoikkeaman kasvun huippuarvot ovat suurempia kuin rantaradalla ja vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on myös määrällisesti paljon (kuva 46). Kouvola–Kotka-rataosan 20 metrin laskentapituuden running roughness -arvojen kasvun keskiarvo on 0,25 mm²/a ja mediaani 0,06 mm²/a. Keskiarvoista vähäisempää korkeuspoikkeaman kasvua on 86 % radasta. Kouvola–Kotka-rataosan korkeuspoikkeaman kasvunopeus on erittäin jakautunut pieneen tai suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

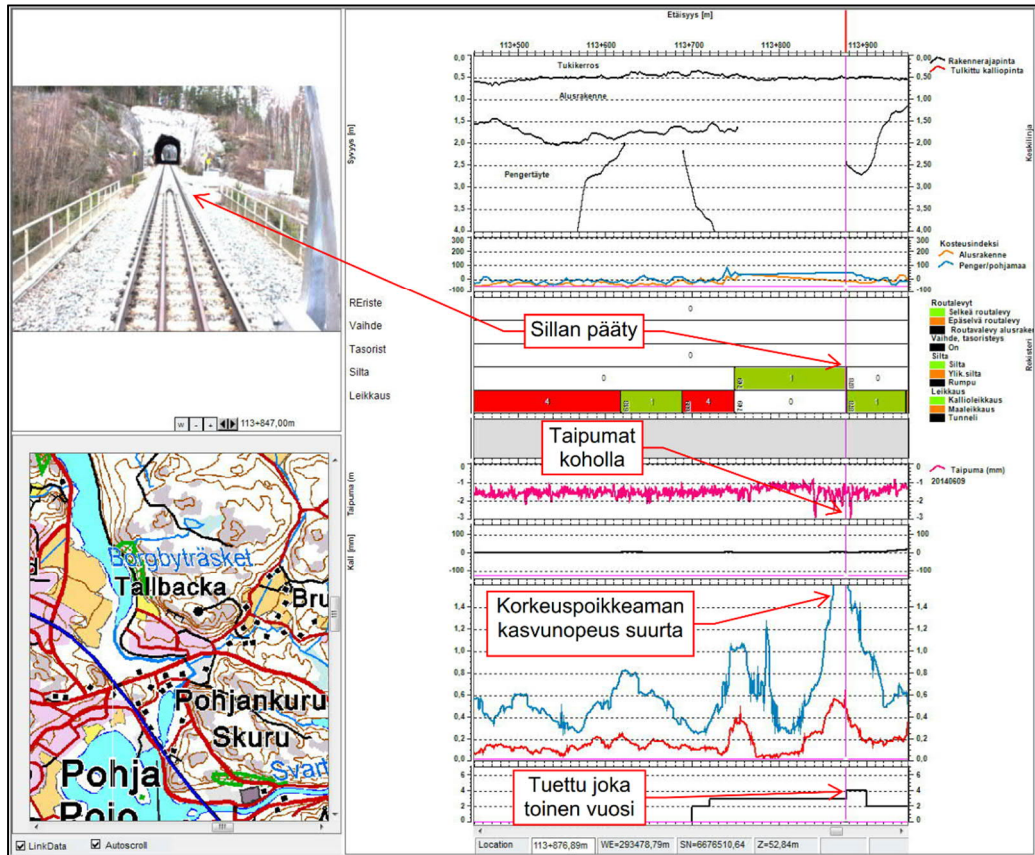


Kuva 46. 20 metrin laskentapituuden running roughness -arvojen kasvun jakautuminen Kouvola–Kotka-rataosalla.

Karjaa–Ervelä-välillä dataa on vähemmän, jolloin yksittäiset suuret arvot näkyvät keskiarvossa vahvemmin. Toisin sanoen, Karjaa–Ervelä-välillä on paljon eri lailla heikkenevää rataa, kun taas Kouvola–Kotka-rataosalla heikkenemisen ääripäät korostuvat. Tähän voi vaikuttaa myös se, että Karjaa–Ervelä-väliltä oli 7 vuodelta mittausdataa, kun taas Kouvola–Kotka-väliltä vain muutamalta vuodelta.

Toinen näkökulma lähestyä muutosnopeutta olisi sallittujen korkeuspoikkeamien kautta. Karjaa–Ervelä-välin kunnossapitotaso on 1A ja Kouvola–Kotka-rataosan 2. Korkeuspoikkeaman tähtivirheen raja-arvo on Karjaa–Ervelä-välillä 7 mm ja Kouvola–Kotka rataosalla 9 mm 5 metrin tulostuskannalla (Liikennevirasto 2004, liite 1). Jos ajatellaan tuentavälin olevan mieluusti vähintään 3 vuotta, saisi ratarakenteeseen muodostua maksimissaan 2,3–3,0 mm poikkeama vuodessa. Kuitenkaan tätä arvoa ei ole mielekästä käyttää, sillä tiedonlouhinnassa korkeuspoikkeamien kasvu on laskettu 20 tai 50 metrin matkalta, jolloin yksittäisen poikkeaman arvo ei vastaa tiedonlouhinnassa käytettyjä arvoja.

Työssä käytettyjä geometrian heikkenemisnopeuden arvoja verrattiin maatumkatuloksiin, videokuvaan, jäykkyyteen ja kosteusindeksiin, jotta voitiin arvioida laskentatavan toimivuutta. Tulokset vastasivat hyvin oletettuja ja todettuja ongelmakohtia. Esimerkiksi sillan päädyissä ja muissa epäjatkuvuuskohdissa geometrian heikkenemisnopeus oli selvästi koholla (kuva 47). Myös tuentakertojen määrä korreloi geometrian heikkenemisnopeuden kanssa, mikä on myös järkevä tulos.



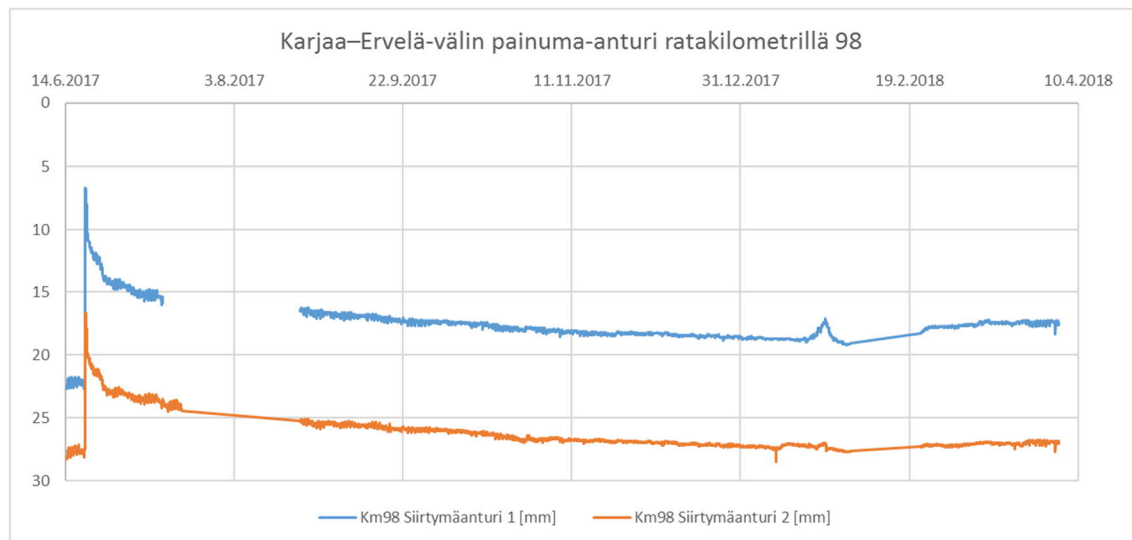
Kuva 47. Sillan pääty, jonka ongelmat havaitaan korkeuspoikkeaman kasvunopeuden, taipumien ja tuentatarpeen avulla.

Lupaavista korrelaatioista huolimatta geometrian heikkenemisnopeuteen täytyy suhtautua harkiten. Se tulisi mieltää enemmän indikaattoriksi siitä, että radassa voi olla ongelmia siinä kohtaa, enemmän kuin absoluuttiseksi totuudeksi radan rakenteellisesta kunnosta. Tuennan jälkeen geometria voi heiketä, kun tukikerroksen sepeli tiivistyy liikenteen kuormituksen alla. Tässä vaiheessa on korkeuspoikkeaman kasvunopeus voi olla suurtakin, jolloin kausiliteetti tuennan ja geometrian heikkenemisen välillä ei ole datassa selvä.

Ei ole silti tarkoitus, että geometria heikkenisi tuennan jälkeen epätasaisesti, mikä näkyisi radantarkastusvaunun mittaustuloksissa, vaan että geometria painuisi tasaisesti, jolloin geometrian suhteellinen heikkeneminen olisi vähäistä. Lisäksi voidaan todeta, että jos kohdetta pitää tukea joka vuosi, siinä on jokin ongelma. Tällöin geometrian suuri muutosnopeus voi olla tuentojen aiheuttamaa, mutta se ei silti poista sitä, etteikö radassa olisi

ongelma. Geometrian suurta muutosnopeutta käytetään tässä työssä nimenomaan ongelmakohteiden havaitsemiseen.

Absoluuttisen geometrian heikkenemisen on havaittu olevan paljon nopeampaa kuin mitä kirjallisuudessa on ilmoitettu. TTY:llä on Karjaa–Ervelä-välillä tutkimuskohde ratakilometrillä 98, jossa on painuma-anturit asennettuna rataaan. Antureiden perusteella absoluuttisen geometrian heikkeneminen on merkittävästi suurempaa kuin korkeuspoikkeaman kasvun perusteella laskettu arvo (kuva 48). Siinä, missä korkeuspoikkeaman keskihajonnan 20 metrin laskentapituuden arvot ovat pahimmillaan luokkaa 1 mm vuodessa, painuma-antureista laskettu radan painuma on pienimmilläänkin jo 3,3 mm vuodessa. Painuman kasvunopeuden vuosittainen arvo on laskettu vuoden 2017 marras-joulukuun aikana tapahtuneesta painumasta. Myös suurempaa absoluuttista geometrian heikkenemistä heti tuennan jälkeen on havaittavissa. Painuma-anturin mittaus ei ole ollut käynnissä 12.7.–23.8.



Kuva 48. Painuma-anturin mittaustuloksia Karjaa–Ervelä-väliltä.

Tähän perustuen kirjallisuudessa annetut geometrian heikkenemisen arvot ovat todennäköisimmin suhteellisen geometrian heikkenemisen arvoja. Suhteellinen virhe radassa kertoo junan kulun epätasaisuudesta, kun taas absoluuttinen geometrian heikkeneminen kertoo rakenteen kunnosta. Jatkuvaa mittausdataa on saatavilla vain suhteellisesta mittauksesta, joten arvo ei kuvasta esimerkiksi erittäin laaja-alaisia painumia radassa.

Nuolikorkeusmittauksien tuloksia ei ole käytetty, sillä niiden perusteella ei voida vetää johtopäätöksiä geometrian kehittymisestä. Osa tuloksista vaihtelee erittäin paljon vuosien välillä ja osassa geometrian kehittymisen arviointi johtaa tuloksiin, joita muu data ei tue. Esimerkiksi nuolikorkeuspoikkeama voi pienentyä vuodesta toiseen, vaikka pystygeometria heikkenisi tasaisesti. Nuolikorkeuden ongelmallisuus liittyy signaalinkäsittelyn muuntokaavoihin, jotka korostavat tiettyjä aallonpituuksia ja tekevät siten mittaustulosten

vertailusta vaikeaa. Nuolikorkeus voi vaihdella muistakin syistä kuin maarakenteiden kunnosta johtuen, jolloin se ei kuvaa tutkittavaa ongelmaa.

5.2.3 Muut louhittavat parametrit

Louhittavia parametreja on saatu eri mittaustuloksista, niiden tulkinnoista ja kunnossapitohistoriasta. Kaikilla parametreilla on omat ominaisuutensa, jotka tulee huomioida tiedonlouhinnassa.

Ojasyvyys

Ojasyvyys on laskettu laserkeilausten tulosten perusteella siten, että on valittu matalin mitattu arvo 1–8 metrin etäisyydeltä radan sivuttaissuunnasta. Tämän jälkeen radan pituussuunnassa on valittu 10 metrin jakso, jonka arvoista kaikista pienin edustaa sitä 10 metrin jakson ojasyvyyttä. Näin on tehty, koska ojan pohjalla tai sen ympärillä voi olla kasvillisuutta, joka peittää ojan pohjan laserkeilauksessa. Käyttämällä minimiarvoja poikkittais- ja pituussuunnassa voidaan päästä lähimmäksi todellista ojanpohjan syvyyttä. Koska ojasyvyys on laskettu vain matalimpana kohtana korkeusviivaan nähden, se ei ota kantaa siihen, onko oja maan pinnan tason ylä- vai alapuolella. Korkeilla penkereillä ojasyvyys on lähes aina suuri, sillä maanpinta on kaukana korkeusviivasta.

Kosteusindeksi

Kosteusindeksiin on ollut käytössä kaksi eri arvoa. Karjaa–Ervellä välillä on käytetty suhteellista kosteusindeksiä, kun taas Kouvola–Kotka-rataosalla on käytetty moisture damage index -arvoa (MDI).

Karjaa–Ervellä välillä käytetty suhteellinen kosteusindeksi kuvaa kohdan kosteuspitoisuutta suhteessa rataosan keskiarvoiseen kosteuspitoisuuteen. Kosteusindeksi on laskettu maatutkatuloksista alusrakenteesta ja pohjamaasta. Kosteusindeksi on mitattu viiden metrin välein ja mittausten välit on interpoloitu. Kosteusindeksi ei ole täysin tarkka, sillä mittausten menetelmässä on omat virhelähteensä ja kosteuspitoisuus voi käyttäytyä viiden metrin matkalla tavalla, jota interpolointi ei kuvaa. Kosteusindeksillä on tarkoitus kuvata sitä, onko alusrakenne tai pohjamaa yleisesti keskiarvoista kuivempaa, kosteampaa vai jotain siltä väliltä.

Kouvola–Kotka-rataosalla käytetty rakenteen moisture damage index -arvo perustuu eri syvyyksien kosteusindeksien yhdistämiseen eri painokertoimilla. Tulokset lasketaan absoluuttisista arvoista, eikä keskiarvoon suhteutetuista arvoista. Näin ollen, kaikki arvot ovat positiivisia ja suurempi arvo viittaa suurempaan kosteuteen.

Kerrosrajat, maarakenteiden paksuus ja kalliopinnan syvyys

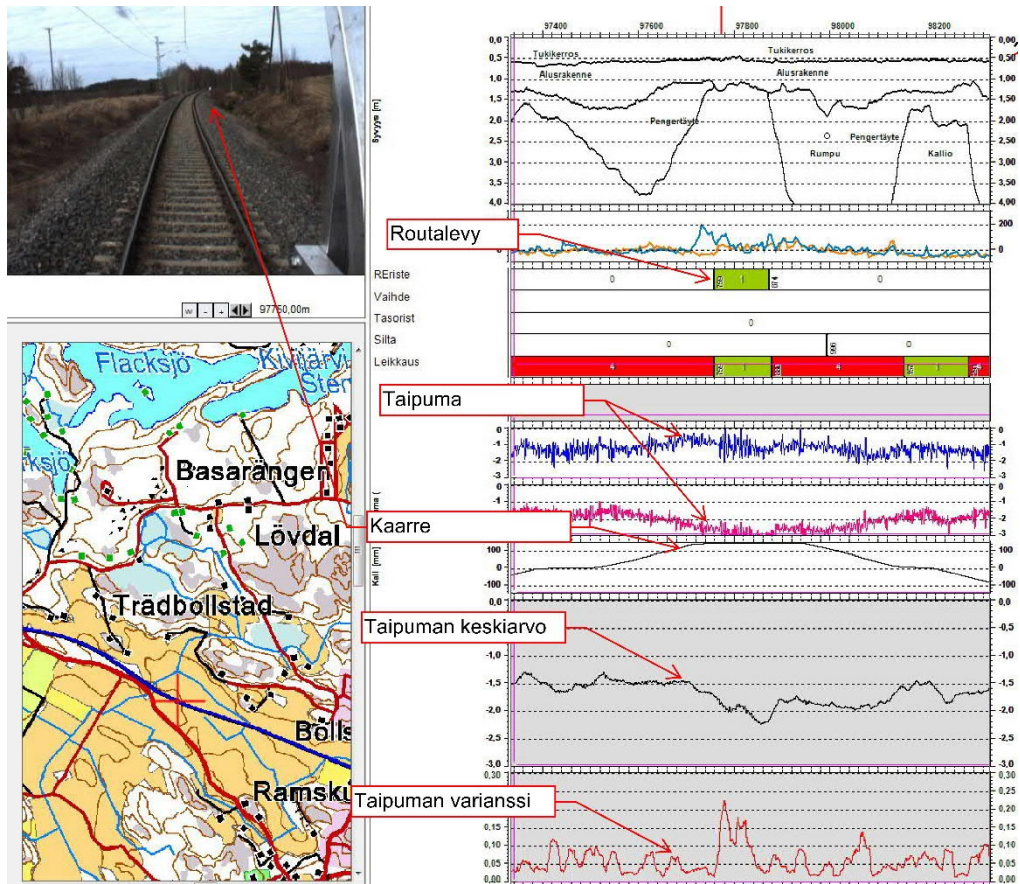
Tukikerroksen, alusrakenteen ja penkereen kerrosrajat sekä kalliopinta on tulkittu maatutka-aineistosta. Tulkintaan liittyy omat epävarmuutensa, ja tarkkuustaso on noin kymmenien senttien luokkaa. Kerrosrajojen perusteella voidaan parhaiten arvioida tukikerroksen ja päällysrakenteen paksuus sekä kalliopinnan sijainti, mutta vaihteluita rakennekerrosten materiaaleissa on vaikea havaita. Maarakenteiden paksuus on yhteenlaskettu rakennekerrosten ja penkereen paksuus.

Taipuma

Taipumamittausten tuloksia ei voida käyttää sellaisenaan samoista syistä kuin korkeuspoikkeaman mittaustuloksia. Taipumamittaustulokset ovat sahalaitaisia, jolloin tiedonlouhinnassa olisi tiheään suurta ja pientä taipumaa, mikä ei vastaa todellisuutta. Taipumamittausten osalta ei seurata taipuman kehitystä siksi, ettei mittauksia ole usealta mitauskerralta, eikä kehitystä ole välttämätöntä seurata. Tiedonlouhintaa varten taipumamittauksista on tehty kahdenlaista dataa, varianssi ja keskiarvo.

Taipumamittausten varianssi kertoo vaihtelusta jäykkyydessä. Varianssia tarvitaan tunnistamaan niitä kohteita, joissa taipuma muuttuu nopeasti eli niin sanotusti heilahtaa. Varianssilla kadotetaan absoluuttiset arvot, joten se ei kerro sitä, kuinka paljon taipuma on, vaan ainoastaan sen vaihtelun suuruuden. Taipumamittausten keskiarvolla yksittäiset piikit tasoittuvat, mutta keskiarvoinen taipuman absoluuttinen arvo saadaan selville. Keskiarvolla voidaan seurata taipuman suuruuden kehittymistä, mutta pistemäiset huippuarvot jäävät huomioimatta.

Kuten kuva 49 osoittaa, varianssi reagoi ainoastaan vaihteluihin taipumassa ja keskiarvo taipuman tason muuttumiseen. Keskiarvo vaikuttaa kuvaavan paremmin taipumamittauksen tuloksia, mutta tuloksiin vaikuttaa muun muassa kaarteet, jolloin taipumamittaustulokset eivät aina kerro aidosti radan taipumasta. Kaarteiden vaikutusta on pyritty poistamaan laskemalla keskiarvo kahden eri suunnan mittauksesta. Taipuma on myös routalevyllä tyypillisesti suurta, sillä routalevy lisää rakenteen joustoa merkittävästi, vaikka rakenne olisi muuten jäykkä.



Kuva 49. Taipuman varianssi ja keskiarvo.

Kuvassa 49 nähdään, että kaarteiden kohdalla taipuman keskiarvo nousee arvosta $-1,5$ mm yli $-2,0$ mm. Tämä ei välttämättä tarkoita sitä, että rata taipuisi $0,5$ mm enemmän, vaan osa siitä on kaarteiden aiheuttamaa virhettä. Varianssi reagoi tässä kohtaa ainoastaan taipuman vaihteluun, mutta kaarre ei muuten näy varianssissa. Routalevy näkyy varianssissa ja keskiarvossa kasvattavana tekijänä. Ennen tiedonlouhinnan tekemistä oli vaikea arvioida, onko keskiarvo vai varianssi parempi indikaattori taipumalle, joten päädyttiin käyttämään molempia arvoja.

Kallioleikkaus, maaleikkaus, penger ja tunneli

Ratarakenteen perustamistapa on luokiteltu joko kallioleikkaukselle, maaleikkaukselle, alusrakenteelle pohjamaan päällä, penkereelle tai tunneliin. Luokittelu on tehty käsin maatumkatulosten ja videokuvan perusteella. Alusrakenne pohjamaan päällä tarkoittaa sitä, ettei alusrakenteen alla ole penkerettä, mutta rakenne ei ole silti maaleikkauksessa, eli ympäröivä maanpinta ei ole korkeammalla kuin ratapenger.

Epäjatkuvuuskohtat

Karjaa–Ervelä-välillä epäjatkuvuuskohtat on tulkittu videokuvan ja maatumkatulosten perusteella. Epäjatkuvuuskohtiksi on merkitty sillanpäädät, tunneleiden suuaukot sekä kal-

lioleikkauksen alkamiskohdat. Epäjatkuvuuskohta on määritetty 50 metrin alueena epäjatkovuuskohdasta. Epäjatkuvuuskohtien alueet on mitattu silloilta ja tunnelista vain pois päin jäykästä rakenteesta, mutta kallioleikkauksella alue on merkitty kumpaankin suuntaan. Näin on toimittu, koska kallioleikkaukselta on luotettavampaa maatumkatadataa kuin silloilta ja tunneleista, jolloin epäjatkuvuuskohtien tutkiminen perustuu runsaampaan dataan.

Routalevyt, vaihteet ja sillat

Yksittäiset rakenteet eli routalevyt, vaihteet ja sillat on tulkittu dataan videokuvan ja maatumkatulosten perusteella.

Tukikerroksen ikä

Karjaa–Ervelä-välillä tukikerroksen ikä on laskettu tunnetusta kunnossapitohistoriasta. Tämän parametrin avulla voidaan arvioida sitä, onko päällysrakenteen vaihto (matala ikä) vaikuttanut geometriavirheisiin positiivisesti ja vähentänyt poikkeamien kasvunopeutta.

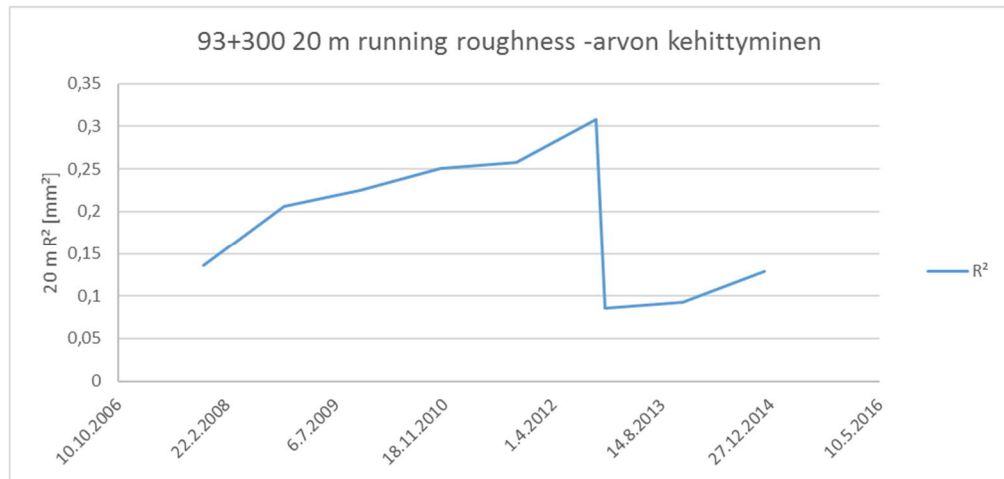
Tuentakerrat ja kunnossapitohistoria

Karjaa–Ervelä-välin tuentahistoria saatiin kilometriväliltä 87–119 vuosilta 2007–2013. Tiedonlouhintaa varten tuentahistoriasta on poimittu, kuinka monta kertaa yksittäisen rivin edustama kohta on tuettu. Tuentakerrat eivät ota kantaa siihen, milloin tuennat ovat tapahtuneet. Data kertoo ainoastaan sen, mikä on ollut kohteen tuentatarve.

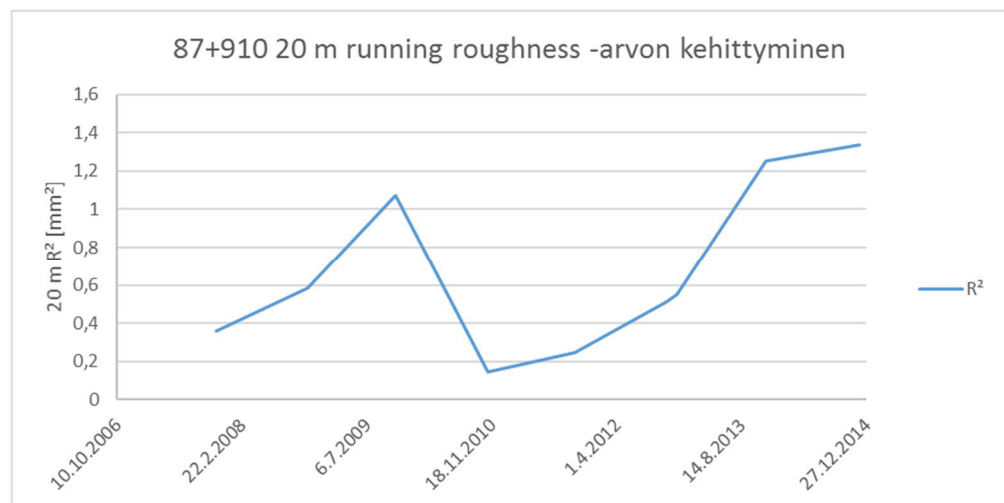
Kunnossapitohistoriasta oli saatavilla myös routalevytyskohteita, kuivatuksen parannuskohteita sekä sepelinvaihtokohteita. Näille tehtiin oma parametrinsa, johon kyseiset toimenpiteet oli yhdistetty. Kunnossapitoparametri luotiin helpottamaan todettujen ongelmakohteiden havaitsemista, joskaan siihen ei voida välttämättä varsinaisessa tiedonlouhinnassa nojata tiedon vähäisyyden vuoksi.

Geometrian heikkenemisvuosien määrä

Geometrian heikkenemisvuosien määrä voitiin laskea vain Karjaa–Ervelä-väliltä, koska Kouvola–Kotka-rataosan geometrian heikkenemisen laskenta perustui vain muutaman vuoden dataan. Geometrian heikkenemisessä ei huomioida niitä vuosia, kun geometria on parantunut eli korkeuspoikkeamat ovat vähentyneet. Yleensä nämä vuodet selittyvät kunnossapidon toimilla eli pääasiassa tukemisella. Tuentahistoria ei todennäköisesti ole täydellinen, sillä korkeuspoikkeaman muutosnopeuden perusteella on paikkoja, joissa ei ole tuentahistoriaa tietyltä vuodelta, mutta geometriapoikkeamat ovat silti selvästi vähentyneet (kuvat 50 ja 51). Siksi louhintaa varten on kehitetty luku, joka kuvaa geometrian heikkenemisvuosien määrää.



Kuva 50. Running roughness -arvon kehittyminen kohteesta, jossa on kunnossapitohistorian mukaan tuettu 3.5.2012.



Kuva 51. Running roughness -arvon kehittyminen kohteesta, jossa kunnossapitohistorian mukaan ei ole tehty tuentoja.

Luvun perusteella voidaan vertailla niiden kohteiden tuloksia, joista on paljon heikkenemistietoa, niihin kohteisiin, joista on harvakseltaan. Tiedonlouhinnassa tämä voi edesauttaa tulosten selitettävyyttä ja kunnossapitohistorian luotettavuuden arviointia.

Nolla-arvot

Kaikilla riveillä ei ole kaikkea tietoa, koska kaikkia mittauksia ei ole saatu aivan kaikkialta. Tällöin datassa yksittäisellä rivillä voi olla tyhjä kohta, eli nolla-arvo, jossakin sarakkeessa. Esimerkiksi kalliopinnan syvyyden osalta arvoja ei aina ole, mikäli kalliopinta on erittäin syvällä, eikä sitä voida havaita. Tällöin nolla-arvot voidaan liittää kalliopinnan syvyyden luokkaan > 2,0 metriä, kun havainto voidaan varmistaa videokuvasta ja maatutkasta. Arvojen liittäminen tiettyyn luokkaan on tehty jo ennen tiedonlouhintaa.

Yksittäisten havaintojen, kuten routalevyn, vaihteen tai sillan, nolla-arvot on helppo liittää lähtötietojen perusteella siihen luokkaan, missä kyseistä elementtiä ei esiinny. Datassa ei ole aina mainittu, ettei ole routalevyä, vaihdetta tai siltaa, vaan lähtödatassa arvoina ovat ainoastaan ne kohdat, joissa kohde on.

Karjaa–Ervelä-välin alusrakenteen tai pohjamaan kosteuden nolla-arvoja ei taas voida liittää mihinkään luokkaan. Näitä nolla-arvoja ei voida ottaa mukaan tiedonlouhintaan, sillä ei voida luotettavasti määrittää, mihin luokkaan ne kuuluvat. Nolla-arvoja kosteusindeksissä on tunneleissa, vaihteissa ja silloilla, joissa mittaus ei tuota luotettavia tuloksia häiriölähteiden takia. Häiriökohta datassa havaittiin myös Pohjankurun liikennepaikalla, jossa metalliaita radan vieressä aiheutti häiriötä maatumkatuloksiin. Nolla-arvot, joita ei voida sisällyttää mihinkään luokkaan, vaikuttavat tiedonlouhintaan siten, että kyseinen kohta jää louhinnan ulkopuolelle sen attribuutin osalta.

5.3 Tiedonlouhinnan tekeminen ja analyttiset kysymykset

Kuvassa 52 on esitetty tiedonlouhintaprosessin vaiheet rautateistä saatavan datan louhimiseen sovellettuna. Osa signaalinkäsittelystä on tehty ennen tätä tutkimusta, mutta muut vaiheet tehtiin tässä työssä.



Kuva 52. Tiedonlouhinnan prosessi sovellettuna rautatiedataan.

Tiedonlouhinnassa kysyttiin seuraavat analyyttiset kysymykset:

- 1) Mikä johtaa yleisimmin tietynlaiseen geometrian heikkenemiseen?
- 2) Mitkä tekijät ovat yleisimpiä, kun geometrian heikkenemisnopeus on suurta?
- 3) Onko rakenteen paksuuden ja rakenteen kunnan välillä korrelaatiota?
 - a. Jos on, onko se lineaarinen ja voidaanko antaa raja-arvoa sille, mikä erottaa hyvän ja huonon rakenteen toisistaan?
- 4) Miten tukikerros vaikuttaa geometrian heikkenemiseen?
- 5) Onko kosteuspitoisuuden ja rakenteen kunnan välillä korrelaatiota?
 - a. Jos on, onko se lineaarinen ja voidaanko antaa raja-arvoa sille, mikä erottaa hyvän ja huonon rakenteen toisistaan?
- 6) Miten radan taipuma vaikuttaa geometrian heikkenemiseen?
- 7) Millaisia asioita esiintyy paikoissa, joissa ratarakenteessa on routalevy?
- 8) Miten ratarakenteen perustukset vaikuttavat geometrian heikkenemiseen?

Analyyttisiin kysymyksiin vastaamiseksi tehtiin useita louhintoja ja kysymystä pyrittiin lähestymään monesta näkökulmasta. Tulosten yhteydessä on kerrottu, miten analyyttiseen kysymykseen saatu analyyttinen vastaus on muodostunut. Osa kysymyksistä on kehittynyt vasta ensimmäisten tiedonlouhintojen tulosten perusteella.

5.4 Saadut tulokset

Tässä kappaleessa on esitelty LISp-Miner -ohjelmistosta saadut tulokset. Tuloksista on esitetty ne hypoteesit, jotka vastaavat parhaiten kaikkia saatuja hypoteeseja. Ohjelmisto voi tuottaa useita eri hypoteeseja, joiden välillä ei välttämättä ole suuria eroja ja hypoteeseja tukeva data voi olla peräisin samoilta riveiltä. Mikäli kysymykseen on saatu selkeästi erityyppisiä hypoteeseja, on ne esitetty erikseen. Tekstiin on sijoitettu lyhyitä välihuutoja, jotka on korostettu sinisellä reunuksella.

Raportoidut hypoteesit on esitetty liitteissä A ja B. Hypoteeseja on visualisoitu seurausten, ennakkoehtojen sekä rajausten osalta. Väritetty alue kuvaa niitä arvoja, joihin hypoteesin kaikki halutut tulokset kuuluivat. Prosenttiluku väritetyn alueen sisällä kuvaa siinä niissä luokissa olevien arvojen osuutta kaikista attribuutin arvoista. Toisin sanoen, väritetty alue kuvaa niitä arvoja, jotka liittyvät hypoteesiin ja prosenttiarvo kertoo väritetyn alueen harvinaisuudesta koko datassa. Mitä pienempi prosenttiarvo, sitä vähemmän kyseisiä arvoja löytyy koko datasta. Myös hypoteesin kontingenssitaulukko on esitetty ja hypoteesista tehdyt huomiot on kirjoitettu auki. Kontingenssitaulukon on merkitty rivien absoluuttiset lukumäärät sekä niiden alle sulkuihin prosentiosuus kyseisen kontingenssitaulun rivin arvoista.

5.4.1 Tiedonlouhinnan tuottamia hypoteeseja Karjaa–Ervelä-väliltä

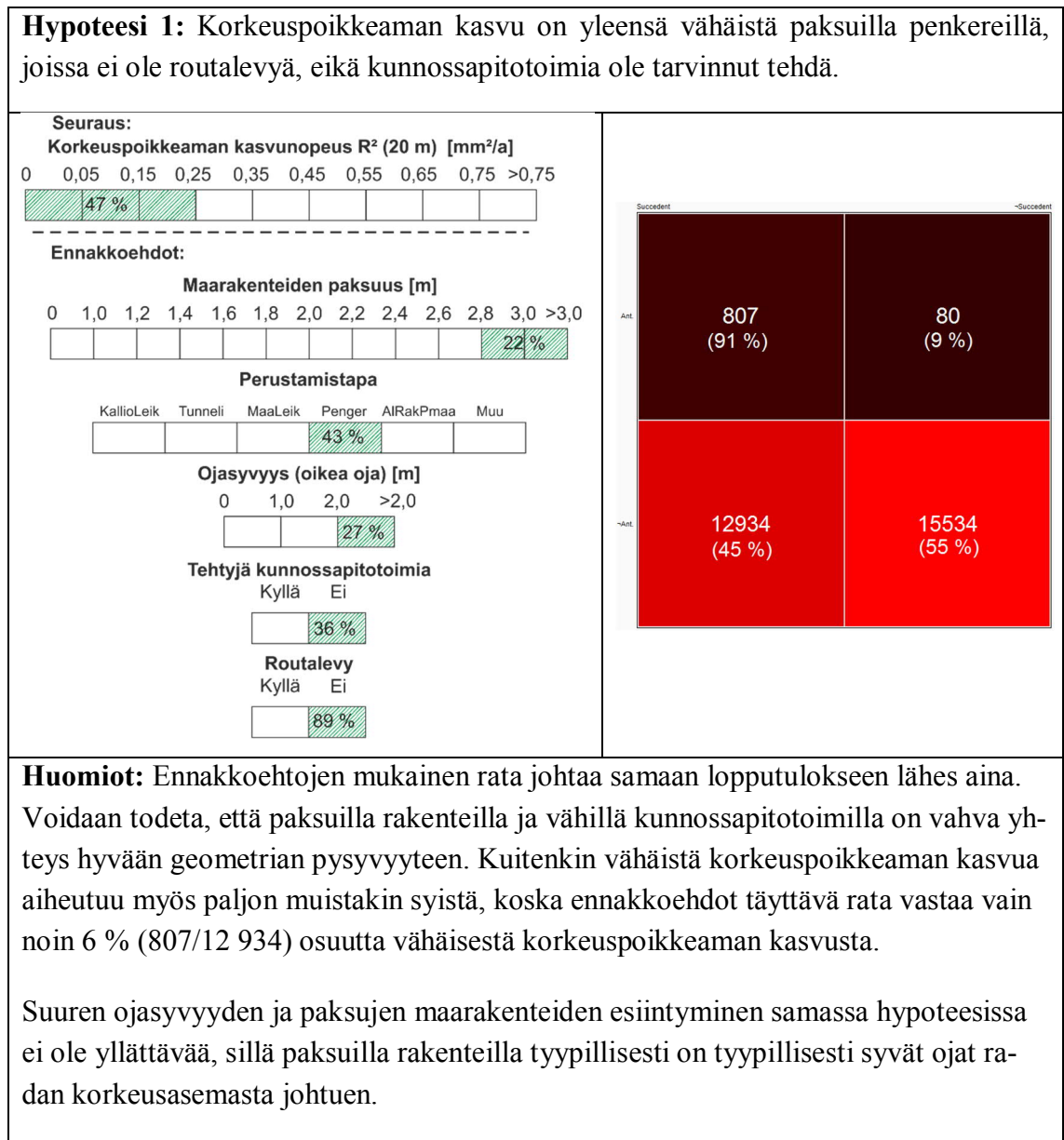
Rantaradan Karjaa–Ervelä-välin tiedonlouhinnan tuottamista tuloksista poimitut hypoteesit on esitetty tässä kappaleessa. Hypoteesien tarkat sisällöt ovat liitteessä A taulukoissa 6–53. Ensimmäisen hypoteesin sisältö on esitelty tarkemmin esimerkinomaisesti tässä kappaleessa.

Kysymys 1: Mikä johtaa yleisimmin tietynlaiseen geometrian heikkenemiseen?

Hypoteesi 1: *Korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä vähäistä paksuilla penkereillä, joissa ei ole routalevyä, eikä kunnossapitotoimia ole tarvinnut tehdä.*

Yleisesti radasta 46,8 % (13 741 metriä) kuuluu vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun luokkiin, mutta ehdot täyttävällä radalla vastaava luku on 91 %. Taulukossa 3 on havainnollistettu tiedonlouhinnan tulosta. Vastaavanlaisia tuloksia saatiin useampia. Tulokset viittasivat siihen, että korkeuspoikkeaman kasvu on hidasta, kun maarakenteet ovat paksut ja kunnossapitotoimia ei ole tehty.

Taulukko 3. Hypoteesi 1 kysymykseen 1.



Myös toisenlaisia hypoteeseja saatiin saman tiedonlouhinnan tuloksena.

Hypoteesi 2: Korkeuspoikkeaman kasvu on lähes aina (94 %) vähäistä tunneleissa, joissa ei ole tarvinnut tehdä kunnossapitotoimia ja maarakenteet ovat alle metrin paksuiset.

Tunneleilla on yhtä vahva yhteys vähäiselle korkeuspoikkeaman kasvulle kuin paksuilla penkereillä. Tunneleiden hypoteeseissa mainitaan paksujen penkereiden hypoteesien kaltaisesti vähäiset kunnossapitotoimenpiteet ja tuentakerrat. Osassa hypoteeseista ei mainittu tunnelia, vaan ainoastaan ohuet maarakenteet kalliolla. Näiden hypoteesien data sisälsi myös pieniä osuuksia kallioleikkauksilla. Osassa näistä hypoteeseista oli mainittu, että rakenteessa on routalevy, mikä taas nimenomaan puuttui rakenteesta paksujen penkereiden osalta.

Hypoteesit on poimittu useiden hypoteesien joukosta tutkimalla, mitä hypoteesit ovat tarkoittaneet. Hypoteeseja saatiin 168 kappaletta, joista 38 ensimmäistä on esillä kuvakaappauksessa LISp-Miner -ohjelmistosta (kuva 53). Kaikki 38 hypoteesia ovat johtaneet täysin samaan lopputulokseen, eli keskiarvoista vähäisempään korkeuspoikkeaman kasvuun. Hypoteesien ennakkoehdot vaihtelevat siten, että esimerkiksi hypoteesien 12 ja 13 välinen ero on se, että toisessa tunnelin maarakenteiden paksuus on alle 1,0 metriä ja toisessa alle 1,2 metriä. Tunneleissa on pääasiassa erittäin ohuet rakenteet ja kasvattamalla rakenepaksuuden luokkaa hypoteesi ei muutu mitenkään. Sama trendi toistuu muidenkin hypoteesien välillä.

Task: Kysymys 1: R2_20m
 Comment: -
 Taskgroup: Default group of tasks
 Data matrix: RatadataV10
 Task type: 4ft-Miner
 Task run
 Start: 13.3.2018 08:04:04 Total time: 0h 11m 21s
 Number of verifications: 46948368
 Number of hypotheses: 168 Mode: Standard

Show all Show not in group Highlight
 Show hypotheses just from group:

Add group Del group Edit group

Actual group of hypotheses: All hypotheses
 Hypotheses in group: 168 Shown hypotheses: 168 Highlighted: 0

Nr.	Id	Conf	Hypothesis
1	137	0.949	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Maapaks(<1) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
2	138	0.947	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Maapaks(<1.2) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
3	145	0.944	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) & KP_R2_20m_LKM(5,6) >>< KP_R2_20m(<0.25)
4	74	0.944	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6.5) & Maapaks(<1) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
5	113	0.943	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
6	119	0.943	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1.2) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
7	125	0.943	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1.4) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
8	132	0.943	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & MaaKallioLeik(Tunneli) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
9	156	0.943	MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
10	159	0.943	MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1.2) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
11	162	0.943	MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1.4) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
12	6	0.943	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
13	9	0.943	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1.2) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
14	12	0.943	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1.4) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
15	18	0.943	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & MaaKallioLeik(Tunneli) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
16	30	0.943	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
17	32	0.943	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1.2) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
18	34	0.943	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & MaaKallioLeik(Tunneli) & Maapaks(<1.4) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
19	37	0.943	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & MaaKallioLeik(Tunneli) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
20	20	0.943	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Maapaks(<1) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
21	81	0.942	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<7) & Maapaks(<1) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
22	68	0.942	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6) & Maapaks(<1) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
23	75	0.941	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6.5) & Maapaks(<1.2) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
24	22	0.941	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Maapaks(<1.2) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
25	139	0.940	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Maapaks(<1.4) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
26	82	0.940	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<7) & Maapaks(<1.2) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
27	69	0.939	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6) & Maapaks(<1.2) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
28	144	0.938	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
29	77	0.936	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6.5) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
30	84	0.935	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<7) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
31	71	0.934	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
32	24	0.934	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Maapaks(<1.4) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
33	2	0.933	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6.5) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
34	76	0.933	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6.5) & Maapaks(<1.4) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
35	3	0.933	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<7) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
36	83	0.932	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<7) & Maapaks(<1.4) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
37	26	0.932	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
38	1	0.931	EpaJatkv(EiEpaJatkv) & KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)
39	70	0.931	KUPIToimi(EIKUPIToimia) & Leveys(<6) & Maapaks(<1.4) & Routaeri(RoutaEn) & TuennatYht(0/1) >>< KP_R2_20m(<0.25)

Detail Goto ID Copy Remove Filter Syntax Filter BK Filter BK Survey Sorting Export

Kuva 53. LISp-Miner -ohjelmiston esittämiä hypoteeseja.

Tässä tiedonlouhinnassa saatiin kahdenlaisia toisistaan poikkeavia hypoteeseja. Toiset hypoteesit viittasivat vahvasti paksuihin penkereisiin ja vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun ja toiset tunneleihin sekä kallioleikkauksiin ja vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun. Samaan asiaan viittaavat hypoteesit erosivat hyvin vähän toisistaan ja käytännössä samaa tarkoittavat tekijät vaihtelivat keskenään. Näin ollen, vaikka hypoteeseja saatiin määrällisesti paljon, varsinaisia tuloksia oli vain kaksi.

On myös hyvä huomata, että kaikkien saatujen hypoteesien lopputulos oli täysin samassa luokassa. Tämä viittaa siihen, että paljon tietynlaista rataa johtaa vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun, mutta keskiarvoiseen tai suureen korkeuspoikkeaman kasvuun ei näin vahvaa yhteyttä saatu. Tätä selittää se, että suuri korkeuspoikkeaman kasvu on harvinaisempi ilmiö kuin vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu. Tällöin louhinta pitää rajoittaa vain suurempien korkeuspoikkeaman kasvun luokkien louhintaan, sillä on tyypillisesti yleisempää, että jokin johtaa vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun kuin suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Mikäli saadaan tuloksia, joissa suuri korkeuspoikkeaman kasvu on yleisin tulos, voidaan todeta niiden osalta yhteyden olevan erittäin vahva.

Tämä louhinta tehtiin running roughness -arvoilla 20 ja 50 metrin laskentapituuksilla sekä 20 metrin laskentapituusella korkeuspoikkeaman keskihajonnalla. Kaikkien louhintojen hypoteesit viittasivat samoihin tuloksiin. Kun kysymys aseteltiin siten, että mikä johtaa keskiarvoista merkittävästi yleisemmin johonkin korkeuspoikkeaman kasvuun, saatiin tulokseksi erilaisia hypoteeseja.

Hypoteesi 3: *Pienestä alusrakennekosteudesta penkereellä, jolla ei ole routalevyä tai tehtyjä kunnossapitotoimia, seuraa erittäin vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua yli neljä kertaa yleisemmin kuin koko rataosuudella yleensä.*

Hypoteesin tuloksen yhteys ei ole niin vahva kuin aiemmissa hypoteeseissa, mutta suhteessa siihen, kuinka paljon yleisesti rataa johtaa erittäin vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun, tulos on merkittävän erilainen. Ennakkoehtojen mukaisesta radasta 30 % (507 m) johtaa erittäin pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun taas vastaava luku muilla rakenteilla on 4 % (1 148 m). Kun verrataan erittäin pienen korkeuspoikkeaman määrää (1 655 m) hypoteesia tukevan radan määrään (507 m), huomataan, että merkittävä osa (31 %) erittäin pienestä korkeuspoikkeaman kasvusta johtuu juurikin ennakkoehtojen mukaisesta radasta. Tämän tuloksen mukaan alusrakenteen vähäisellä kosteudella, pengerperustuksilla ja vähäisillä kunnossapitotoimilla on vahva yhteys vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Tiedonlouhinta aloitettiin tällä analyttisellä kysymyksellä, koska haluttiin nähdä, mihin tiedonlouhinta johtaa, jos sitä ei rajoiteta tiettyyn näkökulmaan. Näin nähdään kaikista ylimalkkaisimpia trendejä. Yleisimpien tiedonlouhintojen tuloksissa esiintyneet parametrit antavat viitettä siitä, millä tekijöillä on vahvimpia yhteyksiä tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvun luokkaan. Lisäksi, jos tyypillinen tapaus on se, ettei rakenteessa ole esimerkiksi routalevyä, hypoteesi, jossa on routalevy yhtenä tekijänä, on poikkeuksellinen. Tällaiset hypoteesit voivat edustaa vahvoja yhteyksiä tekijöiden välillä.

Yleisimpiä tiedonlouhinnasta saatuja yhteyksiä olivat, että paksut ja kuivat rakenteet sekä tunnelit johtavat yleensä vähäiseen geometrian heikkenemiseen.

Kysymys 2: Mitkä tekijät ovat yleisimpiä, kun geometrian heikkenemisnopeus on suurta?

Tiedonlouhinta kohdennettiin seuraavaksi suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Louhinta aloitettiin kysymällä, mitkä tekijät johtavat siihen tyypillisimmin.

Hypoteesi 4: *Korkeuspoikkeaman kasvu yleensä on suurta, kun maalle perustetun radan rakenteet ovat erittäin ohuet (1–1,6 m), rakenteessa on routalevy, rakenne ei ole epäjatkuvuuskohdan alueella ja korkeuspoikkeaman kasvuvuosien lukumäärä on alle 4.*

Hypoteesi 5: *Korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä suurta, kun radan rakennekerrokset ovat ohuet (1–1,6 m), rakenteessa on routalevy, rakenne ei ole epäjatkuvuuskohdan alueella ja kunnossapitohistorian mukaan tuentoja on tehty useammin kuin 4 kertaa 7 vuoden aikana.*

Hypoteesit ovat saman tiedonlouhinnan tuottamia. Erona niillä on tuentakertojen ja korkeuspoikkeaman kasvuvuosien määrien maininta sekä se, että maaperustukset on mainittu vain ensimmäisessä. Kun hypoteesien dataa luetaan tarkemmin, huomataan, että se on peräisin täysin samoista kohteista: Pohjankurun liikennepaikan V002 vaihteen lähistöltä ja kilometripaalu 98 ympäröivältä peltoaukealta.

Hypoteesiparista erityisen tekee se, että ne osoittavat tuentakertojen ja korkeuspoikkeaman kasvuvuosien korreloivan hyvin keskenään niin kuin niiden pitäisikin. Kun tuetaan useasti, korkeuspoikkeama on saatu laskettua vain muutamalta vuodelta. Tämän lisäksi tällöin korkeuspoikkeaman kasvu on ollut varsin suurta. Tämä on viitettä siitä, että korkeuspoikkeaman kasvunopeuden laskenta kuvastaa radan todellista käyttäytymistä ja kunnossapitotarvetta.

Tiedonlouhinnan varsinainen tulos ei ole kuitenkaan mielekäs siitä syystä, että se edustaa vain kahta yksittäistä osaa radasta, vaikkakin tulokset ovat vakuuttavat tilastojen perusteella. Koska radan rakennepaksuudet olivat mukana hypoteeseissa, onkin hyvä erottaa tiedonlouhinta maalle perustettuun rataan ja kalliolle perustettuun rataan, sillä kalliolle perustetut ohuet rakenteet käyttäytyvät saman paksuisina oletetusti eri tavalla kuin maalle perustetut rakenteet.

Hypoteesi 6: *Maaperustuksella korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä suurta, kun pengerrin on alle metrin paksuinen, kyseessä ei ole epäjatkuvuuskohta, mutta taipuman varianssi on koholla.*

Maaperustuksen osalta hypoteesi ei ole pohjimmiltaan muuttunut. Kun rakenne on perustettu maalle ja pengerrin on alle metrin paksuinen, voidaan olettaa, että kokonaispaksuus on myös pieni, koska alusrakenteen paksuus on pääasiassa alle metrin. Eli ohuet rakenteet jälleen viittaavat suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Mielenkiintoisen tuloksesta tekee se, että kyseessä ei ole epäjatkuvuuskohta, mutta silti radassa on jäykkyysvaihteluita, jotka näkyvät taipuman varianssissa. Vaikka ohuiden maarakenteiden kohdalla taipuma onkin oletetusti suurta varsinkin heikolla pohjamaalla, taipuman varianssi kertoo siitä, että ohuilla rakenteilla taipuma myös vaihtelee paljon.

Tämä viittaa siihen, että homogeenisessa radassa on paljon jäykkyyseroja. Näiden jäykkyyserojen kohdalla on havaittu myös suurta korkeuspoikkeaman kasvua. Voi olla, että jäykkyyserot selittyvät juurikin korkeuspoikkeamien kautta, kun korkeuspoikkeama aiheuttaa taipumamittauksen tuloksissa vaihtelua. Toinen syy voi olla roikkuvat ratapölkkyt, jotka aiheuttavat taipuman vaihtelua muuten homogeenisella radalla. Joka tapauksessa hypoteesin mukaan suuren taipuman varianssin, ohuiden rakenteiden ja suuren korkeuspoikkeaman kasvun välillä on yhteys. Sama tiedonlouhinta tehtiin koskien kalliolle perustettuja rakenteita.

Hypoteesi 7: *Kalliolle perustetulla radalla korkeuspoikkeaman kasvunopeus yleensä on suurta, kun radassa on alle 1,4 m paksuiset maarakenteet, jotka sisältävät alle 0,5 m pengertä, taipuman varianssi on koholla ja korkeuspoikkeaman kasvuvuosien määrä on 4–5.*

Kalliolle perustetulla radalla hypoteesi on hyvin lähellä maalle perustetun radan hypoteesia. Poikkeuksellisen suuret taipuman varianssin arvot ovat jälleen läsnä, jolloin suuren korkeuspoikkeaman kasvun ja suuren taipuman varianssin yhteys on jälleen vahva. Vertaamalla hypoteesien 6 ja 7 kontingenssitauluja huomataan, että suuri korkeuspoikkeaman kasvu on lähes yhtä yleistä maaperustuksilla (13 %) kuin kallioerustuksilla (14 %).

Tässä tiedonlouhinnassa etsittiin yleisellä tasolla yli keskiarvoiseen geometrian heikkenemisnopeuteen ($R^2(20\text{ m}) > 0,35\text{ mm}^2/\text{a}$) johtavia tekijöitä. Tarkoituksena oli kartoittaa niitä yleisiä olosuhteita, jotka vallitsevat samaan aikaan suuren geometrian heikkenemisnopeuden kanssa. Tiedonlouhinnan mukaan ohuet rakenteet, useat kunnossapitotoimet ja suuri taipuman varianssi lisää suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuutta. Tässä tiedonlouhinnassa selvinneitä yhteyksiä tutkitaan tarkemmin myöhemmissä louhinnoissa.

Kysymysten 1 ja 2 yleisen tason louhinnoissa hypoteesit tulivat korkeuspoikkeaman kasvunopeuden ääripäistä. Tämä viittaa siihen, että geometrian erinomaiseen tai huonoon kuntoon johtavat tietyt asiat, mutta niiden välille johtavaan tulokseen voi johtaa hyvinkin erilaiset tapaukset, jolloin yleisen tason tiedonlouhinta ei niitä nosta esiin.

Kysymys 3: Onko rakenteen paksuuden ja rakenteen kunnan välillä korrelaatiota?

Tässä tiedonlouhinnassa on käsitelty ainoastaan maaperustuksella olevaa rataa, eli kallioleikkaukset, tunnelit ja sillat on poistettu louhinnasta. Tämä on tehty siitä syystä, että kalliolle perustetun radan maarakenteiden paksuus ei vastaa maalle perustettujen maarakenteiden paksuuden vaikutusta. Esimerkiksi lähes pelkällä tukikerroksella kallion päällä voidaan ylläpitää hyvää geometriaa, mikä ei ole Suomessa mahdollista pohjamaalle rakennettaessa. Kallioleikkaukset on käsitelty omassa tiedonlouhinnassaan kysymyksen 8 alla. Aluksi kysyttiin, mitkä asiat johtavat tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvun ohuilla rakenteilla.

Hypoteesi 8: *Ohuilla maalle perustetuilla rakenteilla (1,2–1,6 m) keskiarvoiseen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 73 % sellaisista rakenteista, joissa alusrakenne on keskiarvoisen kuiva, rakenteessa ei ole routalevyä, taipuman varianssi on vähäistä, tukikerros on alle 5 vuotta vanhaa ja korkeuspoikkeaman kasvuvuotia on 5–6. Muualla ohuilla rakenteilla samaan korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 43 % rakenteista.*

Hypoteesin tuloksien perusteella ohuella rakenteella keskiarvoiseen korkeuspoikkeaman kasvuun päästään yleisimmin sellaisella rakenteella, joka toimii ilman routalevyä ja on keskiarvoisen kuiva. Tällöin joko kuivatus on todennäköisesti hoidettu hyvin tai pohjamaa ja pengermateriaali on hyvin vettä läpäisevää. Keskiarvoinen korkeuspoikkeaman kasvu on hieman yleisempää ohuilla (1,2–1,6 m) rakenteilla (49 %) kuin koko rataosuudella keskiarvoisesti (46 %).

Hypoteesi 9: *Korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä suurta sellaisilla 1,2–1,8 m paksuisilla rakenteilla, joissa on routalevy, tuentoja on tehty yli 4 kertaa 7 vuoden tarkastelujakson aikana, korkeuspoikkeama on kasvanut enintään 4 kertaa 7 vuoden tarkastelujakson aikana ja rakenne ei ole epäjatkuvuuskohdassa.*

Useat tuennat ja routalevy muuttavat tulosta siten, että korkeuspoikkeaman kasvu on ohuilla rakenteilla yleensä suurta. Hypoteesin ennakkoehtojen mukainen rata edustaa merkittävää osuutta (28 %) suuresta korkeuspoikkeaman kasvusta ohuilla rakenteilla, vaikka hypoteesia tukevaa dataa ei ole määrällisesti paljon.

Seuraavaksi kysyttiin, onko joillakin ehdoilla yleistä, että paksuilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta.

Hypoteesi 10: *Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 51 %:lla yli 1,8 m paksuisista penkereelle perustetuista rakenteista, joilla on tehty kunnossapitotoimia ja taipuman varianssi on suurta.*

Hypoteesia puoltavassa datassa on useita pistemäisiä alle 20 metrin mittaisia paikkoja. Yksi pidempijaksainen kohde löydettiin kilometriväliltä 104+500–104+900, jossa paksuilla penkereellä ei ole tuentahistorian mukaan tehty toimenpiteitä, rakenteessa ei ole

routalevyä ja ojat ovat erittäin syvät radan korkeusasemasta johtuen. Rakenteen kosteusindeksitkin ovat alhaiset. Datasta ei voida tulkita, mikä aiheuttaa korkeuspoikkeaman suurta kasvua tällä alueella. Kunnossapitohistoria kertoo, että päällysrakennetta on uusittu näillä kohtaa. Suuri taipuman varianssi kertoo enemmänkin seurauksista kuin syistä suurelle korkeuspoikkeaman kasvulle. Tämä kohde ja muutkin pistemäiset kohteet ovat tyypillisesti alueella, jossa rakennepaksuudet vaihtelevat lyhyellä matkalla. Tällaisissa kohdissa siirrytään matalalta kallioleikkaukselta tai maaleikkaukselta useita metrejä paksulle penkereelle muutamien kymmenien metrien alueella. Tyypillisesti suuri korkeuspoikkeaman kasvu on harvinaisempaa yli 1,6 m paksuisilla rakenteilla (15 %) kuin koko rataosuudella keskiarvoisesti (18 %). Vahvempia hypoteeseja paksuille rakenteille saadaan vähäisellä korkeuspoikkeaman kasvulla.

Hypoteesi 11: *Erittäin paksuilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä erittäin vähäistä, kun ojat ovat syvät, rakenteessa ei ole routalevyä, tuentoja on tehty enintään kerran 7 vuoden tarkastelujaksolla ja tukikerros on vanhaa.*

Paksuilla rakenteilla vähäiset kunnossapitotoimet viittaavat vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun. Tämä on järkevä tulos, sillä hyvin suoriutuvalle radalle ei tarvitse tehdä toistuvia kunnossapitotoimenpiteitä. Erittäin vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu on lähes yhtä yleistä (28 %) paksuilla rakenteilla (> 1,6 m), kuin se on keskiarvoisestikin koko rataosuudella (27 %).

Seuraavaksi siirryttiin kysymyksiin, joissa vertaillaan paksujen ja ohuiden rakenteiden käyttäytymistä keskenään. Ensimmäiseksi kysyttiin, miten ohuen ja paksun rakenteen yhteys johonkin tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvun arvoon eroaa.

Hypoteesi 12: *Korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin vähäistä 50 %:lla yli 2,6 m paksuisista rakenteista, kun vastaava luku 1,0–1,6 m paksuisilla rakenteilla on 10 %, kun pohjamaa on kuivaa ja tukikerros on paksuudeltaan 500–600 mm.*

Pieni pohjamaan kosteus ja paksu tukikerros nähdään tyypillisesti etuina rakenteen kuorituskestävyydelle. Silti niiden ehtojen toteutuessa ohuet rakenteet eivät yleensä johda pienimpiin korkeuspoikkeaman kasvun arvoihin. Paksuilla rakenteilla taas erinomaisesti suoriutuvaa ennakkoehtojen mukaista rataa on paljon enemmän. Tämä tukee jo saatua käsitystä siitä, että ohuet rakenteet johtavat yleisemmin johonkin muuhun kuin pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun taas paksut rakenteet johtavat yleisemmin johonkin muuhun kuin suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 13: *Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta alle 20 %:lla maaperustuksella olevasta radasta. 1,2–1,6 m paksuisilla rakenteilla, tämä luku nousee 39 %:iin ja 1,8–2,2 m paksuisilla rakenteilla se laskee 8 %:iin, kun tukikerros on paksuudeltaan yli 600 mm.*

Rakennekerrosten paksuuden kasvattaminen alle 1,6 metristä yli 1,8 metriin vähentää merkittävästi suurimman korkeuspoikkeaman kasvun osuutta. Tämä 1,6–1,8 metrin raja

hyvän ja huonon välillä on täysin tiedonlouhinnan itse valitsema ja toistuu useassa eri hypoteesissa. Alle 1,8 metrin paksuisissa rakenteissa on myös keskinäisiä eroja.

Hypoteesi 14: *Korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta noin 13 % maaperustuksella olevasta radasta. Suurimpien korkeuspoikkeamien osuus on 54 %, kun maarakenteiden paksuus on 1,2–1,8 m, kun vastaava luku on 25 % alle 1,2 m paksuisilla rakenteilla, kun rakenteessa on routalevy.*

Ohuilla rakenteilla on keskiarvoista yleisempää, että suurta korkeuspoikkeaman kasvua ilmenee. Kuitenkin erittäin ohuilla (< 1,2 m) rakenteilla suuri korkeuspoikkeaman kasvu on harvinaisempaa kuin 1,2–1,8 metrin paksuisilla rakenteilla, kun rakenteessa on routalevy. Alle 1,2 metrin paksuisia maalle perustettuja rakenteita löytyy Karjaan ja Pohjankurun liikennepaikoilta sekä muutamasta maaleikkauksesta Pohjankurun ja Ervelän väliltä.

Pelkkiä maarakenteiden paksuuden vaikutuksia kuormituskestävyyteen on vaikea arvioida. Yleisellä tasolla paksummat rakenteet suoriutuvat tyypillisesti paremmin kuin ohuet. Ohuen ja paksun rakenteen erottaa maarakenteiden paksuus 1,6–1,8 metrin välillä. Ohuet rakenteet voivat silti suoriutua hyvin, jos rakenteet ovat kuivat, eikä niissä ole routalevyä. Vastaavasti paksut rakenteet voivat suoriutua huonosti, kun on tehty kunnossapitotoimia ja taipuman varianssi on suurta. Nämä tosin kertovat enemmän seurauksesta kuin syystä. Yleisesti voidaan todeta, että suuren korkeuspoikkeaman kasvun riski kasvaa ohuilla rakenteilla, mutta rakenteiden paksuus ei ole yksinään niin vahva tekijä, että ainoastaan se määräisi rakenteen käyttäytymistä.

Kysymys 4: Miten tukikerros vaikuttaa geometrian heikkenemiseen?

Tukikerroksen vaikutusten tiedonlouhinta aloitettiin kysymällä, miten tukikerroksen paksuuden muuttaminen vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 15: *Korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista vähäisempää 70 %:lla 500–600 mm paksuisella tukikerroksella ja 22 %:lla alle 450 mm paksuisella tukikerroksella, kun kalliopintaa ei ole havaittu, pohjamaan kosteus on vähäistä, radassa ei ole routalevyä ja tuentoja on tehty enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana. Muualla keskiarvoista pienempää korkeuspoikkeaman kasvua on noin 47 %:lla rakenteista.*

Hypoteesi 16: *Korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 40 %:lla alle 450 mm paksuisella tukikerroksella ja 10 %:lla 550–650 mm paksuisella tukikerroksella, kun alusrakenne on kuiva, rakenteessa ei ole routalevyä, tuentoja on enintään kerran 7 vuoden tarkastelujaksolla ja korkeuspoikkeaman kasvuvuusia on 5. Muualla keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 25 %:lla rakenteista.*

Tulokset viittasivat siihen, että paksuilla tukikerroksilla korkeuspoikkeaman kasvu oli tyypillisesti vähäisempää kuin ohuilla tukikerroksilla. Seuraavaksi tutkittiin ohuen ja paksun tukikerroksen keskiarvoista vahvempia riippuvuuksia korkeuspoikkeaman kasvuun jakamalla tukikerros yli ja alle 500 mm kerrospaksuuksiin.

Hypoteesi 17: *Korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 83 %:lla rakenteista, joilla on alle 500 mm paksuinen tukikerros, kun kalliopinta on syvemmällä kuin 2 m tai sitä ei ole havaittu ollenkaan, maarakenteiden paksuus on yli 2,4 m, rakenteessa ei ole routalevyä, tuentoja on tehty enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana ja tukikerros on yli 25 vuotta vanhaa. Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 19 %:lla kaikista niistä rakenteista, joiden tukikerros on alle 500 mm paksuinen.*

Kysymyksen 3 tiedonlouhinnan tuloksissa saatiin vastaavia tuloksia hypoteesissa 17. Paksut maarakenteet, kunnossapitotoimien vähäisyys ja routalevyn puuttuminen rakenteesta indikoivat vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua. Huomataan, että tämä pitää paikkansa, vaikka tukikerros olisi ohut, joten tukikerroksen paksuudella ei vaikuttaisi olevan suurta merkitystä, kun muut rakenteet radasta ovat kunnossa. Kun huomioidaan kaikki rakenteet, joissa tukikerros on alle 500 mm, pieni korkeuspoikkeaman kasvu on merkittävästi harvinaisempaa (19 %) kuin keskiarvoisesti koko rataosalla (27 %).

Hypoteesi 18: *Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 49 %:lla rakenteista, joilla on alle 500 mm paksuinen tukikerros, kun taipuman varianssi on suurta, rakenteessa ei ole routalevyä, tukikerros on uutta, korkeuspoikkeaman kasvuvuusia on 5–6 ja tuentoja on tehty enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 14 %:lla kaikista niistä rakenteista, joiden tukikerros on alle 500 mm paksuinen.*

Hypoteesin 18 erottaa hypoteesista 17 tukikerroksen ikä ja taipuman varianssi. Rakennepaksuuksia ei hypoteesin 18 tapaisissa hypoteeseissa myöskään esiintynyt. Taipuman varianssi on osoittanut korreloivan korkeuspoikkeaman kasvun kanssa, joten sen esiintyminen ei ole yllättävää suuren korkeuspoikkeaman kasvun kanssa. Se, että tukikerros on hiljattain vaihdettu ja ongelmat ovat jatkuneet, herättää kysymyksen siitä, onko tukikerroksen vaihtaminen ollut oikea korjaustoimenpide. Tiedossa on, että tukikerroksen vaihdon jälkeen, tällä rataosalla jälkituentoja ei ole syystä tai toisesta toteutettu suunnitellusti. Tämä voi vaikuttaa uuden tukikerroksen ja suuren korkeuspoikkeaman kasvun esiintymiseen yhtä aikaa. Alle 500 mm paksuisella tukikerroksella suuri korkeuspoikkeaman kasvu on yhtä yleistä kuin koko rataosalla keskiarvoisesti.

Yli 500 mm paksuisen tukikerroksen hypoteesit poikkesivat merkittävästi alle 500 mm paksuisen tukikerroksen hypoteeseista.

Hypoteesi 19: *Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 72 %:lla rakenteista, joilla on yli 500 mm paksuinen tukikerros, kun kallionpinta on yli 2 m syvyydellä tai sitä ei ole havaittu ollenkaan, maarakenteiden paksuus on 1,0–1,8 m, rakenteessa on routalevy ja tuentoja on tehty 4–7 kertaa seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 13 %:lla kaikista niistä rakenteista, joiden tukikerros on yli 500 mm paksuinen.*

Tukikerroksen iän ja taipuman sijaan paksuilla tukikerroksilla suuren korkeuspoikkeaman kasvun kanssa yhdessä esiintyvät ohuet maalle perustetut rakenteet, joissa on routalevy ja joita on tuettu useasti. Voikin olla, että tuentojen yhteydessä sepeliä on lisätty tukikerrokseen, mikä on kasvattanut tukikerroksen paksuutta ajan saatossa. Rakenteessa on myös routalevy, joten korkeuspoikkeamaa on pyritty korjaamaan tukikerroksen ja routaeristyksenkin osalta siinä onnistumatta.

Hypoteesia 19 puoltava data on Pohjankurun vaihteelta V002 ja kilometripaalu 98 ympäröivältä peltoalueelta. Nämä ovat Karjaa–Ervelä-välin suurimmat suuren korkeuspoikkeaman kasvun kohteet ja näkyvät nyt myös näissä louhinnoissa. Niin ikään ei voida sanoa, että paksu tukikerros on syynä näiden kohteiden ongelmiin, mutta tukikerroksen kasvattaminen ei ole poistanut näiden kohteiden ongelmia.

Hypoteesi 20: *Korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin vähäistä 35 %:lla rakenteista, joilla on yli 500 mm paksuinen tukikerros, kun penkereelle perustetun rakenteen paksuus on yli 2,4 m ja alusrakenteen paksuus on 0,4–0,8 m, rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on vanhaa. Erittäin pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 7 %:lla kaikista niistä rakenteista, joiden tukikerros on yli 500 mm paksuinen.*

Vaikka erittäin pientä korkeuspoikkeaman kasvua on vain reilulla kolmasosalla hypoteesin ennakkoehtojen mukaisista rakenteista, voidaan sitä silti pitää merkittävänä, sillä pienintä korkeuspoikkeaman kasvua on niin pienellä osuudella rataa ylipäänsä. Hypoteesissa on esillä jälleen paksut rakenteet ja hypoteeseja, joissa oli mukana pieni alusrakenteen kosteus, saatiin myös. Toisin sanoen, jälleen paksu ja kuiva rakenne johtaa pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Huomiota herättää se, että tukikerros on tyypillisesti vanhaa, kun korkeuspoikkeaman kasvu on pientä. Seuraavaksi tutkittiin, miten tukikerroksen ikä vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 21: *Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on vanhalla tukikerroksella 82 %:lla rakenteista, kun vastaava luku uudella tukikerroksella on 9 %, kun maarakenteiden paksuus on yli 2,6 m, kallionpinta on yli 2 m syvyydellä tai sitä ei ole havaittu ja rakenteessa ei ole routalevyä. Kaikista rakenteista vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 27 %:lla.*

Hypoteesin vahvuus on merkittävä. Paksuilla maarakenteilla, joissa ei ole routalevyä, korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä vähäistä. Kun näillä rakenteilla on vanha tukikerros, korkeuspoikkeaman kasvu on lähes poikkeuksetta vähäistä. Kuitenkin uudella tukikerroksella on harvinaista, että korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä.

Tukikerroksen ikä vaikuttaa olevan hyvin merkittävä tekijä korkeuspoikkeaman kasvussa. Vanha tukikerros indikoi vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua ja uusi tukikerros suurta. Tällä rataosuudella tulokseen vaikuttavat ongelmat jälkituotosten toteutuksessa, joten tulos ei kuvaa normaalitilannetta.

Tukikerroksen paksuudesta ei voida näin vahvoja johtopäätöksiä tehdä. Ohut tukikerros ei muuta muuten hyväksi todetun rakenteen käyttäytymistä huonompaan. Toisaalta paksu tukikerros ei paranna huonosti toimivan rakenteen käyttäytymistä. Yleisesti vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisempää paksulla tukikerroksella ja harvinaisempaa ohuella tukikerroksella.

Kysymys 5: Onko kosteuspitoisuuden ja rakenteen kunnan välillä korrelaatiota?

Karjaa–Ervelä-välillä rakenteen kosteudesta oli tiedossa suhteelliset alusrakenteen ja pohjamaan kosteudet. Aluksi kysyttiin, miten näiden muuttuminen vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 22: *Vähäisen korkeuspoikkeaman osuus on 72 %, kun suhteellinen alusrakenteen on alle -30 ja suhteellinen pohjamaan kosteus alle -20, kun tukikerroksen paksuus on 500–600 mm. Vastaavilla ehdoilla vähäisen korkeuspoikkeaman osuus on 41 %, kun alusrakenteen kosteus on 0–30 ja pohjamaan kosteus on 10–40. Koko datassa vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 47 %:lla radasta.*

Hypoteesin 22 tulos on yksinkertaistettuna se, että kun rakenteiden suhteellinen kosteus muuttuu keskiarvoa paljon pienemmästä hieman keskiarvoista suurempaan, vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu tulee harvinaisemmaksi. Hypoteeseja saatiin 13 kappaletta ja kaikissa tulos viittasi täysin samaan. Seuraavaksi kosteudet jaettiin alle 0 ja yli 0 osajoukkoihin, joiden yleisimpiä riippuvuuksia tutkittiin.

Hypoteesi 23: *Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat alle 0, korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 84 %:lla sellaisesta radasta, jossa ei ole routalevyä, tukikerros on yli 25 vuotta vanhaa, korkeuspoikkeaman kasvuvuosia on 5 tai 6 ja rata ei ole vaihdealueella. Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 48 % kaikesta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat alle 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 47 %.*

Hypoteesin mukaan on tyypillistä, että korkeuspoikkeaman kasvu on hidasta, kun kosteus on vähäistä, mutta mukana on muitakin tyypillisesti korkeuspoikkeaman kasvua pienentäviä tekijöitä, kuten vanha tukikerros ja useat korkeuspoikkeaman kasvuvuodet. Kun tarkastellaan kuivia rakenteita kokonaisuutena, huomataan, ettei niiden osuus pienestä korkeuspoikkeaman kasvusta ole juurikaan keskiarvoista suurempi. Tutkitaan, onko suuren korkeuspoikkeaman kasvun ja vähäisen kosteuden välisiä yhteyksiä olemassa.

Hypoteesi 24: *Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat alle 0, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 52 %:lla sellaisesta radasta, joka on kallioleikkauksella, alusrakenteen paksuus on alle 0,8 m, radassa ei ole routalevyä, taipumat ovat suuria ja tukikerros on uutta. Keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 24 % kaikesta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat alle 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 25 %.*

Suuri korkeuspoikkeaman kasvu ja pienet rakennekosteudet liittyivät vahvasti kallioleikkauksiin. Huomattavaa on, että pienillä rakennekosteuksilla keskiarvoa suurempi korkeuspoikkeaman kasvu (0,35–0,65 mm²/a) on hieman harvinaisempaa kuin koko rataosuudella yleisesti. Kallioleikkaukset on kuitenkin hyvä erottaa joukosta, koska niiden osalta pohjamaan (kallion) kosteus ei ole rakenteen kunnon kannalta määräävä tekijä.

Hypoteesi 25: *Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat alle 0 ja rata on maaperustuksella, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 31 %:lla sellaisesta radasta, jossa ei ole routalevyä, alusrakenteen paksuus on alle 0,8 m, tukikerros on uutta ja kallionpinta on yli 2 metrin syvyydellä tai sitä ei ole havaittu. Keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 22 % kaikesta maalle perustetusta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat alle 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 25 %.*

Keskiarvoista suuremman korkeuspoikkeaman kasvun osuus väheni, kun kalliolle perustettu rata poistettiin datasta. Hypoteesia 25 tukeva data oli pääasiassa siirtymäkohdissa, joissa perustu vaihtuu äkillisesti paksulta penkereeltä kalliolle. Datassa oli myös yksi pidempi jakso, jossa oli useampia pistemäisiä kohtia kilometrivälillä 104+500–104+900. Tämä jakso on havaittu jo aiemminkin ongelmalliseksi maarakenteiden paksuuksien louhinnoissa. Tämän kohteen käyttäytymistä ei selitä rakenteen paksuus eikä kosteus, sillä radassa on tässä kohtaa paksut ja kuivat rakenteet, mitkä viittaavat tyypillisesti pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Yksi mahdollisuus on, että penger on niin korkea, että se aiheuttaa pohjamaassa leikkausmuodonmuutoksia, mutta vanhalla radalla tämä ei ole todennäköistä. Datan perusteella ei voida sanoa, miksi tässä kohtaa geometria heikkenee nopeasti.

Kallioleikkauksella suureen korkeuspoikkeaman kasvuun päädyttiin osittain samoista syistä.

Hypoteesi 26: *Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat alle 0 ja rata on perustettu kalliolle, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 36 %:lla sellaisesta radasta, jonka tukikerros on uutta ja rakenteessa ei ole routalevyä. Keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 27 % kaikesta kalliolle perustetusta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat alle 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 25 %.*

Tukikerroksen matala ikä on vahvasti mukana hypoteeseissa ja se on aina mukana suuren korkeuspoikkeaman hypoteeseissa, kun rakenteet ovat kuivat. Keskiarvoista suurempi korkeuspoikkeaman kasvu on selvästi yleisempää kuivalla kalliolle perustetulla radalla (27 %) kuin kuivalla maalle perustetulla radalla (22 %). Keskiarvoista suurempi korkeuspoikkeaman kasvu on myös koko rataosuutta keskiarvoista yleisempää kuivilla kallioleikkauksilla. Tukikerroksen matala ikä on ollut erittäin vahva tekijä muuallakin suuressa korkeuspoikkeaman kasvussa, joten vähäisen rakennekosteuden ei voida ajatella lisäävän korkeuspoikkeaman kasvua kalliolle perustetulla radalla edes suhteessa maalle perustettuun rataan.

Samat louhinnat tehtiin datalle, jossa alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus on yli 0.

Hypoteesi 27: *Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat yli 0, korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 74 %:lla sellaisesta radasta, jonka alusrakenteen paksuus on alle metrin, tukikerros on vanhaa, kohde ei ole vaihdealueella ja rataa on tuettu enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana. Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 39 % kaikesta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat yli 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 47 %.*

Hypoteeseja löytyy sellaiselle radalle, jossa rakenteiden kosteus on yli 0 ja korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä. Kuitenkin dataa tarkastelemalla huomataan, että on merkittävästi harvinaisempaa, että korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä, kun rakennekosteudet ovat yli 0 (39 %) kuin koko rataosalla (47 %) tai kun rakennekosteudet ovat alle 0 (48 %). Hypoteesissa onkin mukana tyypillisesti vähäistä korkeuspoikkeamaa indikoivia tekijöitä kuten vähäiset tuentakerrat ja tukikerroksen korkea ikä. Kun tutkitaan, mikä johtaa tyypillisesti suureen korkeuspoikkeaman kasvuun kosteilla rakenteilla, saadaan paljon enemmän ja vahvempia yhteyksiä kuin kuivilla rakenteilla.

Hypoteesi 28: *Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat yli 0, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 66 %:lla sellaisesta radasta, jonka maarakenteiden paksuus on alle 1,6 m, radassa ei ole routalevyä ja tukikerros on uutta. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 22 % kaikesta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat yli 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 18 %.*

Suurella kosteuden arvolla vaikuttaisi olevan yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Sen lisäksi, että yhteys on vahvempi, korkeuspoikkeaman kasvun luokat ovat nyt

pääasiassa hypoteeseissa kaikista suurimpia, eikä vain keskiarvoista suurempia. Kostealla rakenteella on myös suurempi osuus suuresta korkeuspoikkeaman kasvusta, mitä koko rataosuudella yleensä. Kuitenkaan tämän hypoteesin datan tutkiminen ei ole mielekästä, sillä tukikerroksen matala ikä on mainittu, jolloin voidaan olettaa sen olevan vahva tekijä suuressa korkeuspoikkeaman kasvussa. Seuraavaksi on jaoteltu vielä suuri rakennekosteus maalle ja kalliolle perustettuun rataan.

Hypoteesi 29: *Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat yli 0 ja rata on maaperustuksella, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 41 %:lla sellaisesta radasta, jossa eri ole routalevyä, taipuman varianssi on vähäistä, korkeuspoikkeaman kasvuvuosia on 5 tai 6, tukikerros on uutta ja kohde ei ole vaihdealueella. Keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 30 % kaikesta maalle perustetusta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat yli 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 25 %.*

Hypoteesi 30: *Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat yli 0 ja rata on perustettu kalliolle, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 40 %:lla sellaisesta radasta, jonka tukikerros on uutta ja korkeuspoikkeaman kasvuvuosia on 5 tai 6. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 28 % kaikesta kalliolle perustetusta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat yli 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 18 %.*

Kalliolle ja maalle perustetulla radalla suuri korkeuspoikkeaman kasvu on keskimääräistä yleisempää, kun rakenteen kosteus on suuri. Uusi tukikerros on jälleen tekijänä hypoteeseissa, jolloin kosteus ei välttämättä ole ainoa selittävä tekijä.

Alusrakenteen ja pohjamaan kosteuden kasvu lisäävät korkeuspoikkeaman kasvua, joskin yksittäisten hypoteesien osalta on vaikea sanoa, kuinka suuri tekijä korkeuspoikkeaman kasvussa rakenteen kosteus on. Testataan vielä, onko yhteys suuremmilla arvoilla edelleen kasvava, eli seuraako erittäin suurista kosteuksista tyypillisesti erittäin suurta korkeuspoikkeaman kasvua. Kysymys aseteltiin niin, että miten alusrakenteen ja pohjamaan kosteuden muuttaminen 0 yläpuolella vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 31: *Vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 62 %, kun rakenne on erittäin kostea ja kalliopinnan syvyys on yli 2 m tai sitä ei ole havaittu ja korkeuspoikkeaman kasvuvuosia on 5 tai 6. Vastaavilla ehdoilla vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 29 %, kun rakenne on vähän keskiarvoista kosteampi. Koko rataosuudella pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 47 %:lla rakenteista.*

Hypoteesi 32: *Keskiarvoista suuremman korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 45 %, kun kosteuspitoisuus on keskiarvoista vähän suurempi ja rata on perustettu penkereelle, eikä radassa ole routalevyä. Vastaavilla ehdoilla keskiarvoista suuremman korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 22 %, kun rakenteet ovat erittäin kosteat. Koko rataosuudella keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 38 %.*

Hypoteesien 31 ja 32 tulokset viittaavat siihen, että erittäin suurilla rakennekosteuksilla suuri korkeuspoikkeaman kasvu on harvinaisempaa ja pieni korkeuspoikkeaman kasvu yleisempää kuin vain hieman kosteilla rakenteilla. Tulos on sinänsä erikoinen, sillä suuri kosteuspitoisuus yhdistetään yleensä ongelmiin rakenteessa.

Paikkoja, joissa pohjamaan ja alusrakenteen kosteudet ovat erittäin suuria, on 969 metriä. Näistä 579 metrillä (59 %) korkeuspoikkeaman kasvu on pienempää kuin keskiarvoinen korkeuspoikkeaman kasvu. Tällaisia paikkoja ovat:

- km 87+400–87+750 Karjaan liikennepaikka, routalevykohde
- ylikulkusillan alla oleva rata
- tunnelin suuaukot
- Pohjankurun liikennepaikolla paikoitellen yksitätisiä metrejä rataa
- siirtymäkohta maaleikkauksen ja penkereen välissä
- siirtymäkohta routalevyjakson päädyssä
- km 102+820–103+130 suora rataosuus penkereellä.

Kohdat ovat pääasiassa pistemäisiä tai katkonaisia paikkoja, joissa on myös suurta korkeuspoikkeaman kasvua lähialueilla. Pääasiassa kyseessä oli paksuja penkereitä, sekä siirtymäkohtia. Paksuilla penkereillä on havaittu, ettei korkeuspoikkeaman kasvu ole tyypillisesti suurta. Siirtymäkohdissa taas korkeuspoikkeaman kasvu on oletetusti suurta, jolloin onkin poikkeuksellista, että niissä on myös alueita, joissa on vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua.

Karjaa–Ervelä-välin datassa erittäin pieni alle 0 suhteellinen rakennekosteus viittaa vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun ja yli 0 suhteellinen rakennekosteus viittaa suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Kasvu ei kuitenkaan ole lineaarista, vaan vaikuttaakin siltä, että erittäin suurilla suhteellisilla rakennekosteuksilla korkeuspoikkeaman kasvu on pienempää kuin melko suurilla. Tämän yhteyden syytä ei pelkän datan perusteella voitu selittää.

Kysymys 6: Miten radan taipuma vaikuttaa geometrian heikkenemiseen?

Taipumaa voidaan arvioida joko taipuman keskiarvon tai varianssin perusteella. Taipumamittausta ei oltu tehty koko rataosuudelta, joten taipumamittauksen tiedonlouhinnossa ei tarkastella aivan koko rataosuutta. Tiedonlouhinta aloitettiin esittämällä kysymys: miten taipuman keskiarvon muuttuminen vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun?

Hypoteesi 33: *Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 77 %, kun taipuman keskiarvo on keskiarvoista suurempaa rakenteilla, joilla maarakenteiden paksuus on alle 1,6 m, alusrakenne on alle 0,4 m, pengeri on alle 0,5 m, ojat ovat matalat ja kohde ei ole sillalla. Vastaavilla ehdoilla pienen korkeuspoikkeaman osuus on 19 %, kun taipuman keskiarvo on keskiarvoista pienempää. Pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 47 %:lla kaikista rakenteista.*

Hypoteesi 34: *Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 60 %, kun taipuman keskiarvo on keskiarvoista suurempaa rakenteilla, joita on tuettu vähintään 4 kertaa 7 vuoden tarkastelujakson aikana, ja kohde ei ole sillalla tai vaihdealueella. Vastaavilla ehdoilla suuren korkeuspoikkeaman osuus on 25 %, kun taipuman keskiarvo on keskiarvoista pienempää. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 18 %:lla kaikista rakenteista.*

Keskiarvoinen taipuman 20 metrin keskiarvo Karjaa–Ervelä-välillä on noin 1,7 mm. Taipuman keskiarvon muutos keskiarvoista suuremmasta pienempään vähentää pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuutta. Toisaalta suuren korkeuspoikkeaman kasvu vähenee samassa tapauksessa eri ehdoilla. Hypoteesit 33 ja 34 ovat ristiriitaisia, ja niiden tuloksiin vaikuttavat muiden ehtojen muuttuminen, eikä ainoastaan taipuman keskiarvon muuttuminen. Huomattavaa on myös, että hypoteesin 34 mukaan taipumamittauksen alueella suuri korkeuspoikkeaman kasvu on koko rataosaa yleisempää. Seuraavaksi kysytään erikseen alle ja yli keskiarvoisen taipuman yhteyksiä korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 35: *Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on alle 1,7 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista pienempää 76 %:lla radasta, kun kallionpintaa ei ole havaittu, ojat ovat matalat, radassa ei ole routalevyä, taipuman varianssi on vähäistä ja korkeuspoikkeaman kasvuvuotia on 4 tai 5. Koko rataosalla keskiarvoista pienempää korkeuspoikkeaman kasvua on 56 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on alle 1,7 mm, vastaava luku on 54 %.*

Hypoteesi 36: *Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on yli 1,7 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista pienempää 83 %:lla radasta, kun tukikerroksen paksuus on 500–600 mm, ojat ovat matalat, radassa ei ole routalevyä, taipuman varianssi on vähäistä ja rataa on tuettu enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujaksolla. Koko rataosalla keskiarvoista pienempää korkeuspoikkeaman kasvua on 56 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on alle 1,7 mm, vastaava luku on 53 %.*

Tiedonlouhinnan osalta pieni ja suuri taipuman keskiarvo käyttäytyivät hämmästyttävän samankaltaisesti. Tulokset ovat osittain myös ristiriitaiset ja vahvaa yhteyttä taipuman keskiarvon ja korkeuspoikkeaman kasvun välille ei todettu.

Kysyttiin vielä, mikä johtaa tyypillisimmin pieneen tai suureen taipumaan.

Hypoteesi 37: *Alle 1,7 mm keskiarvoiseen taipumaan johtaa 86 % sellaisesta radasta, joka on suoralla, sen maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, radassa ei ole routalevyä, taipuman varianssi on pientä ja kohde ei ole vaihdealueella. Pientä taipuman keskiarvoa on 37 %:lla koko rataosuudesta.*

Hypoteesi 38: *Yli 1,7 mm keskiarvoiseen taipumaan johtaa 86 % sellaisesta radasta, joka on kaarteessa, ojat eivät ole syviä, taipuman varianssi on pientä, kohde ei ole vaihdealueella ja rataa on tuettu enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujaksolla. Suurta taipuman keskiarvoa on 36 %:lla koko rataosuudesta.*

Taipuman keskiarvoista ei tule yhteensä 100 % radasta, sillä taipumaa ei ole mitattu koko tarkastelualueelta. Hypoteeseista näkee selvästi, että pieneen taipuman keskiarvoon johtaa tyypillisesti suora rata ja suureen kaarre. Tämä kertoo siitä, että taipumamittauksessa kaarteiden vaikutus on suuri. Kaarteiden vahva vaikutus voi johtua siitä, että Karjaa–Ervelä-välin taipumamittaus on tehty vanhalla Stiffmasterilla, joka kiinnitettiin ratakuorma-auton akseliin. Nykyään Stiffmaster kiinnitetään sepelivaunuun, kuten Kouvola–Kotkarataosan mittauksissa on tehty. Ratakuorma-auton akseli ei saa aikaiseksi yhtä suurta vastetta radassa kuin sepelivaunu ja siitä syystä kaarteet voivat näkyä tuloksissa erittäin vahvasti, kun muualta ei suuria taipumia saada mitattua.

Taipuman keskiarvon lisäksi kysyttiin taipuman varianssin muutoksen vaikutusta korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 39: *Suurella taipuman varianssilla suuren korkeuspoikkeaman osuus on 75 %, kun pienellä taipuman varianssilla vastaava luku on 17 % sellaisella rakenteella, jonka maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, kallionpintaa ei ole havaittu ja kyseessä ei ole epäjatkuvuuskohta. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 18 %:lla kaikista rakenteista.*

Tiedonlouhinta viittaa siihen, että maalle perustetuilla ohuilla rakenteilla taipuman varianssi erottaa hyvän radan huonosta. Tulokset saatiin myös toisin päin, eli pieni taipuman varianssi viittasi pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Taipuman varianssilla on vahvempi yhteys korkeuspoikkeaman kasvuun kuin taipuman keskiarvolla.

Kysymys 7: Millaisia asioita esiintyy paikoissa, joissa ratarakenteessa on routalevy?

Ensiksi kysyttiin, mitkä asiat johtavat yleisimmin tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvuun, kun radassa on routalevy.

Hypoteesi 40: *Kun radassa on routalevy, korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä lähes aina (91 %) sellaisella radalla, joka sijaitsee tunnelissa, ja jossa on vain tukikerros ja ojat eivät ole syviä.*

Hypoteesi 40 viittaa vahvasti siihen, että tunneleissa, joissa on routalevy ja käytännössä pelkkä tukikerros, korkeuspoikkeaman kasvu on lähes aina vähäistä. Rakenteella, jossa on routalevy, korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 53 %:lla, kun vastaava luku koko rataosalta on 47 %. Eli on siis hieman yleisempää, että routalevyllä korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä kuin ilman sitä. Hypoteesi kertoo myös siitä, että yli puolet routalevyistä on tunneleissa Karjaa–Ervelä-välillä. Kun tutkitaan tunneleita ylipäätään, huomataan, että korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 88 %:lla tunneleista. Lisäksi, lähes kaikilla tunneleissa on routalevy. Tällöin ei voida välttämättä sanoa, johtaako vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun tunneli vai routalevy, mutta ne toimivat ainakin todella hyvin yhdessä, varsinkin, kun tunnelissa on käytännössä ainoastaan tukikerros.

Tutkitaan vielä niitä paikkoja, joissa routalevy on jossain muualla kuin tunnelissa. Kysymys esitettiin niin, että mikä on yleisintä sellaisella rakenteella, jossa on routalevy ja joka ei sijaitse tunnelissa.

Hypoteesi 41: *Kun radassa on routalevy ja rakenne ei sijaitse tunnelissa, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 85 %:lla sellaisesta radasta, jonka maarakenteiden paksuus on 1,0–1,8 m, kallionpintaa ei ole havaittu ja pohjamaan kosteus on pientä. Suurta geometrian heikkenemistä on koko rataosalla 18 %:lla rakenteista. Vastaava luku on 46 % niistä rakenteista, joissa on routalevy ja jotka eivät sijaitse tunneleissa.*

Routalevyllä on erittäin vahva yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun rakenne ei ole tunnelissa. Kohteet, jossa korkeuspoikkeaman kasvu on suurta rakenteella, jossa on routalevy, ovat:

- km 94+843, jossa on noin 20 metrin jakso routalevyosuuden päädyssä. Samassa kohtaa on opastin, jonka kohdalla baliisit ja eristysjatkos
- km 96 +164, jossa on noin 30 metrin jakso routalevyosuuden päädyssä. Samassa kohtaa on opastin, jonka kohdalla baliisit ja eristysjatkos
- km 96+232–96+282, Pohjankurun vaihteen V002 alla oleva routalevyjakso
- km 97+820–98+170, peltoaukea, jossa ohut alusrakenne on suoraan ilmeisen heikon pohjamaan päällä
- km 102+120, opastin, jonka kohdalla baliisit ja eristysjatkos. Maatutkan mukaan tukikerroksessa on syvempi kohta tai painuma tässä kohtaa
- 106+500, routalevyjakson päädyssä noin 5 metrin alue.

Muut kohteet liittyvät joko routalevyjakson päätyyn tai epäjatkuvuuskohtaan raitteessa paitsi kilometripaalu 98 ympäröivä alue. Tämä kohde on havaittu ongelmallisena mo-

nessa muussakin louhinnassa, ja se on merkittävässä roolissa hypoteesien tuloksissa. Routalevy ei ole parantanut rakenteen toimivuutta, vaan ongelmat lienevät jossakin muualla kuin routimisessa. Epäjatkuvuuskohdissa routalevy ei ole estänyt korkeuspoikkeaman kasvua ja routalevyjaksojen päässä routalevy on voinut aiheuttaa jäykkyyseroja. Jäykkyyserot johtavat dynaamisen kuorman kasvuun, mikä on todennäköisesti aiheuttanut korkeuspoikkeaman kasvua routalevyjaksojen päädyissä.

Tuloksista nähdään, että noin puolet rakenteista, joissa on routalevy ja sijaitsevat muualla kuin tunnelissa, johtavat suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Seuraavaksi tarkastellaan niitä rakenteita, joissa on routalevy ja jotka ovat muualla kuin tunnelissa ja johtavat vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun. Tätä ei ole mielekästä tehdä tiedonlouhinnalla, sillä datamäärä on varsin pieni. Yhteensä sellaista rataa on kaiken kaikkiaan 656 metriä. Kaikkiaan rataa, joka ei sijaitse tunnelissa ja jonka rakenteessa on routalevy, on 2 061 metriä. Hyvin suoriutuvia routalevykohteita, jotka eivät ole tunneleissa, löytyy Karjaan liikennepaikalta 87+500–87+700 sekä tunneleiden suuaukoilta. Valtaosa routalevykohteista, jotka eivät sijaitse tunneleissa, suoriutuvat huonosti.

Maarakenteisiin asennettu routalevy ei ole yleensä vähentänyt korkeuspoikkeaman kasvua ja joissain tapauksissa se on voinut olla jopa syynä korkeuspoikkeaman kasvuille. Kallioperustuksella routalevy vaikuttaa toimivan, joskin kallioleikkaukselle ei lähtökohtaisesti tulisi tarvita routasuojausta, jos rakennekerrosten materiaalit ovat routimattomia.

Kysymys 8: Miten ratarakenteen perustamistapa vaikuttaa geometrian heikkene- miseen?

Perustamistavan vaikutusten arviointi aloitettiin kysymällä, miten perustamistavan muuttaminen vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 42: *Erittäin vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on penkereelle perustetulla radalla 71 % ja kallioleikkauksella 39 %, kun alusrakenne on hieman kosteaa ja alle 0,8 m paksuinen, rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on vanhaa.*

Kummassakin tapauksessa erittäin vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu on silti yleisempää kuin koko rataosuudella keskiarvoisesti (27 %). Kuitenkin hypoteesi viittaa siihen, että penkereelle perustetuilla rakenteilla radan geometria on pysynyt tasaisempana. Kallioleikkaukset ovat erittäin vanhoja Karjaa–Ervelä-välillä, mistä saattaa seurata pienempi osuus pienessä korkeuspoikkeaman kasvussa. Kallio on kovempi perustus, minkä pitäisi luoda hyvät edellytykset tasokkaan geometrian ylläpitämiselle, mutta jos kalliopinnan muotoa ei ole louhittu viettämään vettä pois radan alta tai alusrakennemateriaalina on

käytetty routivaa maa-ainesta, eivät kallioperustuksen hyödyt realisoidu. Kallioleikkaukset ovat myös pituudeltaan tyypillisesti lyhempiä jaksoja kuin pengerjaksot, jolloin rakenteiden muutoskohdissa tapahtuvat geometriavirheet voivat näkyä vahvemmin kallioleikkauksilla kuin penkereillä.

Hypoteesi 43: *Vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on tunnelissa 89 % ja kallioleikkauksella 31 %, kun maakerrosten paksuus on alle 1,4 m ja ojat ovat matalat.*

Aiemmissa louhinnoissa havaittiin, että tunneleissa korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin vähäistä. Kun tunneleita verrataan kallioleikkauksiin, tulee ero selväksi. Kallioleikkauksilla vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on kuitenkin merkittävän pieni rataosuuden keskiarvoiseen osuuteen (47 %) verrattuna. Hypoteesi 42 viittasi siihen, että erittäin vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on keskiarvoista enemmän kallioleikkauksilla, mutta tämän hypoteesin mukaan saadaan päinvastainen tulos. Pieneen geometrian heikkenemiseen johtavatkin siis muut tekijät kuin hypoteesissa 43 mainitut.

Hypoteesi 44: *Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on suoraan pohjamaan päälle perustetulla alusrakenteella 47 % ja penkereellä 13 %, kun maarakenteet ovat 1–2 m paksuiset, pohjankosteus on pieni ja ojat ovat 1–2 m syvyiset.*

Hypoteesi 45: *Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on suoraan pohjamaan päälle perustetulla alusrakenteella 48 % ja maaleikkauksella 21 %, kun maarakenteet ovat 1–2 m paksuiset, alusrakenne on kosteaa ja paksuudeltaan 0,4–1,0 m.*

Ongelmalliseksi havaittu kilometripaalun 98 ympärillä olevan peltoaukean alusrakenne on perustettu suoraan pohjamaalle. Tämä näkyy perustamistavan hypoteeseissa vahvasti. Kaikilla rakenteilla suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 18 %:lla rakenteista. Penkerelle perustetulla rakenteella on harvinaisempaa (15 %) ja maaleikkauksella yleisempää (23 %), että korkeuspoikkeaman kasvu on suurta.

Tutkitaan seuraavaksi tarkemmin maa- ja kallioleikkauksia sekä alusrakennetta pohjamaalla. Kallioleikkauksilla etenkin suureen korkeuspoikkeaman kasvuun johtavat rakenteet kiinnostavat, joten kysytäänkin, mikä niihin johtaa yleisimmin.

Hypoteesi 46: *Kallioleikkauksella korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 42 % rakenteista, kun maarakenteet ovat alle metrin paksuiset, tukikerros on 500–600 mm paksuista ja uutta. Kaikkiaan kallioleikkauksilla suurta korkeuspoikkeaman kasvu on 20 %:lla rakenteista.*

Kalliroleikkauksella on hieman keskiarvoista yleisempää, että korkeuspoikkeaman kasvu on suurta. Kun tukikerros on uutta, suurta korkeuspoikkeaman kasvua on jo merkittäväällä osalla radasta. Kun hypoteesin taustalla olevaa dataa tarkastellaan, huomataan, että data koostuu osittain yksittäisistä riveistä, mutta myös kolme pidempää jaksoa nousee esiin:

- km 103+800–104+200
- km 105+000–105+400
- km 106+500–106+650.

Yhteistä näille kohteille on se, että tukikerroksen ja kallionpinnan välissä on ohut alusrakenne. Kun tilannetta katsotaan videokuvasta, nähdään, että ojissa on paljon kasvustoa. Alusrakennemateriaali todennäköisesti sisältää hienoainesta ja vettäkin on saatavilla. Tässä voi kyseessä olla sandwich-rakenne, jossa märkä hienoainesta sisältävä alusrakenne jää uuden tukikerroksen ja kallionpinnan väliin ja kun rataa kuormitetaan, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta. Myös routiminen voi olla ongelma tällaisella rakenteella.

Maaleikkauksen osalta kysyttiin, mikä johtaa tyypillisimmin tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvuun, eikä vain suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 47: *Maaleikkauksella keskiarvoista vähäisempään korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 73 % sellaisista rakenteista, joiden maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, pohjamaan kosteus on keskiarvoista tai hieman sitä pienempää, rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on vähäistä.*

Hypoteesin mukaan maaleikkauksella korkeuspoikkeaman kasvu on yleisimmin keskiarvoista pienempää. Hypoteesissa on yhtenä tekijänä pohjamaan kosteus. Koska pohjamaa on ohuella rakenteella suuressa roolissa, kysytäänkin seuraavaksi, miten pohjamaan kosteuden vaihtelu vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun maaleikkauksella.

Hypoteesi 48: *Maaleikkauksella pienen korkeuspoikkeaman osuus on 52 %, kun pohjamaan kosteus on keskiarvoista, ja 13 %, kun pohjamaan kosteus on erittäin suurta, sellaisella rakenteella, jossa ei ole routalevyä ja tuentoja on tehty enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana.*

Tulos vahvistaa käsitystä siitä, että pohjamaalla ja sen kosteudella on suuri rooli maaleikkauksella. 32 %:lla maaleikkauksista on vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua, joten pohjamaan kosteudella on erittäin suuri vaikutus niin hyvässä kuin huonossa. Koko rataosuudella pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 47 %:lla rakenteista, joten maaleikkauksella suuremmat korkeuspoikkeamat ovat yleisempiä, jollei pohjamaa ole kuivaa.

Suoraan pohjamaan päälle perustetusta alusrakenteesta tiedetään, että merkittävä osa rakenteista johtaa suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Kilometripaalua 98 ympäröivällä peltoaukealla on paljon sitä havaintoa tukevaa dataa. Syytä ilmiölle ei datan perusteella voida sanoa, joskin viitteitä pohjamaan ylikuormitukseen on. Mielenkiintoista olisikin

nähdä, minkälaisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on pientä, kun alusrakenne on rakennettu suoraan pohjamaan päälle.

Hypoteesi 49: *Keskiarvoista pienempää korkeuspoikkeaman kasvua on 73 %:lla rakenteista, joiden alusrakenne on perustettu suoraan pohjamaan päälle, kun alusrakenne on kuivaa, rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on vanhaa.*

Ohut rakenne suoriutuu jälleen hyvin, kun kosteus on pientä. Tällä kertaa juurikin alusrakenteen kosteus oli hypoteesissa tekijänä. Huomattavaa on, että ohuella hyvin suoriutuvalla rakenteella ei ole routalevyä, eikä tukikerrosta ole vastikään uusittu. On kuitenkin merkittävästi harvinaisempaa, että korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista vähäisempää, kun alusrakenne on pohjamaalla (42 %), kuin koko rataosuudella yleensä (56 %).

Perustamistavasta Karjaa–Ervelä-välillä voidaan todeta, että penkereelle ja kalliolle perustetut sekä tunneliin rakennetut rakenteet suoriutuvat hyvin keskiarvoista yleisemmin. Kuitenkin kalliroleikkauksilla ohut ja kostea alusrakenne kasvattaa suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuutta merkittävästi. Maalle perustetut ohuet rakenteet suoriutuvat yleensä keskiarvoista huonommin. Niillä alusrakenteen ja pohjamaan kosteudella on suuri vaikutus rakenteiden käyttäytymiseen ja ohut rakenne voi suoriutua hyvin keskiarvoista yleisemmin, vaikkei radassa ole routalevyä, kunhan alusrakenteen ja pohjamaan kosteus on vähäistä.

5.4.2 Tiedonlouhinnan tuottamia hypoteeseja Kouvola–Kotka-väliltä

Kouvola–Kotka-rataosan tiedonlouhinnan tuloksista poimitut hypoteesit on esitetty tässä kappaleessa. Hypoteesien tarkat sisällöt löytyvät liitteestä B taulukoista 54–105.

Kysymys 1: Mikä johtaa yleisimmin tietynlaiseen geometrian heikkenemiseen?

Hypoteesi 1: *Erittäin paksuilla maalle perustetuilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on lähes aina (92 %) vähäistä, kun rakenteessa on paksu tukikerros ja kosteus sekä taipuman varianssi ovat vähäistä.*

Samaan tapaan kuin Karjaa–Ervelä-välillä, ensimmäisenä tuloksena saatiin, että paksut ja kuivat rakenteet johtavat tyypillisesti pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Hypoteesin takana ollut data oli peräisin useasta eri kohteesta rataosalta. Kouvola–Kotka-rataosalle lasketut MDI-arvot esiintyivät myös hypoteeseissa niin, että kuivat rakenteet indikoivat pientä korkeuspoikkeaman kasvua. MDI-arvoista ei etukäteen tiedetty luokittelun rajoja, mutta tämän tiedonlouhinnan hypoteesien perusteella alle 30–40 MDI-arvo indikoi

pientä korkeuspoikkeaman kasvua. Luokittelujen varmistamiselle tarvitaan vielä lisälouhintoja.

Taipuman varianssikin on hypoteesissa tekijänä, mutta tällä kertaa niin, että pieni varianssin arvo ja vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu ovat yhdessä, eikä suuri varianssi ja suuri korkeuspoikkeaman kasvu. Tämä tukee sitä yhteyttä, että korkeuspoikkeamaa tai sen kasvua indikoi suuri taipuman varianssi.

Kouvola–Kotka-rataosan korkeuspoikkeaman kasvu on jakautuneempi kuin Karjaa–Ervelä-välin. Kouvola–Kotka-rataosalla suurimmalla osalla radasta korkeuspoikkeaman kasvu on pientä, mutta siellä missä se on suurta, se on erittäin suurta. Rataa on tosin määrällisesti paljon enemmän Kouvola–Kotka-rataosan datassa ja rakenteet ovat homogeenisempia, mikä saattaa selittää korkeuspoikkeaman kasvun jakautumista.

Kun kysymys esitettiin niin, että millä asioilla on keskiarvoista yleisempi yhteys johonkin korkeuspoikkeaman kasvuun, saatiin hyvinkin erilaisia hypoteeseja.

Hypoteesi 2: *Ohuilla rakenteilla (< 1,4 m) korkeuspoikkeaman kasvu yleensä on suurta, kun rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuma sekä taipuman varianssi ovat suurta.*

Kun etsitään keskiarvoista yleisempiä yhteyksiä, suuri korkeuspoikkeaman kasvu on seurausena jokaisessa saadussa hypoteesissa. Tämä viittaa vahvasti siihen, että rataosalla tietyt asiat johtavat lähes aina suureen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun taas pieneen kasvuun voi olla useampia eri tekijöitä. Yhteys ennakkoehtoien ja seurausten välillä on erittäin vahva varsinkin, kun ottaa huomioon suuren korkeuspoikkeaman kasvun harvinaisuuden koko rataosalla.

Hypoteesia tukeva data on peräisin pääasiassa vaihdealuilta ja Kotkan sataman puuratapölkkyraiteelta. Hypoteesia tukeva data Kotkan satamassa alkaa lähes metrilleen siitä, mistä alkaa puuratapölkkyraide ja jatkuu mittausten loppuun asti. Hypoteesiin liittyvät vaihteet ovat usealta eri liikennepaikalta.

Taipuman keskiarvon ja taipuman varianssin arvoja ei välttämättä voida pitää todellisina, sillä vaihteet häiritsevät taipuman mittausta. Samoin Kotkan sataman puuratapölkkyraiteella rata on lähes koko ajan kaarteissa, jolloin taipumamittauksen arvot tyypillisesti kasvavat mittaustavasta johtuen. Ohuet rakenteet ja routalevyn poissaolo kuitenkin pitivät hyvin todennäköisesti paikkansa.

Yleisin yhteys Kouvola–Kotka-rataosalla oli paksujen ja kuivien maarakenteiden ja pienen geometrian heikkenemisen välillä. Poikkeuksellisen vahva yhteys löytyi myös suuren geometrian heikkenemisen ja ohuen rakenteen välillä, kun taipuma ja taipuman varianssi ovat suurta, eikä rakenteessa ole routalevyä.

Kysymys 2: Mitkä tekijät ovat yleisimpiä, kun geometrian heikkenemisnopeus on suurta?

Hypoteesi 3: *Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 87 %:lla sellaisista rakenteista, jotka on perustettu penkereelle, mutta pengerpaksuus on pieni ($< 0,5$ m), ja taipuman sekä taipuman varianssin arvot ovat suuret.*

Kysymykseen 2 saatiin odotetusti täysin samankaltaisia hypoteeseja kuin kysymyksen 1 hypoteesi 2, eli ohuesta maarakenteesta ja suuresta taipumasta seuraa suurta korkeuspoikkeaman kasvua. Varsinaista maarakenteiden paksuutta ei ollut mainittu, mutta penkerelle perustettujen rakenteiden paksuus on ohut, mikäli pengerpaksuus on alle 0,5 m. Tällaisia hypoteeseja oli valtaosa saaduista hypoteeseista. Muutama toisenlainenkin hypoteesi saatiin.

Hypoteesi 4: *Korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (86 %) suurta, kun rakenteen kosteus ja taipuman varianssi ovat suurta.*

Rakenteen suuri kosteus on myös tekijänä suuressa korkeuspoikkeaman kasvussa. Hypoteesia puoltava data on peräisin pääasiassa vaihdealueilta, joissa maatutkausta häiritsevät vasta- ja siipikiskot, joten pelkästään tämän hypoteesin perusteella ei voida olla täysin varmoja rakenteen kosteuden vaikutuksesta korkeuspoikkeaman kasvuun.

Kun kaikista suurin luokka korkeuspoikkeaman kasvua otettiin pois suuren korkeuspoikkeaman louhinnoista, saatiin hieman erilaisia tuloksia.

Hypoteesi 5: *Korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 44 %:lla sellaisesta radasta, jonka maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, alusrakennepaksuus on 0,4–0,8 m, alusrakenteen kosteus on tyypillistä suurempaa, taipuman keskiarvo on suuri ja kohde ei sijaitse vaihdealueella.*

Yhteydet suuriin korkeuspoikkeaman kasvun arvoihin olivat paljon heikompiä, kun suurin korkeuspoikkeaman luokka jätettiin huomioimatta. Tällä louhinnalla saatujen hypoteesien perusteella samat asiat johtavat suureen korkeuspoikkeaman kasvuun eli ohuet ja kosteat rakenteet.

Lähestymistapaa kysymykseen muutettiin ja tiedonlouhinta aseteltiin siten, että onko joillakin tekijöillä keskiarvoa vähäisempi yhteys pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Tämä asettelu tehtiin siksi, että on hyvin yleistä, että korkeuspoikkeaman kasvu on pientä Kouvola–Kotka-rataosalla, joten ne rakenteet, jotka eivät tyypillisesti johda tähän lopputuloksen, ovat mielenkiintoisia.

Hypoteesi 6: *Kun maarakenteiden paksuus on 1,6–2,2 metriä, rakenteessa on routalevy ja pengertä on alle metri, eikä kohde ole sillalla, pientä korkeuspoikkeaman kasvua on vain 16 % radasta, kun muualla rataosalla vastaava luku on 43 %.*

Routalevyllä on ilmeisesti pyritty korjaamaan korkeuspoikkeaman kasvua siinä välttämättä onnistumatta, koska hypoteesin mukaisilla maarakenteilla, joilla on routalevy, pieni korkeuspoikkeaman kasvu on selvästi harvinaisempaa kuin muilla rakenteilla. Tässä pitää myös ottaa huomioon se, että pieni korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin tyypillistä Kouvola–Kotka-rataosalla. Hypoteesin rakennepaksuudetkaan eivät ole kovin poikkeavia, sillä lähes puolet (47 %) rakenteista rataosalla ovat nimenomaan sen paksuisia. Toisaalta paksuilla rakenteilla ei tyypillisesti tulisi tarvita routalevyä. On mahdollista, että routalevyn tulkinta maatumkatulosten perusteella voi osoittautua joksikin muuksi ominaisuudeksi rakenteessa.

Hypoteesista 6 tekee erityisen se, että sitä tukeva data ei ole vaihtealulta. Pelkkää suurta korkeuspoikkeaman kasvua tutkiessa vaihtealueet korostuivat yli muun radan, mutta etsimällä muuta kuin pientä korkeuspoikkeaman kasvua saatiin tuloksia muualta. Tämän tiedonlouhinnan hypoteeseja tukevassa datassa oli tyhjiä kohtia korkeuspoikkeaman kasvussa. Mittausten välillä geometria on ikään kuin parantunut joka kerta, joten geometrian heikkenemistä ei ole voitu laskea. Tällaisia rivejä on noin 1 % datasta. Nämä rivit ovat yksittäisiä muutaman metrin satunnaisia osuuksia, eikä niiden oleteta muuttavan hypoteesin tulosta merkittävästi.

Suurta korkeuspoikkeaman kasvua Kouvola–Kotka-rataosalla aiheuttavat tyypillisesti vaihteet sekä muut epäjatkuvuuskohdat. Tulokset viittaavat myös vahvasti, että ohuiden rakenteiden, suuren taipuman ja taipuman varianssin sekä suuren kosteuden välillä on yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Myös noin 2 metrin paksuisilla rakenteilla, joilla on maatumkadatan perusteella tulkittu olevan routalevy rakenteessa, on yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Kysymys 3: Onko rakenteen paksuuden ja rakenteen kunnan välillä korrelaatiota?

Hypoteesi 7: *Suuri korkeuspoikkeaman kasvu on yhtä yleistä alle 1,4 m paksuisilla rakenteilla (84 %) kuin pieni korkeuspoikkeaman kasvu on 1,6–2,0 m paksuisilla rakenteilla (83 %), kun rata on perustettu penkereelle, rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on ohut (< 450 mm).*

Tämän hypoteesin tuottaneessa tiedonlouhinnassa kysyttiin, kuinka maarakenteiden paksuuden muuttaminen muuttaa korkeuspoikkeaman kasvua. Maarakenteiden paksuuden kasvattaminen yli 1,6 metriin muutti pääasiassa suuren korkeuspoikkeaman kasvun pää-

asiassa erittäin vähäiseksi. Näin ollen on yhtä yleistä, että ohuella rakenteella korkeuspoikkeaman kasvu on suurta kuin paksulla rakenteella vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu, kun rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on ohut. Kummatkin yhteydet ovat keskiarvoista merkittävästi yleisempiä. Vastaus ei poikennut aikaisempien louhintojen perusteella saadusta käsityksestä, vaan vahvisti sitä.

Hypoteesin edustama rata on maaperustuksella, eikä rakenteessa ole routalevyä. Alle 1,4 metrin paksuiset rakenteet ovat erittäin ohuet. Nykyvaatimukset rakenteelle ovat routamitoituksen perusteella noin 2,0 metriä. Tukikerroskin on ennakkoehtojen mukaan erittäin ohut, alle 450 mm. Seuraavaksi tutkittiin, johtavatko ohuet rakenteet aina suureen korkeuspoikkeaman kasvuun ja paksut rakenteet vähäiseen.

Hypoteesi 8: *1,4–1,6 m paksuisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (87 %) vähäistä, kun rakenteet ovat kuivat, taipuma ja taipuman varianssi ovat vähäistä, eikä rakenteessa ole routalevyä.*

Hypoteesin tuloksista voidaan tulkita, että 1,4–1,6 metrin paksuisilla rakenteilla keskiarvoista suurempi korkeuspoikkeaman kasvu on melko harvinaista. Suurimmalla osasta rakenteista korkeuspoikkeaman kasvu on pienempää kuin keskiarvoinen kasvu. Kuivat rakenteet selittävät osittain tämän paksuisten rakenteiden hyvää kestävyyttä, mutta kun dataa tutkitaan tarkemmin, huomataan, että pohjamaa vaihtelee hypoteesia puoltavilla riiveillä kallion, moreenin ja silttisen saven välillä. Pelkkä tulkittu pohjamaan materiaali ei siis näyttäisi määrävän ohuen rakenteen käyttäytymistä.

Hypoteesi 9: *Ohuilla rakenteilla (1,2–1,6 m) korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (89 %) vähäistä, jos rakenne on kuiva, siinä ei ole routalevyä ja ojat ovat syvät.*

Suuri ojasyvyys esiintyi myös hypoteeseissa tekijänä, kun korkeuspoikkeaman kasvu oli pientä ohuilla rakenteilla. Tämä viittaa siihen, että rakennekerrospaksuuden lisäksi korkeuspoikkeaman kasvuun merkittävä tekijä on kuivatus ja rakenteiden kosteus.

Hypoteesi 10: *Alle 1,6 m paksuisen rakenteen korkeuspoikkeaman kasvu on lähes aina (97 %) suurta, kun rakenne perustettu penkereelle, se on kostea, siinä ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on suurta.*

Tiedonlouhinnan tulosten perusteella kosteudella on suuri vaikutus ohuiden rakenteiden käyttäytymiseen. MDI:n arvo 40 näyttäisi toimivan jonkinlaisena rajana sille, onko rakenteessa ongelmia vai ei. Myöhemmin kosteuden vaikutusta tutkitaan vielä tarkemmin. Myös taipuman varianssi näyttäneen vakiintuvan korkeuspoikkeaman kasvun indikaattoriksi. Hypoteesia tukevassa datassa oli mukana vaihteita, mikä ei ole toivottua, sillä niissä virheet korostuvat. Seuraavaksi tehtiin vielä sama louhinta, jossa vaihteet poistettiin datasta.

Hypoteesi 11: *Kun maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, eikä kohde ole vaihdealueella, korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (89 %) suurta, kun rata sijaitsee linjalla, rakenteessa ei ole routalevyä ja kosteus on todella suuri.*

Kun vaihteet on poistettu tiedonlouhinnasta, tuloksen merkitys ei muutu, mutta hypoteesiin valikoituneet rakennekerrospaksuudet ovat ohuempia ja rakenteet kosteammat. Rakenteen MDI-arvo on hypoteesissa yli 70. Seuraavaksi kysyttiin, mitkä asiat johtavat yleisimmin johonkin tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvuun, kun maarakenteet ovat yli 1,6 metrin paksuiset.

Hypoteesi 12: *1,6–2,0 m paksuisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (90 %) vähäistä, kun kosteus on vähäistä, rakenteessa ei ole routalevyä, taipuman keskiarvon ja taipuman varianssin arvot ovat vähäisiä ja ojat ovat syvät.*

Paksuilla maarakenteilla vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu on yhtä tyypillistä (65 %) kuin koko rataosalla yleensä, mutta hypoteesin 12 ennakkoehdoilla 90 % radasta korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä. Paksuilla rakenteilla kuivuus, pieni taipuman keksiarvo ja routalevyn puuttuminen rakenteista indikoivat vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua. Tätä tukivat kaikki muutkin tämän tiedonlouhinnan tuloksena saadut hypoteesit. Hypoteesia tuki merkittävän suuri määrä dataa, joka on myös osoitusta yhteyden vahvuudesta kuivien ja paksujen rakenteiden ja vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun välillä. Kun kysyttiin, millä asioilla on keskiarvoista vahvempi yhteys tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvuun, saatiin täysin erilaisia tuloksia.

Hypoteesi 13: *1,6–2,2 m paksuisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta yli puolella rakenteista (51 %), kun rakenteessa on routalevy, taipumat ovat suuria ja ojat syvät. Vastaava luku muualla on 14 %.*

Paksuilla rakenteilla suuret taipumat ja routalevyn käyttö indikoivat suuren korkeuspoikkeaman kasvun yleistymistä. Suuri ojasyvyys on tyypillisesti esiintynyt pienen korkeuspoikkeaman kasvun yhteydessä. Kun tarkastellaan kohteita tarkemmin, huomataan, että ne ovat muun muassa sillanpäätystä, routalevyjakson pääty ja maaleikkaukselle siirtymä, eli epäjatkuvuuskohtia. Epäjatkuvuuskohdissa havaitaan varsinkin vanhoilla radoilla ongelmia, olivat rakenteet paksut tai ei. Ongelmana näissä on siirtymärakenteiden puuttuminen.

Myös kaksi pidempää jaksoa löytyi kilometripaalujen 216 ja 218 jälkeen. Niissä on näennäisesti hyvää rataa, kun maarakenteet ovat paksut ja ojatkin ovat syvät radan korkeusasemasta johtuen, mutta silti korkeuspoikkeamat kasvavat kiihtyvään tahtiin. Maatutkadatan perusteella on tulkittu, että rakenteessa on mahdollisesti routalevy. Sillä on todennäköisesti pyritty korjaamaan ongelmia siinä onnistumatta. Tukikerroksen kosteusindeksi on selvästi koholla, mutta siihen ei välttämättä ole luottamista, sillä routalevy häiritsee maatutkasta saatavia arvoja. Tällä kohtaa pohjamaaksi on tulkittu siltistä savea maaperäkartojen perusteella, ja vieressä onkin pelto.

Voikin olla, että näissä kohteissa ongelmat johtuvat joko heikosta alusrakenteesta, pohjamaasta tai molemmista. Myös se, että routalevy on tulkittu mahdolliseksi maatutkadatan perusteella voi tarkoittaa sitä, että rakenteessa on jotakin muuta, joka näyttää routalevyltä maatutkadatassa. Tiedonlouhintaan käytetyillä tiedoilla ei voida päätellä enempää radan ongelmista, mutta tämä on ehdottomasti mielenkiintoinen jatkotutkimuskohde, jos tutkitaan, miksi paksuilla rakenteilla geometria heikkenee nopeasti.

Tiedonlouhinnan kysymys aseteltiin seuraavaksi, kuinka maarakenteiden paksuuden muuttaminen vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun, jos muut ehdot pysyvät samoina.

Hypoteesi 14: *Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 54 %:lla 1,2–1,6 m rakenteiden paksuuksilla, kun vastaava luku on 14 % yli 2,6 m paksuisella rakenteella, kun taipuma on suurta ja rata on maaperustuksella. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on yli 20 %:lla kaikesta maalle perustetusta radasta.*

Hypoteesi vahvistaa kuvaa siitä, että rakenteiden paksuuden kasvattaminen vähentää suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuutta. Kuitenkin tässä täytyy ottaa huomioon, että vaihteet ovat Kouvola–Kotka-rataosalla tyypillisesti ohuilla maarakenteilla, ja ne saattavat vääristää tuloksia. Yli 2,6 m paksuisilla rakenteilla vaihteita on vain 76 rivillä, kun taas 1,2–1,6 m paksuisilla rakenteilla vaihteita on 262 rivillä. Seuraavaksi testattiinkin, säilyykö tämä vahva yhteys, kun datasta poistetaan vaihteet ja sillat.

Hypoteesi 15: *Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 86 %:lla yli 2,6 m paksuisilla rakenteilla, kun taas vastaava luku alle 1,4 m paksuisilla rakenteilla on 53 %, kun taipumat ovat vähäisiä ja tukikerros on paksu. Korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 67 %:lla kaikesta maalle perustetusta radasta, kun vaihteita tai siltoja ei huomioida.*

Hypoteesin 14 väittämä saatiin myös tällä louhinnalla esiin. Erittäin paksuilla rakenteilla on siis tyypillisesti pienempää korkeuspoikkeaman kasvua kuin ohuilla rakenteilla. Kuitenkin myös toisenlaisia tuloksia saatiin.

Hypoteesi 16: *Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 74 %:lla alle 1,4 m paksuisista rakenteista, kun taas vastaava luku 1,8–2,4 m paksuisilla rakenteilla on 36 %, kun rakenteessa on routalevy, taipuman keskiarvo ja taipuman varianssi ovat vähäisiä. Korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 67 %:lla kaikesta maalle perustetusta radasta, kun vaihteita tai siltoja ei huomioida.*

Hypoteesi 16 antaa vahvaa indikaatiota siitä, että ohuet rakenteet suoriutuvat hyvin, kun taipuma on vähäistä ja rakenteessa on routalevy, mutta samoilla ehdoilla noin 2 metriä paksut rakenteet eivät. Vastaavanlaisia hypoteeseja saatiin useita. Tulos on ehdottomasti mielenkiintoinen, sillä routalevy yleensä lisää taipumaa ja taipuman varianssin arvoa. Tämän lisäksi routalevy on yleensä esiintynyt ongelmakohteissa. Lähtökohtaisesti noin kahden metrin paksuisilla paksuilla rakenteilla ei tulisi tarvita routalevyä näin etelässä, mikäli radan rakenteessa käytetyt materiaalit ovat routimattomia. Kouvola–Kotka-rataosa on

erittäin vanha rata, joten tämä voi viitata siihen, ettei rakenteiden paksuus kerro rakenteen kunnosta tällä rataosalla. Hypoteesin 15 perusteella noin puolella alle 1,4 m paksuisista rakenteista korkeuspoikkeaman kasvu on pientä, kun taas hypoteesissa 16 ohuista rakenteista 74 %:lla korkeuspoikkeaman kasvu on pientä. Ennakkoehdot ovat erilaiset näissä hypoteeseissa ja vaikuttaisivikin, ettei paksu tukikerros vähennä korkeuspoikkeaman kasvua ohuilla rakenteilla vaan routalevy.

Hypoteesit 13 ja 16 antavat kuvan siitä, että noin 1,6–2,4 m paksuisella rakenteella on ongelmia, kun rakenteessa on routalevy ja taipuma on suurta. Seuraavaksi testataankin juuri tämän paksuisia rakenteita. Kysymys aseteltiin ensin niin, että mikä johtaa tyypillisimmin tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvuun 1,6–2,4 m paksuisella rakenteella.

Hypoteesi 17: *1,6–2,4 m paksuisella rakenteella korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti erittäin vähäistä, kun rakenteet ovat kuivat, pengerpaksuus on 0,5–1,0 m ja rakenteessa ei ole routalevyä.*

Hypoteesit viittasivat siihen, että 1,6–2,4 metrin paksuisella rakenteella korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä pientä. Aiemmin nähtiin eri ennakkoehdoilla tilanteen olevan myös toisenlainen, joten tehtiin lisätarkasteluita. Seuraavaksi kysyttiin, mitkä asiat tyypillisimmin johtavat suureen korkeuspoikkeaman kasvuun 1,6–2,4 metrin paksuisella rakenteella.

Hypoteesi 18: *1,6–2,4 m paksuisella rakenteella korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti suurta, kun ojat ovat syvät, rakenteessa on routalevy ja taipuman varianssi on tyypillistä suurempaa.*

Hypoteesia 18 ei tue nyt yhtä suuri määrä dataa kuin hypoteesia 17, mutta tulokset ovat edelleen merkittävät. Koska routalevy vaikutti olevan tyypillinen suurelle korkeuspoikkeaman kasvulle ja routalevyn puuttuminen tyypillistä pienelle korkeuspoikkeaman kasvulle 1,6–2,4 metrin paksuisilla rakenteilla, keskityttiin routalevyn vaikutuksiin rakenteessa. Kysymys aseteltiin seuraavaksi: miten rakenne, jossa on routalevy, eroaa rakenteesta, jossa ei ole routalevyä, kun rakenteiden paksuus on 1,6–2,4 m.

Hypoteesi 19: *1,6–2,4 m paksuisella maarakenteella vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 79 %, kun rakenteessa ei ole routalevyä ja 16 %, kun rakenteessa on routalevy, kun ojat ovat syviä ja tukikerros on alle 550 mm paksuinen.*

Hypoteesi 20: *1,6–2,4 m paksuisella maarakenteella vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 72 %, kun rakenteessa ei ole routalevyä, kun ojat ovat syvät ja tukikerros on alle 550 mm paksuinen. Samoilla ehdoilla suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 69 %, kun rakenteessa on routalevy.*

Hypoteesit 19 ja 20 todistavat jo aiemmin havaitun ilmiön, eli routalevy 1,6–2,4 metrin paksuisessa rakenteessa esiintyy yleensä suuren korkeuspoikkeaman kasvun kanssa yhdessä. Tuloksista ei voida päätellä, onko routalevy ongelmien syy vai onko näissä paikoissa muitakin ongelmia, mutta ainakaan routalevy ei ole parantanut näiden rakenteiden kuntoa. Routalevyn asennus on tapahtunut kauan ennen mittausten tekemistä, joten kyseessä ei ole ennen jälkeen mittaukset, vaan muuten ennakkoehdoiltaan samanlaiset kohteet rataosalla.

Yhteenvetona Kouvola–Kotka-rataosan maarakenteiden paksuuden vaikutuksista voidaan sanoa, että erittäin paksut ($> 2,6$ m) rakenteet johtavat tyypillisesti pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun ja ohuet ($< 1,4$ m) suureen. Kuitenkin ohuilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvua voidaan vähentää routalevyllä ja kuivatuksella. Routalevyllä on silti negatiivisia vaikutuksia 1,6–2,4 m paksuisille rakenteille, jotka ilman routalevyä johtavat pääasiassa pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun, mutta routalevyn kanssa pääasiassa suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Kysymys 4: Miten tukikerros vaikuttaa geometrian heikkenemiseen?

Kouvola–Kotka-rataosalla voitiin tutkia tukikerroksen paksuuden ja kosteuden vaikutusta geometrian heikkenemiseen. Aluksi kysyttiin koko datasta, miten tukikerroksen paksuuden muuttaminen vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 21: *Erittäin pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 75 % yli 650 mm paksuisella tukikerroksella ja 34 % 550–650 mm paksuisella tukikerroksella, kun rakenne on turpeelle rakennetulla penkereellä. Muualla rataosalla erittäin pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 41 %:lla rakenteista.*

Hypoteesi 22: *Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 90 % alle 450 mm paksuisella tukikerroksella ja 59 % 550–650 mm paksuisella tukikerroksella, kun rakenteen kosteudet ovat pieniä ja pohjamaana on siltistä savea. Muualla rataosalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 56 %:lla rakenteista.*

Hypoteesi 23: *Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 70 % alle 450 mm paksuisella tukikerroksella ja 37 % yli 650 mm paksuisella tukikerroksella, kun rakenteet ovat ohuet (1,2–1,6 m), rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerroksen kosteus on vähäistä. Muualla rataosalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 56 %:lla rakenteista.*

Saadut hypoteesit antoivat kuvan siitä, että tukikerroksen ohentaminen lisää korkeuspoikkeamien kasvua. Kuitenkin ristiriitoja hypoteesien välillä on. Esimerkiksi hypoteesi 23 viittaa yli 650 mm paksuisen tukikerroksen suoriutuvan huonosti, kun taas hypoteesi

21 hyvin. Tästä syystä on hyvä jaotella tukikerrokset eri paksuisiin ryhmiin ja louhia niitä omina kokonaisuuksinaan.

Tutkitaankin seuraavaksi tarkemmin alle 450 mm, 450–650 mm ja yli 650 mm paksuisia tukikerroksia erikseen. Kysymys aseteltiin siten, että onko joillain ehdoilla kyseisellä tukikerrospaksuudella keskiarvoista vahvempi riippuvuus tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvuun. Asettelemalla kysymys näin, saadaan selville poikkeuksellisia yhteyksiä, joita ei välttämättä saada selville yleisimpiä yhteyksiä tutkimalla.

Hypoteesi 24: *Rakenteilla, joilla tukikerroksen paksuus on alle 450 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta 75 %:lla rakenteista, jotka ovat alle 1,6 m paksuisia ja penkereelle perustettuja, joissa ei ole routalevyä ja jotka eivät ole vaihdealueella. Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 26 %:lla rakenteista, joilla tukikerroksen paksuus on alle 450 mm.*

Hypoteesi 25: *Rakenteilla, joilla tukikerroksen paksuus on 450–650 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta 74 %:lla rakenteista, joilla koko rakenteen ja tukikerroksen kosteus ovat erittäin suurta, mutta rakenteessa ei ole routalevyä. Korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta 16 %:lla rakenteista, joilla tukikerroksen paksuus on 450–650 mm.*

Hypoteesi 26: *Rakenteilla, joilla tukikerroksen paksuus on yli 650 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta 58 %:lla 1,2–2,0 m paksuisista rakenteista, joilla alusrakenteen kosteus on erittäin suurta. Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 13 %:lla rakenteista, joilla tukikerroksen paksuus on 650 mm.*

Hypoteesit kertovat kaikki jokseenkin samasta ilmiöstä. Ohuilla ja kosteilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua nähdään eniten ohuella tukikerroksella. Ohuita tukikerroksia on määrällisesti selvästi vähiten (2 373 m), kun taas rakenteita, joilla on 450–650 mm paksuinen tukikerros, on määrällisesti ylivoimaisesti eniten (39 354 m).

Hypoteesia 24 tukeva data oli peräisin sillanpäädystä ja Kotkan sataman puupölkkyraiteelta. Näin ollen ei voida sanoa, että ohut tukikerros olisi ainakaan ainoa ongelma näissä kohteissa. Hypoteesien 25 ja 26 taustalla ollut data on peräisin pääasiassa vaihteilta. Tulokset kertovat enemmänkin epäjatkuvuuskohtien vaikutuksesta korkeuspoikkeaman kasvuun ennemmin kuin tukikerroksen paksuuden vaikutuksista. Etenkin vaihteet ja sillanpäädät korostuvat erilaisissa louhinnoissa.

Tukikerroksen kosteuden vaikutusten tutkiminen aloitettiin kysymällä, miten tukikerroksen kosteuden muutos vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 27: *Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 75 %:lla radasta, jonka tukikerroksen kosteus on erittäin suuri, kun taas alhaisemmalla kosteudella vastaava luku on 25 %, kun alusrakenteen kosteus on suuri ja taipumat ovat suuria.*

Tulos on mielenkiintoinen siksi, että vaikka alusrakenteen kosteus on suuri, jos tukikerros on kuiva, korkeuspoikkeaman kasvu ei ole pääasiassa suurta. Kuiva tukikerros ei johda tyypillisesti suureen korkeuspoikkeamaan, vaikka taipumat olisivat suuria. Vastaavanlainen tulos saadaan toisinpäinkin.

Hypoteesi 28: *Korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 75 %:lla radasta, jonka tukikerroksen kosteus on vähäistä, kun taas erittäin suurella kosteudella vastaava luku on 15 %, kun maarakenteiden paksuus on 1,0–1,6 m ja tukikerros on alle 500 mm paksuinen.*

Hypoteesien 27 ja 28 perusteella kuiva tukikerros johtaa vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun vaikeillakin rakenteilla. Kosteaa tukikerros viittaa suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Seuraavaksi tarkastellaan vielä tarkemmin, mitkä yhteydet ovat yleisimpiä kostealle tukikerrokselle. Kosteaa tukikerroksen rajaksi asetettiin yli 50 MDI-arvo.

Hypoteesi 29: *Korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä suurta, kun tukikerroksen ja koko muun rakenteen kosteus on suurta ja rakenteessa ei ole routalevyä.*

Hypoteesin 29 data oli poikkeuksetta vaihteilta, siltojen päädyistä, alikuluilta ja rumuilta. Näissä tapauksissa ei voida sanoa, että tukikerroksen kosteus on ongelma näillä kohtaa, vaan tukikerroksen kosteus on seuraus muun rakenteen toimimattomuudesta. Toimimattomissa epäjatkuvuuskohtissa tukikerros tyypillisesti jauhautuu ja sen kosteus kasvaa. Vaihteen tapauksessa myös mittaustapa kasvattaa kosteuden arvoa. Tärkeää olisikin tutkia, onko tukikerros aidosti kosteampi ja mahdollisesti jauhautunut siellä, missä tukikerroksen kosteuden arvot ovat suuria, vai aiheuttaako mittaustapa mittaustuloksena saadun kosteuden arvon nousun.

Kouvola–Kotka-rataosalla ohuella alle 450 mm paksuisella tukikerroksella on tyypillisimmin suurta korkeuspoikkeaman kasvua, mutta hypoteeseihin aina liittyi jokin epäjatkuvuuskohta rakenteessa. Epäjatkuvuuskohdat nousivat esille varsinkin tukikerroksen kosteudessa, kun kostea tukikerros esiintyi aina epäjatkuvuuskohtien ja suuren korkeuspoikkeaman kasvun kanssa. Tukikerroksen paksuutta tai kosteutta ei tiedonlouhinnan perusteella voida pitää syynä rakenteen käyttäytymiselle, mutta tukikerroksen kosteus antaa viitettä siitä, onko rakenteessa jo realisoituneita ongelmia.

Kysymys 5: Onko kosteuspitoisuuden ja rakenteen kunnan välillä korrelaatiota?

Hypoteesi 30: *Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 86 %:lla rakenteista, joiden MDI-arvo on 20–40, kun vastaava luku on 38 % rakenteilla, joilla MDI-arvo on 50–80, kun rata on penkereellä ja rakenteessa ei ole routalevyä.*

Hypoteesi 30 on erittäin ylimalkainen, mutta siihen liittyy erittäin suuri määrä dataa. Kiuvan rakenteen pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun liittyy 20 354 m hypoteesin ennakkoehtojen mukaista rataa. Toisin sanoen, yli 20 kilometriä Kouvola–Kotka-rataosan radasta on penkereellä ilman routalevyä, rakenteen kosteus pientä ja korkeuspoikkeaman kasvu on pientä. Tämä vahvistaa kuvaa siitä, mitä jo ensimmäisissä louhinnoissa saatiin selville. Suurin osa Kouvola–Kotka-välin rakenteista ei johda suureen korkeuspoikkeaman kasvuun ja homogeeniseen rataan ei tule kasvavia korkeuspoikkeamia. Vain pieni osa radasta johtaa suureen korkeuspoikkeaman kasvuun ja tähän joukkoon liittyy korkea rakenteen kosteus. Seuraavaksi tutkitaan erikseen yli 50 ja alle 50 MDI-arvoja.

Hypoteesi 31: *Kun tarkastellaan niitä rakenteita, joilla rakenteen MDI-arvo on yli 50, korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti suurta, kun maarakenteiden paksuus on 1,2–2,0 m ja taipuman varianssi on suurta.*

Kaikki yleisimmät yhteydet yli 50 MDI-arvoilla liittyivät suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Suurta yli 0,175 mm²/a korkeuspoikkeaman kasvua on koko rataosalla 20 %:lla rakenteista. Kun MDI-arvot ovat yli 50, vastaava luku on 45 % ja hypoteesin mukaisella rakenteella 90 %. Kosteuden kasvu liittyy vahvasti korkeuspoikkeaman kasvuun eli näillä on vahva yhteys. Hypoteesin data on peräisin lähes poikkeuksetta vaihdealueilta, silloilta, alikuluilta ja rumpukohteista. Vielä on epäselvää, johtuuko rakenteen kosteuden yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun mittaustavasta vai onko rakenne todellisesti kostea näissä epäjatkuvuuskohdissa.

Tutkitaan seuraavaksi, onko joillain ehdoilla yleistä, että suuri rakennekosteus johtaa pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 32: *Kun tarkastellaan niitä rakenteita, joilla rakenteen MDI-arvo on yli 50, korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti pientä, kun maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, rakenteessa on routalevy, taipuma ja taipuman varianssi ovat pientä, eikä kohde sijaitse vaihdealueella.*

Tiedonlouhinnan hypoteeseissa oli aina mukana jollain tapaa routalevy. Routalevy häiritsee maatutkausta ja kasvattaa rakenteen kosteuden arvoja, joten routalevyllä kosteuden arvoja ei voida pitää todellisina. Tästä syystä ei voida sanoa, että suurella rakennekosteudella olisi mitään vahvaa yhteyttä pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Tuloksesta on kuitenkin se hyöty, että se osoittaa, ettei routalevyllä ole aina ongelmia, vaan routalevyllä on saatu pidettyä erittäin ohuiden rakenteiden korkeuspoikkeaman kasvu vähäisenä.

Kuivien rakenteiden osalta tiedonlouhintojen tulokset viittaavat pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Aluksi kysyttiin, mitkä asiat tyypillisimmin johtavat pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun MDI-arvo on alle 50.

Hypoteesi 33: *Kun tarkastellaan rataa, jossa MDI-arvo on alle 50, korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä pientä, kun penkereelle perustetun radan maarakenteiden paksuus on yli 2,6 m, tukikerros on yli 600 mm paksuinen, rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on pientä.*

Hypoteesin data on vakuuttavaa. Kun MDI-arvo on alle 50, pientä alle 0,075 mm²/a korkeuspoikkeaman kasvua on yleisesti 62 %:lla rakenteista, kun koko datasta vastaava luku on 56 %. Eli kun MDI-arvo on alle 50, lähtökohtaisesti korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti pientä. Hypoteesin ennakkoehtojen mukaisella radalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 81 %:lla rakenteista. Seuraavaksi on tutkittu, mikä johtaa suureen korkeuspoikkeaman kasvuun kuivilla rakenteilla.

Hypoteesi 34: *Kun tarkastellaan rataa, jossa MDI-arvo on alle 50, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 62 % radasta, kun pengerpaksuus on alle 0,5 m, rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on suurta.*

Suurelle korkeuspoikkeaman kasvulle saadaan hypoteesi radalla, jolla MDI-arvo on alle 50. Hypoteesin tulokset eivät kuitenkaan ole kovin vahvat, sillä ennakkoehdot täyttävää rataa on enää 653 m, kun hypoteesissa 33 sitä oli 3 636 m. Kun dataa tutkitaan tarkemmin, huomataan, että data on jälleen peräisin pääasiassa sillanpäädystä, rummuilta ja Kotkan sataman puuratapölkkyraiteelta. Yksi pieni kohde nousee esiin, jossa ei ole datan mukaan epäjatkuvuuskohtaa, mutta korkeuspoikkeaman kasvu on silti suurta pienellä rakennekosteudella.

Kilometrivalilla 211+627–211+643 Inkeröisen liikennepaikan rajalla on noin 10 metriä sellaista rataa, jossa rakennekosteus on pieni ja korkeuspoikkeaman kasvu suuri. Kyseessä on maaleikkaus kaarteessa, missä ojasyvyys on pieni toisella puolella rataa. Videokuvasta nähdään, että radassa on tässä kohdassa eristysjatkokset ja akselinlaskijat. Radassa on kummatkin, sillä linja on raideosuuksien pituuksien takia valvottu akselinlaskennalla ja liikennepaikka raidevirtapiirein. Näiden kohdalla rataa ei voida tukea, jollei kaapeleita ensin poisteta. Tässä kohtaa voi olla epäjatkuvuuskohta kunnossapidon estymisen ja eristysjatkoksen takia, sillä kohdetta ympäröivällä radalla korkeuspoikkeaman kasvu on pienempää. Datan perusteella muita syitä kohteen korkeuspoikkeaman kasvulle ei voida antaa.

Rakenteen kosteus erottaa vähäisen ja suuren korkeuspoikkeaman kasvun vahvasti toisistaan. Rakenteilla, joilla MDI-arvo on alle 50, korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti vähäistä, kun taas yli 50 MDI-arvo johtaa tyypillisesti suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Yli 50 MDI-arvoja kohdataan yleisimmin vaihdealueilla, silloilla, rummuilla ja muissa epäjatkuvuuskohtissa, missä myös alle 50 MDI-arvoilla korkeuspoikkeaman kasvu voi olla suurta.

On epäselvää, ovatko rakenteen kosteuden arvot todellisia näissä epäjatkuvuuskohtissa. Vaihteiden ja siltojen osalta tiedetään, että maatutkan mittaustulokset vääristyvät, kun alla oleva rakenne häiritsee signaalin kulkeutumista. Olisikin hyvä tutkia, millaisia maarakenteita epäjatkuvuuskohtista löytyy ja onko maarakenteet niissä todellisesti kosteita. Lisäksi tulisi tutkia, kuinka pitkälle matkalle maatutkatulosta häiritsevä rakenne aiheuttaa virhettä mittauksissa.

Kysymys 6: Miten radan taipuma vaikuttaa geometrian heikkenemiseen?

Tiedonlouhinta aloitettiin Karjaa–Ervelä-välin tapaan kysymällä, miten taipuman keskiarvon muuttaminen vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 35: *Pienen korkeuspoikkeaman osuus on 76 %, kun taipuman keskiarvo on alle 1 mm ja 26 %, kun se on yli 1,4 mm, sellaisella radalla, jossa maarakenteiden paksuus on 1,4–2,0 m, alusrakenteen paksuus on 0,6–1,0 m, penkereen paksuus on alle 0,5 m, ojat ovat syviä, eikä kyseessä ole vaihdealue. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 65 %:lla rakenteista.*

Hypoteesi 36: *Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 70 %, kun taipuman keskiarvo yli 1,4 mm ja 18 %, kun se on alle 1,0 mm, sellaisella radalla, jossa penkereen paksuus on alle 0,5 m ja kohde ei sijaitse vaihdealueella tai sillalla. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 20 %:lla rakenteista.*

Suurella taipumalla oli yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun ja pienellä taipumalla vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun. Kummassakin hypoteesissa on jätetty vaihteet huomioimatta, mikä on hyvä asia, sillä vaihteet häiritsevät taipuman mittausta. Kummassakin hypoteesissa on kyseessä ohuet rakenteet ja taipuman muutoksen vaikutukset niihin. Onkin hyvä rajoittaa seuraavaksi louhinta vain paksuille rakenteille ja katsoa toistuuko sama ilmiö niillä.

Hypoteesi 37: *Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 86 %, kun taipuman keskiarvo on alle 1 mm, ja 32 %, kun se on yli 1 mm, sellaisella penkereelle perustetulla radalla, jossa maarakenteiden paksuus on 2,0–2,6 m, alusrakenteen paksuus on yli 1,0*

m, pohjamaa on silttistä savea ja kohde ei sijaitse vaihdealueella tai sillalla. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 65 %:lla rakenteista.

Paksuillakin rakenteilla pieni taipuma viittaa vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun ja suuri taipuma suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Tiedonlouhinnassa yhden millimetrin keskiarvoinen taipuma toimi rajapyykkinä pienen ja suuren korkeuspoikkeaman kasvun välillä. Koko rataosan keskiarvoinen taipuma on 1 mm. Seuraavaksi tarkastellaan, mihin korkeuspoikkeaman kasvuun yli ja alle 1 mm keskiarvoisella taipumalla on vahva yhteys.

Hypoteesi 38: *Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on yli 1 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 90 % radasta, kun pengerpaksuus on alle 1,0 m, rakenne on kostea ja taipuman varianssi on suurta. Koko rataosalla suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 20 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, vastaava luku on 29 %.*

Hypoteesi 39: *Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on yli 1 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 83 % radasta, kun tukikerroksen paksuus on 500-600 mm, rakenne on kuiva, ojat syvät, rakenteessa ei ole routalevyä ja kohde ei ole sillalla. Koko rataosalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 65 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, vastaava luku on 54 %.*

Tietyillä ehdoilla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta suurella taipumalla ja toisilla kasvu on pientä. Yleisesti yli 1 mm taipumalla pieni korkeuspoikkeaman kasvu on harvinaisempaa ja suuri korkeuspoikkeaman kasvu on yleisempää kuin koko rataosalla keskiarvoisesti. Kun tutkitaan hypoteesin 38 dataa tarkemmin, kohdistuu se paljolti vaihdealueille ja muihin epäjatkuvuuskohtiin. Näissä paikoissa taipuman varianssi on suurta. Myös rakenteen kosteus on suurta, mutta tämä voi jälleen johtua vain maatumkatulosten häiriytymisestä. Siellä, missä kosteus on pientä, korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti vähäistä myös, ja näin on yleensä myös paikoissa, joissa taipuman keskiarvo on suurta.

Hypoteesi 40: *Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on alle 1 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 48 % radasta, kun rakenne on kostea ja rakenteessa ei ole routalevyä. Koko rataosalla suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 20 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, vastaava luku on 15 %.*

Hypoteesi 41: *Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on alle 1 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 88 % radasta, kun maarakenteiden paksuus on 1,2–2,0 m, rakenteet ovat kuivat, ojat ovat syvät, taipuman varianssi on vähäistä ja pohjamaana on silttistä savea. Koko rataosalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 65 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, vastaava luku on 71 %.*

Yli 1 mm taipuman osalta tulokset ovat vastaavat alle 1 mm taipuman louhintojen tuloksia. Korkea kosteus viittaa suureen korkeuspoikkeaman kasvuun ja matala kosteus pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun taipuman keskiarvo on alle 1 mm. Pienillä taipumilla suuri korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista harvinaisempaa ja pieni korkeuspoikkeaman kasvu yleisempää. Suuri korkeuspoikkeaman kasvu on jälleen keskittynyt epäjatkuvuuskohtien ympärille myös pienen taipuman osalta.

Taipuman keskiarvosta voidaan todeta, että suurella taipumalla on keskiarvoista vahvempi yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun ja pienellä taipumalla keskiarvoista pienempään korkeuspoikkeaman kasvuun. Taipuma ei ole kuitenkaan määräävä tekijä, vaan muuten hyvällä radalla pieni ja suuri taipuma johtavat pääasiassa pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun ja muuten huonolla radalla suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Tarkastellaan vielä taipuman varianssin vaikutuksia korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 42: *Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 81 %, kun taipuman varianssi on suurta, ja 7 %, kun se on pientä, kun rakenne on penkereelle perustetulla radalla, jossa ei ole routalevyä ja kohde ei ole sillalla. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 18 %:lla rakenteista.*

Hypoteesi 43: *Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 78 %, kun taipuman varianssi on pientä, ja 12 %, kun se on suurta, kun rakenne on penkereelle perustetulla radalla, jossa ei ole routalevyä ja kohde ei ole sillalla. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 65 %:lla rakenteista.*

Taipuman varianssi käyttäytyi samalla tavalla kuin taipuman keskiarvo. Suurempi varianssin arvo viittaa suureen korkeuspoikkeaman kasvuun ja pieni varianssin arvo viittaa erittäin vahvasti pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Hypoteesien ennakkoehdot eivät eroa toisistaan ja tulokset ovat erittäin vakuuttavat määriltään. Pienen varianssin hypoteesia puoltavaa dataa löytyi kummassakin tapauksessa yli 20 kilometriä, joka on lähes puolet koko rataosasta.

Taipuman varianssilla on erittäin vahva yhteys korkeuspoikkeaman kasvuun. Vaikutussuhdetta on vaikea määrittää, sillä taipuman varianssi voi kasvaa taipuman vaihtelun lisäksi epätasaisuuksista kulkupinnasta. Nämä epätasaisuudet ovat juurikin samoja asioita, mitä korkeuspoikkeaman mittauksessa havaitaan. Näin ollen tiedonlouhinnan perusteella voidaan ainakin sanoa, että taipuman varianssi kuvaa hyvin korkeuspoikkeaman mittausta. Kuitenkaan syy-seuraus-suhdetta ei tällä tiedonlouhinnalla voida selvittää.

Kysymys 7: Millaisia asioita esiintyy paikoissa, joissa ratarakenteessa on routalevy?

Aluksi kysyttiin, mitkä asiat johtavat yleisimmin tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvuun, kun rakenteessa on routalevy.

Hypoteesi 44: *Kun rakenteessa on routalevy, korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä vähäistä, kun maarakenteiden paksuus on alle 1,6 m, alusrakenteen paksuus on alle 0,6 m, taipuman varianssi on vähäistä ja pohjamaan sekä alusrakenteen kosteus on suurta.*

Kouvola–Kotka-rataosalla rata, jossa on routalevy, johtaa yleisimmin pieneen korkeuspoikkeamaan, kun rakenteet ovat ohuet. Rakenteen suuri kosteus johtunee maatutkan mitaustulosten vääristymisestä routalevyn takia. Tulos on sinänsä toivottu, sillä ohuilla rakenteilla routalevy on ollut osana rakenteen hyvää suoriutumista. Seuraavaksi kysyttiin, mikä johtaa tyypillisesti keskiarvoista suurempaan korkeuspoikkeaman kasvuun rakenteilla, joissa on routalevy.

Hypoteesi 45: *Kun rakenteessa on routalevy, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 51 %:lla rakenteista, joilla maarakenteiden paksuus on 1,4–2,4 m, ojat ovat syviä ja taipuman varianssi on suurta. Koko rataosalla suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 18 %:lla rakenteista.*

Hypoteesin mukaan paksummilla rakenteilla, joissa on routalevy, korkeuspoikkeaman kasvu on poikkeuksellisen usein suurta. Lähtökohtaisesti paksuille rakenteille ei tarvitse asentaa routalevyä, joten voidaan kyseenalaistaa koko routalevyn tarkoitus rakenteessa. Ilmeisesti ongelmia ratarakenteessa on pyritty korjaamaan routalevyllä, mutta sen asentaminen ei ole poistanut ongelmaa. Routiminen ei siis ole ollut ainakaan ainoa ongelma näissä rakenteissa. Tällaisia rakenteita ovat:

- vaihteet
- sillanpäädyt
- routalevyjaksojen päädyt
- km 213+600–214+000 suora rataosuus
- km 216+000–216+900 suora rataosuus pellon laidalla
- km 218+000–218+500 suora rataosuus pellon laidalla.

Pitempien kohteiden osalta data ei kerro, miksi korkeuspoikkeaman kasvu on suurta. Kunnossapitohistoriasta voisi saada jotakin tietoa, mutta sitä ei ollut Kouvola–Kotka-rataosalta saatavilla käyttöön. Yksi yhdistävä tekijä pitemmille jaksoille on se, että routalevy on tulkittu vain mahdolliseksi routalevyksi maatutkadatan perusteella. Voikin olla, että jokin muu rakenteen ominaisuus näyttäytyy routalevynä maatutkatuloksissa.

Kuitenkin on hyvä huomata, että vähän alle puolet paksuista rakenteista, joilla on routalevy, ovat johtaneet keskiarvoiseen tai vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun. Osuus on keskiarvoista selvästi pienempi, mutta routalevy paksussa rakenteessa ei aina tarkoita suurta korkeuspoikkeaman kasvua. Sellaisia paksuja rakenteita, joissa on routalevy ja korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä, on samankaltaisissa paikoissa kuin missä on suur-takin korkeuspoikkeaman kasvua samoilla ehdoilla. Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on myös pätittäin routalevyjaksojen keskellä, mutta korkeuspoikkeaman kasvu vaihtelee paljon routalevyjakson aikana. Syytä tälle vaihtelulle ei voida datan perusteella antaa.

Routalevyllä vaikuttaa olevan pääasiassa positiivisia vaikutuksia ohuisiin alle 1,6 m paksuisiin rakenteisiin, mutta paksummilla rakenteilla routalevyn vaikutukset vaihtelevat. Routalevy voi lisätä korkeuspoikkeaman kasvua ainakin routalevy-jakson päädyissä. Syytä sille, miksi paksuille rakenteille on asennettu routalevy ja miksi korkeuspoikkeaman kasvu on näillä rakenteilla usein suurta, ei datasta voida päätellä. Osa routalevyistä on vain tulkintoja maatumkatadan perusteella ja voikin olla, että rakenteessa on jokin muu ominaisuus, joka näyttäytyy routale-vynä maatumkatatassa.

Kysymys 8: Miten ratarakenteen perustukset vaikuttavat geometrian heikkenemi- seen?

Kouvola–Kotka-rataosalla valtaosa (73 %) rakenteista on penkereellä. Kouvola–Kotka-rataosa on kokonaisuudessaan paljon homogeenisempi kuin Karjaa–Ervelä-väli ja perus- tamistavan vaihteluita ei ole yhtä paljoa. Onkin mielenkiintoista nähdä, toistuvatko Kar- jaa–Ervelä-välillä saadut tulokset. Tiedonlouhinta aloitetaan tiedonlouhinta kysymällä, kuinka perustamistavan muuttaminen vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 46: *Vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 82 % maaleikkauksella ja 19 % penkereellä, kun maarakenteiden paksuus on alle 1,8 m, alusrakenne on paksuu- deltaan 0,4–1,0 m, ojat ovat matalia ja pohjamaana on moreenia.*

Hypoteesi 47: *Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 74 % penkereellä ja 17 % maaleikkauksella, kun maarakenteet ovat paksuudeltaan alle 1,8 m, alusrakenne on kos- teaa ja paksuudeltaan 0,4–1,0 m ja pohjamaana on moreenia.*

Hypoteesien mukaan maaleikkauksella on pengertä suurempi vähäisen korkeus- poikkeaman osuus ja pienempi suuren korkeuspoikkeaman osuus, kun maarakenteet ovat ohuet. Jos tarkastellaan maaleikkausta ja pengertä kokonaisuuksina, kummallakin on yhtä paljon pientä (65 %) ja suurta (18 %) korkeuspoikkeaman kasvua. Kun pengerrakenteet rajataan alle 1,8 m paksuisiin, lukuihin tulee muutoksia. Pienen korkeuspoikkeaman kas- vun osuus vähenee (55 %) ja suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus kasvaa (28 %).

Hypoteesi 48: *Vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 79 % maaleikkauksella ja 45 % kallioleikkauksella, kun maarakenteet ovat paksuudeltaan alle 1,6 m, tukikerros on paksuudeltaan 450–550 mm, alusrakenne paksuudeltaan alle 0,6 m ja taipuman varianssi on pieni.*

Vähäisen korkeuspoikkeaman kasvu on harvinaisempaa kallioleikkauksella kuin maaleikkauksella ennakkoehtojen mukaisella radalla. Kaikkiaan kallioleikkauksella vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu (58 %) on selvästi harvinaisempaa kuin koko rataosalla (65 %), mutta suuri korkeuspoikkeaman kasvu (19 %) on silti vain vähän yleisempää kuin koko rataosalla (18 %).

Tutkitaan seuraavaksi tarkemmin, mikä on yleisintä kallioleikkauksilla sekä penkereillä, joiden maarakenteiden paksuus on alle 1,8 m. Kallioleikkauksilla etenkin muut kuin vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun johtavat rakenteet kiinnostavat. Aloitetaan kysymällä, mikä johtaa yli 0,1 mm²/a korkeuspoikkeaman kasvuun kallioleikkauksilla.

Hypoteesi 49: *Kallioleikkauksella suureen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 37 % sellaisista rakenteista, joiden alusrakenne on paksuudeltaan alle 0,6 m, koko rakenteen ja tukikerroksen kosteus on koholla ja ojat ovat matalat.*

Kohonneet kosteuden arvot koko rakenteessa ja etenkin tukikerroksessa viittaavat suureen korkeuspoikkeaman kasvuun kallioleikkauksella. Hypoteesin kohteet olivat Kotkan liikennepaikalta, jossa geometriavaatimukset eivät ole samat kuin linjalla, jolloin suurempia korkeuspoikkeamia sallitaan. Kuitenkin on muistettava, että tiedonlouhinnassa on käytetty korkeuspoikkeaman kasvua. Tämä tarkoittaa sitä, että Kotkan liikennepaikan kallioleikkauksilla on jokin ongelma, joka aiheuttaa kosteutta rakenteisiin ja korkeuspoikkeaman kasvua.

Alle 1,8 metrin paksuisten penkereiden tutkiminen aloitettiin kysymällä, mikä johtaa yleisimmin mihin tahansa korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 50: *Alle 1,8 m paksuisilla penkereillä vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 84 % sellaisista rakenteista, joiden paksuus on 1,4–1,8 m, alusrakenteen paksuus alle 0,6 m, rakenne on kuiva eikä siinä ole routalevyä ja taipuman keskiarvo on pieni.*

Tulos vastaa aiemminkin ohuille maalle perustetuille rakenteille saatuja tuloksia. Se että rakenne on kuiva, eikä siinä ole routalevyä, johtaa tyypillisesti vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun. Seuraavaksi kysyttiin, mikä johtaa alle 1,8 m paksuisilla penkereillä suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Hypoteesi 51: *Alle 1,8 m paksuisilla penkereillä suureen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 95 % sellaisista rakenteista, joilla rakenteen ja tukikerroksen kosteus on suurta, rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on suurta.*

Hypoteesin data on peräisin ainoastaan vaihteilta, alikulun päältä sekä Kotkan sataman puuratapölkkyraiteelta. Rakennepaksuudella tai perustamistavalla ei voida pitää olevan suurta merkitystä tässä tuloksessa. Kysymys tehtiin uudestaan ilman vaihteita ja siltoja. Tulokseksi saatiin samankaltaisia hypoteeseja kuin hypoteesi 51, joiden data oli nyt peräisin sillanpäädystä ja vaihteiden ympäriltä. Toisin sanoen, hypoteesin merkitys ei juuri muuttunut. Myös tästä poikkeava hypoteesi saatiin.

Hypoteesi 52: *Alle 1,8 m paksuisilla penkereillä suureen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 53 % sellaisista rakenteista, joiden maarakenteiden paksuus on 1,4–1,8 m, pengerpaksuus on alle 0,5 m ja rakenteessa on routalevy.*

Kun hypoteesin dataa tulkitaan tarkemmin, huomataan, että se on peräisin routalevyjaksojen päädystä sekä aiemmin louhinnassa esiintyneiltä ongelmakohteilta:

- km 213+600–214+000
- km 216+000–216+900
- km 218+000–218+500.

Näissä kohteissa on paksuhkot rakenteet, joissa on maatutkadatan perusteella tulkittu routalevy ja korkeuspoikkeaman kasvu on suurta. Datan perusteella ei voida sanoa, miksi korkeuspoikkeaman kasvu on erityisen suurta näillä rakenteilla, mutta rakennekerrosten ominaisuuksien tutkimisen kannalta nämä ovat erittäin mielenkiintoisia kohteita.

Radan perustamistavasta Kouvola–Kotka-väliltä voidaan todeta, että paksut maarakenteet ja kuivat ohuet rakenteet suoriutuvat kaikista parhaiten. Ohuet ja kosteat rakenteet sekä epäjatkuvuuskohdat taas edustivat sitä joukkoa, jossa korkeuspoikkeaman kasvu on tavallista yleisempää.

6. PÄÄTELMÄT TULOXSISTA JA JATKOTUTKIMUSTARPEET

Tässä luvussa annetaan tiedonlouhinnan tulosten perusteella muodostetut vastaukset kysytyihin analyyttisiin kysymyksiin, esitetään päätelmät tuloksista sekä jatkotutkimustarpeet.

6.1 Päätelmät tuloksista

Päätelmät on tehty kummankin tutkimuskohteen hypoteesien perusteella. Joitakin eroja tutkimuskohteiden välillä tuloksissa ja niistä tehtävistä päätelmissä oli, mutta pääasiassa tulokset eri tutkimuskohteilta tukivat toisiaan.

Kysymys 1: Mikä johtaa yleisimmin tietynlaiseen geometrian heikkenemiseen?

Yleisin homogeeninen samalla tavalla käyttäytyvä osa rataa on joko sellainen, jossa on paksut sekä kuivat maarakenteet ja geometrian heikkeneminen on pientä tai sellainen, jossa on ohuet sekä kosteat maarakenteet ja geometrian heikkeneminen on suurta. Pienen geometrian heikkenemisen alueella ei ole tehty kunnossapitotoimia, kun taas suuren geometrian heikkenemisen alueella tuentoja on tehty lähes vuosittain.

Kysymys 2: Mitkä tekijät ovat yleisimpiä, kun geometrian heikkenemisnopeus on suurta?

Yleisimpiä tekijöitä, kun geometria heikkenee nopeasti, ovat:

- ohuet maarakenteet ($< 1,6$ m)
- suuri kosteus
- suuri taipuman keskiarvo ja varianssi
- routalevy
- ohut tukikerros
- useat tuentakerrat ja kunnossapitotoimet
- maaperustus
- vaihteet ja epäjatkuvuuskohdat.

Rakenteilla, joilla on jokin yllä mainituista tekijöistä, geometrian heikkenemisnopeus voi olla myös vähäistä. Kyseiset tekijät ovat yleensä osatekijöinä, kun suuren geometrian heikkenemisen kasvun osuus on poikkeuksellisen suuri.

Kysymys 3: Onko rakenteen paksuuden ja rakenteen kunnan välillä korrelaatiota?

On. Tyypillisesti paksuilla rakenteilla geometria heikkenee vain vähän, kun taas ohuilla rakenteilla paljon. Erityisesti ääripäät käyttäytyvät näin, eli erittäin paksut suoriutuvat parhaiten ja erittäin ohuet huonoiten. Paksuuden vaikutusta on arvioitu ainoastaan maalle perustettujen rakenteiden osalta, eli kalliroleikkaukset ja tunnelit on jätetty tiedonlouhinnasta pois.

Kysymys 3a: Jos on, onko se lineaarinen ja voidaanko antaa raja-arvoa sille, mikä erottaa hyvän ja huonon rakenteen toisistaan?

Riippuvuus huonon ja ohuen sekä paksun ja hyvän rakenteen välillä ei ole lineaarinen. Paksut rakenteet ovat lähes aina hyviä, mutta mitä ohuempi rakenne on kyseessä, sen enemmän vaihtelua tuloksiin tulee. Ohuet rakenteet voivat suoriutua pääasiassa hyvin, mikäli rakenne on kuiva. Ohuet ja kosteat rakenteet taas suoriutuvat pääasiassa huonosti. Epäjatkuvuuskohtissa paksut ja ohuet rakenteet suoriutuvat huonosti.

Tämä viittaa siihen, että paksuus on vain osatekijä, joka toimii yhdessä muiden ominaisuuksien kanssa, ja lopputulos voi olla erilainen eri tapauksissa samoilla rakennepaksuuksilla. On kuitenkin yleisempää, että geometria heikkenee nopeammin ohuella kuin paksulla rakenteella. Ohuet rakenteet ovat siis riskialttiimpia geometrian suurelle heikkenemiselle.

Tiedonlouhintojen perusteella ohuen ja paksun rakenteen erottaa noin 1,6 metrin paksuinen rakenne. Karjaa–Ervelä-välillä ohuen ja paksun rakenteen raja on 1,6–1,8 m välillä, kun taas Kouvola–Kotka-rataosalla se on 1,4–1,6 m välillä. Rakenne, joka on ohuempi kuin 1,6 m, käyttäytyy ohuiden rakenteiden kaltaisesti, ja rakenne, joka on paksumpi kuin 1,6 m, käyttäytyy paksujen rakenteiden kaltaisesti. 1,6 m ympärillä tulokset vaihtelevat. Routalevyllä oli vaikutuksia rakenteiden käyttäytymiseen.

Kysymys 4: Miten tukikerros vaikuttaa geometrian heikkenemiseen?

Tukikerroksen paksuudella ei nähty olevan vahvoja yhteyksiä geometrian heikkenemiseen. Ohut tukikerros vaikutti lisäävän suuren geometrian heikkenemisen riskiä, mutta se oli vain osatekijänä rakenteen toiminnassa. Ohut tukikerros ei muuta muuten hyväksi todetun rakenteen käyttäytymistä huonommaksi ja toisaalta paksu tukikerros ei paranna huonosti toimivan rakenteen käyttäytymistä.

Tukikerroksen suurella kosteudella oli vahva yhteys suureen geometrian heikkenemiseen. Tukikerroksen kosteus saattaa tosin kertoa enemmän radan rakenneosista, jotka häiritsevät maatutkamittauksen tuloksia enemmän kuin tukikerroksen materiaalin kosteudesta. Epäjatkuvuuskohtien osalta tulisikin tutkia tarkemmin, onko niissä tukikerroksen materiaali aidosta hienontunutta vai johtuuko kosteuden arvojen kasvu maatutkasignaalin häiriytymisestä.

Karjaa–Ervelä-välillä tukikerroksen ikä oli erittäin merkittävä tekijä geometrian heikkenemisessä. Uusi tukikerros viittasi erittäin vahvasti suureen geometrian heikkenemiseen, kun taas vanha tukikerros vähäiseen. Tiedossa onkin, ettei jälkituentoja ole toteutettu suunnitellusti päällysrakenteen vaihdon jälkeen, joten tämän rataosuuden perusteella ei voida vetää johtopäätöksiä tukikerroksen iän vaikutuksesta yleisesti. Joka tapauksessa tiedonlouhinnalla saatiin selville ongelma, joka on aidosti tunnistettu. Tiedonlouhinnan data ei pystynyt selittämään jälkituntojen puutetta, mutta tarkemmalla tuentahistorialla tämäkin yhteys oltaisiin voitu todentaa tiedonlouhinnan avulla.

Useilla tuentakerroilla havaittiin olevan yhteys suureen geometrian heikkenemiseen. Tuentahistoria ei ollut täydellinen, mutta sen perusteella ongelmallisilla alueilla tuetaan rataa jopa vuosittain. Geometria kuitenkin jatkaa heikkenemistään näillä alueilla, jolloin tuenta ei ainoa kunnossapitoimenpide, mitä kyseiset kohteet vaativat. Kunnossapito on kuitenkin kohdistettu datankin mukaan ongelmallisiin kohteisiin, joten tulos on siltä kannalta mielekäs.

Kysymys 5: Onko rakenteen kosteuden ja rakenteen kunnon välillä korrelaatiota?

On. Pieni kosteuspitoisuus viittaa yleensä vähäiseen geometrian heikkenemiseen, kun taas suuri kosteuspitoisuus suureen geometrian heikkenemiseen.

Kosteuspitoisuuden arvioinnissa ongelma on se, ettei kosteuspitoisuus välttämättä kuvaa maarakenteen kosteutta, vaan jonkin rakenneosan esiintymistä. Esimerkiksi Kouvola–Kotka-rataosalla vaihteilla, routalevyillä, silloilla ja rummuilla kosteuspitoisuus oli suuri ja geometria heikkeni nopeasti. Maatutkauksessa nämä rakenneosat kasvattavat kosteuspitoisuuden arvoa mittaustuloksissa, eikä arvo kuvaa maarakenteen todellista kosteutta. Näillä rakenneosilla myös kohdataan useimmiten suurta geometrian heikkenemistä epäjatkuuskohdasta johtuen, joten suurella rakenteen kosteudella ei välttämättä ole tekemistä geometrian heikkenemisen kanssa näissä kohteissa.

Kysymys 5a: Jos on, onko se lineaarinen ja voidaanko antaa raja-arvoa sille, mikä erottaa hyvän ja huonon rakenteen toisistaan?

Yhteys ei ole todennäköisesti lineaarinen. Karjaa–Ervelä-välillä suurimmat kosteuden arvot johtivat suureen korkeuspoikkeaman kasvuun harvemmin kuin vain hieman koholla olevat kosteuden arvot. Kouvola–Kotka-rataosalla taas kosteus oli niin kahtia jakautunut, ettei lineaarisuutta voitu todentaa.

Karjaa–Ervelä-välillä tiedonlouhinnassa käytettiin suhteellisia kosteuspitoisuuksia, ja niiden perusteella arvo 0, eli keskiarvoinen kosteuspitoisuus, erottaa hyvän rakenteen huonosta. Kouvola–Kotka-rataosalla käytössä oli moisture damage index -arvo. Sen osalta hyvän ja huonon rakenteen erottivat arvot 40–50 väliltä.

Kysymys 6: Miten radan taipuma vaikuttaa geometrian heikkenemiseen?

Suuri taipuman keskiarvo viittaa suureen geometrian heikkenemiseen, mutta yhteys ei ole kovin vahva. Taipuman varianssin suurilla arvoilla taas on vahva yhteys suureen geometrian heikkenemiseen, ja pienillä taipuman varianssin arvoilla vähäiseen geometrian heikkenemiseen.

Taipuman keskiarvosta saatiin vahvempia yhteyksiä Kouvola–Kotka-rataosalta, kun taas Karjaa–Ervelä-välillä taipuma ei viitannut vahvasti mihinkään tiettyyn korkeuspoikkeaman kasvun arvoon. Erona näiden rataosien välillä on se, että Kouvola–Kotka-rataosan mittaukset on tehty uudemmalla Stiffmasterilla, joka kiinnitetään sepelivaunun akseliin, kun taas Karjaa–Ervelä-välin mittauksessa Stiffmaster on ollut kiinnitettynä ratakuorma-auton akseliin. Sepelivaunun suurempi akselipaino (22,5 t) aiheuttaa suuremman vasteen radassa kuin ratakuorma-auton akselipaino (14 t). Tämä saattaa osittain selittää Karjaa–Ervelä-välin tulosten vesittymistä ja kaarteiden vaikutusten korostumista mittaustuloksissa. Mittauksessa käytetystä pienemmästä akselipainosta huolimatta Karjaa–Ervelä-välin mittaustulokset ovat suurempia absoluuttisilta arvoiltaan, mutta tämä liittyy tulosten kalibrointiin liittyviin ongelmiin. Taipuman absoluuttiset arvot eivät ole vertailtavissa kohteiden välillä.

Taipuman varianssilla havaittiin olevan selvä yhteys geometrian heikkenemiseen. Taipuman varianssi kertoo jäykkyysvaihteluista radassa, mutta taipuman mittauksen arvot voivat vaihdella myös kulkupinnan epätasaisuuksista. Tällöin on vaikea sanoa, onko taipuman varianssin kohdalla todellinen jäykkyysvaihtelu, vai onko kyseessä vain epätasainen kohta geometriassa. Taipuman varianssin korkeat arvot liittyvät vahvasti epäjatkuvuuskohtiin.

Kysymys 7: Millaisia asioita esiintyy paikoissa, joissa ratarakenteessa on routalevy?

Routalevyn vaikutukset olivat jokseenkin ristiriidassa tutkimuskohteiden välillä. Karjaa–Ervelä-välillä geometrian heikkeneminen on yleisempää rakenteilla, joissa on routalevy, kuin rakenteilla ilman routalevyä. Karjaa–Ervelä-välin datan mukaan routalevy kuitenkin toimii erinomaisesti tunneleissa. Huonosti routalevy vaikutta toimivan Karjaa–Ervelä-välin datan mukaan epäjatkuvuuskohdissa ja muutenkin ongelmalliseksi havaitulla pelto-kohteella, jossa ohut alusrakenne on suoraan pohjamaan päällä.

Kouvola–Kotka-rataosalla taas geometrian heikkeneminen on suurta paksuilla rakenteilla, joissa on routalevy, sekä epäjatkuvuuskohdissa. Kouvola–Kotka-rataosan datan mukaan ohuet (< 1,6 m) rakenteet suoriutuvat paremmin, kun niissä on routalevy.

Syitä Karjaa–Ervelä-välin peltokohteen tai Kouvola–Kotka-rataosan paksujen rakenteiden käyttäytymiseen ei käytössä olleesta datasta löytynyt. Molempien osalta syy todennäköisesti löytyy heikoista radan rakennekerrosten materiaaleista ja pohjamaasta, mutta materiaalien ominaisuuksista ei ollut tarkempaa tietoa.

Epäjatkuvuuskohtissa korkeuspoikkeaman kasvu oli suurta, vaikka rakenteessa olisikin routalevy. Toisinaan vaikuttaa myös siltä, että routalevyt aiheuttavat epäjatkuvuuskohdan routalevyjakson päätyyn. Korkeuspoikkeaman kasvu on selvästi koholla routalevyjakson päädyssä, eikä ratarakenteessa ole käyttäytymistä selittävää tekijää. Routalevyistä ei ollut tietoa, onko rakenteessa XPS- vai EPS-routalevy.

Kysymys 8: Miten ratarakenteen perustukset vaikuttavat geometrian heikkenemiseen?

Karjaa–Ervellä välillä tunnelit ja kummankin tutkimuskohteen paksut penkereet suoriutuivat yleensä parhaiten. Maaleikkauksilla ja kalliroleikkauksilla geometrian heikkeneminen oli myös usein vähäistä, jos rakenne oli kuiva. Huonoin tilanne on se, kun ohuen maalle perustetun rakenteen kosteus on suurta tai kalliroleikkauksella on kostea ja mahdollisesti hienorakeinen alusrakenne tukikerroksen ja kallionpinnan välissä.

Tulosten yleistettävyys

GUHA-tiedonlouhinnalla saatujen tulosten yleistettävyys on ongelmallista, sillä menetelmän käytöstä ja tiedonlouhinnassa käytetyistä tunnusluvuista on vähän kokemusta. Tuloksien yleistettävyyttä on arvioitu vain kahden tutkimuskohteen välillä, eikä koko rataverkon näkökulmasta. Jotta tulokset olisivat yleistettävissä koko rataverkolle, täytyisi tiedonlouhintaan käyttää huomattavasti enemmän kohteita eri puolelta Suomea.

Ristiriitaisia tuloksia tutkimuskohteiden kesken oli vähän. Ainoastaan routalevyn vaikutus ohuella rakenteella vaikutti olevan käänteinen tutkimuskohteiden kesken. Maarakenteiden paksuuden ja kosteuden sekä rakenteiden perustamistavan vaikutukset korreloivat hyvin tutkimuskohteiden kesken.

Tulosten absoluuttisia arvoja ei pääasiassa voida yleistää. Taipumamittauksen arvoihin vaikuttaa mittaustapa ja mittalaitteen kalibrointi. Rakenteiden kosteuden arvot voisivat olla vertailukelpoisia, mikäli kummastakin kohteesta olisi MDI-arvot, mutta suhteellista kosteutta on vaikea vertailla. Myös korkeuspoikkeaman kasvu oli täysin eri luokassa tutkimuskohteiden välillä. Eroa korkeuspoikkeaman kasvun arvoissa eivät selittäneet liikenteen bruttotonnimäärät, sillä Kouvola–Kotka-rataosalla on merkittävästi enemmän liikennettä, vaikka korkeuspoikkeaman kasvu oli yleisesti pienempää. Tähän voi tosin vaikuttaa vähäinen mittauskertojen saatavuus.

Vaikka kummatkin tutkimuskohteet olivat vanhoja ratoja, oli niiden välillä merkittäviä eroja. Karjaa–Ervellä välillä pohjaolosuhteet ja rakenteet vaihtelivat paljon enemmän kuin Kouvola–Kotka-rataosan. Tämä saattaa osakseen selittää korkeuspoikkeaman kasvun alhaisempia arvoja Kouvola–Kotka-rataosalla.

Maarakenteiden paksuus, joka erotti hyvän rakenteen huonosta, oli yksi harvoista arvoista, joka oli kummallakin rataosalla samaa suuruusluokkaa. Kummassakin tutkimuskohteessa noin 1,6 metrin paksuiset rakenteet toimivat rajana ohuen ja paksun rakenteen käyttäytymisen välillä.

Epäjatkuvuuskohdat ovat vahvasti esillä suuren geometrian heikkenemisen syissä kummallakin tutkimuskohteella. Epäjatkuvuuskohdissa rakenne on yleensä kostea ja taipumat ja taipuman vaihtelut suuria. Epäselvää on kausaliteetti ja juurisyyt näille ilmiöille. Varmaksi ei voida sanoa, johtuuko rakenteen kosteus maan ominaisuuksista vai viereisen rakenneosan aiheuttamasta häiriöstä maatutkukseen. Samoin taipuman suuret arvot ja taipuman vaihtelu voivat johtua realisoituneesta korkeuspoikkeamasta.

Hyvä ja huono rata

Tiedonlouhinnan avulla pyrittiin määrittämään, mikä tekee radasta hyvän tai huonon. Tunnuslukuna radan suoriutumiseksi käytettiin korkeuspoikkeaman kasvua. Lähtödata ja oteltiin tiedonlouhinnan tulosten perusteella niin sanottuun hyvään ja huonoon rataan, eli rataan, jossa korkeuspoikkeaman kasvu oli tyypillisesti vähäistä ja rataan, jossa korkeuspoikkeaman kasvu oli tyypillisesti huonoa. Jaottelu perustui tiedonlouhinnassa saatujen tulosten perusteella määritettyihin raja-arvoihin eri parametreille.

Tiedonlouhinnan perusteella hyvää rataa on sellainen rata, jossa:

- maarakenteiden paksuus on yli 1,6 m
- rakenteen kosteus on vähäistä (suhteellinen kosteus < 0 , MDI < 50)
- taipuman keskiarvo on rataosan keskiarvoa pienempää
- taipuman varianssi on vähäistä
- tukikerros on vanhaa
- tuentoja on tehty vain vähän
- kohde ei ole vaihdealueella tai sillalla.

Tiedonlouhinnan perusteella huonoa rataa on sellainen rata, jossa:

- maarakenteiden paksuus on alle 1,6 m
- rakenteen kosteus on suurta (suhteellinen > 0 , MDI > 50)
- taipuman keskiarvo on rataosan keskiarvoa suurempaa
- taipuman varianssi on suurta
- tukikerros on uutta
- tuentoja on tehty paljon.

Suodattamalla käytössä ollut data edellä mainituin ehdoin Karjaa–Ervelä-välillä hyvää rataa saatiin 248 metriä ja huonoa rataa 118 metriä. Kouvola–Kotka-rataosalla hyvää rataa saatiin 22 685 metriä ja huonoa rataa 1 205 metriä. Taulukossa 4 on vertailtu hyvää ja huonoa rataa koko rataosuuteen.

Taulukko 4. Tiedonlouhinnan tulosten perusteella rajattu hyvä ja huono rata (R^2 20 m laskentapituus).

	Koko rata	Hyvä rata	Huono rata
Karjaa–Ervelä			
Korkeuspoikkeaman kasvun keskiarvo	0,36 mm ² /a	0,23 mm ² /a	0,83 mm ² /a
Korkeuspoikkeaman kasvun mediaani	0,27 mm ² /a	0,16 mm ² /a	1,0 mm ² /a
Kouvola–Kotka			
Korkeuspoikkeaman kasvun keskiarvo	0,25 mm ² /a	0,08 mm ² /a	4,14 mm ² /a
Korkeuspoikkeaman kasvun mediaani	0,06 mm ² /a	0,05 mm ² /a	1,17 mm ² /a

Tiedonlouhinnan tulosten perusteella datan rajaaminen hyvään ja huonoon rataan muuttaa radan korkeuspoikkeaman kasvun käyttäytymistä merkittävästi. Oletettavasti näin kuuluisikin tapahtua, sillä tiedonlouhinta perustuu siihen syötetyn datan tulkintaan. Tällä tarkastelulla on havainnollistettu yksinkertaisella esimerkillä niitä tuloksia, mitä tiedonlouhinnassa on löydetty. Eri tekijöiden vaikutussuhteiden arviointi on esitetty yhteenvedossa.

6.2 Tiedonlouhinnan soveltuminen radan kuormituskestävyyden tutkimiseen

Radasta tehdyistä mittauksista koottu data soveltuu hyvin tiedonlouhintaan. Tiedonlouhinnalla on saatu selville yhteyksiä geometrian heikkenemisen ja radan rakenteiden ominaisuuksien välillä. Saatujen yhteyksien selittämistä ei kuulu tehdä pelkän tiedonlouhinnan perusteella, vaan yhteydet tulee selittää rautatierakenteisiin liittyvien teorioiden avulla.

Haasteita rautatiedatan tiedonlouhinnassa ovat:

- raja-arvojen puuttuminen eri parametreille
- mittausten kohdistaminen
- mittausten virhelähteet
- epäselvyydet syy-seuraus-suhteissa.

Tiedonlouhinnan parametrien arvojen vaihteluille on vaikea määrätä parametria tiedonlouhinnassa. Esimerkiksi routalevyjakson pääty tai siirtymä kalliroleikkaukselle pitäisi merkata dataan käsin, jos haluttaisiin ottaa näitä parametreiksi tiedonlouhintaan. Tiedonlouhinta käsittelee routalevyjakson reunalla olevan ratametrin tasa-arvoisesti routalevyjakson keskellä olevaan ratametriin verrattuna, mikäli näille ei ole annettu erityistä sijaintia kuvaavaa parametria. Näin ollen rakenteiden muutoskohtia on vaikea määrätä ennakoon ilman merkittävän suuruista manuaalisesti tehtävää työtä.

Hyvänä puolena GUHA-tiedonlouhinnassa on se, ettei mittaustarkkuudella ole niin suurta merkitystä, kun voidaan asettaa luokkia, joihin arvot kuuluvat. Tällöin absoluuttisten arvojen tarkkuus tai ääripäiden korostuminen eivät ole suuria ongelmia. GUHA-tiedonlouhinta soveltuu myös siitä syystä hyvin, että etsitään vahvimpia yhteyksiä, eikä vain absoluuttisia totuuksia. Rakenteet käyttäytyvät usealla eri tavalla eri tapauksissa ja siksi on hyvä tutkia esimerkiksi geometrian heikkenemisen yleisyyttä, eikä vain absoluuttista arvoa.

Kontigenssitaulujen eli nelitaulujen tulkinta on hieman hankalaa, koska samankaltaisia hypoteeseja saadaan yleensä paljon. Kuvitellaan tilannetta, jossa saadaan kaksi muuten vastaavaa hypoteesia, mutta erona on, että yksi ennakkoehto on hieman eri toisessa. Tällöin nämä ovat täysin omia hypoteeseja, jotka tulkitaan erikseen. On vaikeaa löytää kokonaisuuksia ja ohjata tiedonlouhintaa siten, ettei niin sanottuja rinnakkaisia hypoteeseja tule paljon. Hypoteesien määrästä ja sisällöistä voidaan kuitenkin arvioida selittäviä tekijöitä melko hyvin. Rinnakkaisten hypoteesien tunnistaminen vaatii hyvää tuntemusta tiedonlouhinnasta sekä tiedonlouhintaan syötetystä datasta.

Tässä diplomityössä käytössä ollut data oli melko suppea siihen nähden, mitä rautateistä voitaisiin louhia. Silti jo tämänkin datamäärän kanssa tietokoneiden laskentateho alkoi tulla vastaan rajoittavana tekijänä. Tiedonlouhinnassa selvittävä asia täytyy olla riittävän hyvin tarkennettu ja kysymysten kohdistua hyvin, jotta voidaan louhia vain tiettyyn ilmiöön liittyvää dataa. Liian useiden parametrien käyttö voi häiritä tiedonlouhintaa, mikäli ne eivät varsinaisesti liity louhinnassa etsittyyn ilmiöön. Esimerkiksi siltakohteet kannattaa poistaa, kun tiedonlouhinta kohdistuu maarakenteiden paksuuteen. Maarakenteiden paksuuden vaikutusten arvioinnissa ei aina kannata käyttää myös rakennekerrosten paksuuksia tai tiedonlouhinta voi tuottaa useita triviaaleja hypoteeseja. Tällainen hypoteesi voi olla esimerkiksi, että paksut rakennekerrokset esiintyvät yleensä suurien rakennepaksuuksien kanssa.

6.3 Jatkotutkimustarpeet

Työssä havaittuja jatkotutkimustarpeita on lueteltu taulukossa 5. Jatkotutkimustarpeita on avattu tarkemmin taulukon alla.

Taulukko 5. Diplomityössä esille tulleet jatkotutkimustarpeet.

1)	Geometrian heikkenemisnopeuden laskentamenetelmät
2)	Absoluuttisen geometrian heikkenemisen mittaaminen
3)	Tiedonlouhinnan soveltaminen eri ratakohteisiin ja avoimeen dataan
4)	Pistemäisten toistuvien virhekohteiden parantaminen

1) Geometrian heikkenemisnopeuden laskentamenetelmät

Geometrian heikkenemisnopeuden potentiaali radan kunnan indikaattorina on merkittävä. Sitä tulisikin tutkia ja vertailla eri menetelmiä sen arviointiin. Geometrian heikkenemisnopeuden perusteella on teoreettisesti mahdollista luokitella radat hyviin ja huonoihin numeroarvon perusteella. Tarkka ratojen luokittelu helpottaa kunnossapitotoimenpiteiden kohdistamista ja seuranta. Jotta luokittelua voitaisiin tehdä, täytyisi muodostaa selvä käsitys siitä, mitä geometrian heikkeneminen aidosti indikoi ja miten sitä tulisi laskea.

Pitkän ajan seuranta tulisi tehdä eri kohteista radantarkastustulosten ja painumaseurannan perusteella, jotta saataisiin käsitys eri rataosien suhteellisista ja absoluuttisista geometrian heikkenemisnopeuksista. Näiden avulla voitaisiin tehdä vertailua eri rataosien välillä ja selvittää, missä geometrian heikkenemisnopeus on suurin ja mikä sitä mahdollisesti aiheuttaa. Esimerkiksi bruttotonnimäärien tai kunnossapitoluokkien vaikutusta tulisi tutkia. Tulosten perusteella voitaisiin arvioida, onko geometrian heikkenemisnopeudelle mahdollista asettaa raja-arvoja esimerkiksi liikennemääriin perustuen.

Muiden maiden käytäntöjä ja eri laskutapoja tulisi selvittää. Geometrian heikkenemisnopeuden indikaattorina on nyt käytetty korkeuspoikkeamasta laskettua running roughness -arvon kasvua. Kyseinen laskutapa valittiin siksi, että sen avulla tuotettu data vastasi parhaiten korkeuspoikkeamien käyttäytymistä. Euroopassa on ollut käytössä verrokkina käytetty geometriavirheiden keskihajonnasta laskettava arvo (Li et al. 2016, s. 396–398). Voikin olla, että laskentaa keskihajonnasta tulisi kehittää, jotta heikkenemisnopeuden arvot olisivat verrattavissa muiden Euroopan maiden kesken. Tässä työssä ei ollut mahdollisuutta kehittää geometrian heikkenemisnopeuden arvoja pidemmälle, koska työ painotui tiedonlouhintaan. Kuitenkin tämän aihepiirin jatkon kannalta seuraava toimenpide tulisi olla geometrian heikkenemisnopeuden laskentatavan määrittely.

2) Absoluuttisen geometrian heikkenemisen mittaaminen

Absoluuttisen geometrian heikkenemisen ja radantarkastusmittausten välistä yhteyttä tulisi tarkastella. Tämä työ on tehty suhteellisten geometriavirheiden perusteella, jolloin tietyt aallonpituudet tai laaja-alaiset painumat eivät näy virheinä. Yleinen käsitys on, että absoluuttinen heikkeneminen ja suhteellisten poikkeamien kasvu ovat riippuvaisia toisistaan. Absoluuttista geometriaa ei Suomessa tyypillisesti mitata, jolloin on vaikea sanoa, minkälainen riippuvuus näillä on. Tästä syystä tulisi rakentaa absoluuttisen geometrian mittaussuunnitelma ja seurata, kuinka radan mittaustulokset käyttäytyvät absoluuttisen heikkenemisen ja suhteellisten poikkeamien perusteella. Nyt radantarkastus ja radan analysointi perustuvat kaluston kulkua häiritseviin poikkeamiin radassa, mutta radan absoluuttisen aseman muutos kertoisi paljon enemmän tietoa radan rakenteellisesta kunnosta.

3) Tiedonlouhinnan soveltaminen eri ratakohteisiin ja avoimeen dataan

Tässä työssä käytettiin radantarkastusvaunun mittaustietoa. Radantarkastusvaunun data on saatavilla internetissä tunnusten takana alan toimijoille avoimesti, mutta tiedostomuoto on salattu siten, että ainoastaan sen alkuperäinen haltija pystyy käyttämään dataa. Joitakin radantarkastusvaunun tietoja on saatu käyttöön numeerisina, jolloin niitä on pystytty hyödyntämään tiedonlouhinnassa. Radantarkastusraportit, jossa data on muutettu kuvaajaksi, ovat saatavilla pdf-muodossa, mutta datan analysoinnin kannalta niistä ei ole hyötyä. Radantarkastusvaunun numeerisesta mittaustietosta tulisi tehdä aidosti avointa dataa.

Tiedonlouhintaa voidaan tehdä monesta muustakin näkökulmasta kuin geometrian heikkenemisen ja maarakenteiden välisestä yhteydestä. Seuraavaksi voitaisiinkin soveltaa tiedonlouhintaa muihinkin tarkoituksiin, esimerkiksi vaihteiden vikaantumiseen tai kiskojen kulumiseen. Pitäisikö kartoittaa ensin ne kohteet, missä on vaikeuksia löytää yhteyksiä tekijöiden välillä. Sen jälkeen tulisi selvittää, onko riittävästi ja riittävän hyvin ongelmaa kuvaavaa dataa, jotta ongelmaa voidaan lähestyä tiedonlouhinnan avulla.

Kun tiedonlouhinnan näkökulmana on jollain tapaa radan rakenteen kunto, tarkka kunnossapitohistoria olisi erittäin hyödyllinen työkalu kunnan arvioinnissa. Kun tiedetään tehdyt kunnossapitotoimenpiteet radalla, jolla on edelleen ongelmia, voidaan karsia mahdollisia vian aiheuttajia niiden perusteella. Esimerkiksi tukeminen ja tukikerroksen vaihtaminen ovat tyypillisiä kunnossapitotoimenpiteitä, mutta niiden tehokkuutta tulisi seurata, jottei toimenpiteitä tehdä turhaan, jos ongelman juurisyy jää poistamatta. Tiedonlouhinta voisi valaista tekijöitä, joita tyypillisesti radassa esiintyy, kun geometria heikkenee paljon, vaikka kunnossapitotoimia on tehty.

4) Pistemäisten toistuvien virhekohteiden parantaminen

Suuri geometrian heikkeneminen on selvästi yleisempää muun muassa rumpujen, sillanpäätysten ja kallioleikkaukselle siirtymien kohdalla kuin homogeenisella radalla. Nämä pistemäiset epäjatkuvuuskohdat ovat erittäin hankalia korjata, sillä vaihtoehtoina ovat erittäin kalliit siirtymärakenteet tai jatkuva päällysrakenteen kunnossapito.

Pistemäisten ongelmakohtien poistamiseen tulisi kehittää kustannustehokkaita ratkaisuja. Nykyisten siirtymärakenteiden kuten paalulaattojen järeys vähentää niiden käyttöä korjausrakenteina. Alusrakenteen parantaminen ja vahvistaminen olisi hyvä tapa lähestyä ongelman ratkaisua.

Ongelmana on, ettei kunnossapidolla eli juurikaan mahdollisuuksia edistää rakenteiden kuntoa tukikerroksen alapuolelta. Alusrakenteen kuntoa voidaan kohentaa kuivatuksen parantamisella, mutta varsinaiset rakenteen parantamistoimet rajautuvat alusrakenteen vaihtoon, mikä on taas varsin kallis ratkaisu.

Tarve olisikin kehittää alusrakenteen parantamismenetelmä, jossa ei tarvitsisi poistaa raitetta alusrakenteen päältä. Ratkaisuja tähän voi löytyä esimerkiksi rakenteen biokemiallisesta vahvistamisesta, jolla on vahvistettu muun muassa tulvapenkereitä Hollannissa. Menetelmän soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin ja sovellustapaa käytössä olevaan rautatiehen tulisi tutkia. Alusrakenteen parantamistoimia tarvittaisiin myös muuallekin kuin vain epäjatkuvuuskohtiin.

7. YHTEENVETO

Radan geometria heikkenee jatkuvasti liikenteen kuormituksen vaikutuksesta, mutta ongelmia aiheuttaa liian nopea tai epätasainen geometrian heikkeneminen. Ongelmallinen radan geometrian heikkeneminen johtuu pääasiassa siitä, että junaliikenteen kuormitus on ylittänyt radan kuormituskestävyyden tietyllä ajanhetkellä tai ajanjaksolla. Geometrian heikkeneminen ei ole lineaarista radan elinkaaren alusta loppuun. Esimerkiksi kunnossapitotoimet parantavat geometriaa aika-ajoin. Geometrian heikkenemisen syiden ymmärtäminen vaatii paljon taustatietoa radan rakenteesta, teoreettisesta geometriasta, ympäristöstä ja kunnossapitohistoriasta. Pelkillä geometriamittauksilla ei voida tulkita radan ongelmia geometrian heikkenemiskohdissa.

Geometrian heikkenemisnopeus on erittäin potentiaalinen työkalu radan kunnan seurantaan. Korkeuspoikkeaman kehittymisen perusteella lasketulla geometrian heikkenemisnopeudella on selviä korrelaatioita tiedossa oleviin ongelmakohteisiin ja muuhun radan kuntoa indikoivaan dataan. Geometrian heikkenemisnopeutta tulisi tutkia lisää eri laskentamenetelmien näkökulmista, jotta laskentatavat voitaisiin harmonisoida. Kun laskentatapa on selvillä, voitaisiin etsiä yhteyksiä eri rataosien heikkenemisnopeuksien välillä ja asettaa raja-arvot geometrian heikkenemiselle.

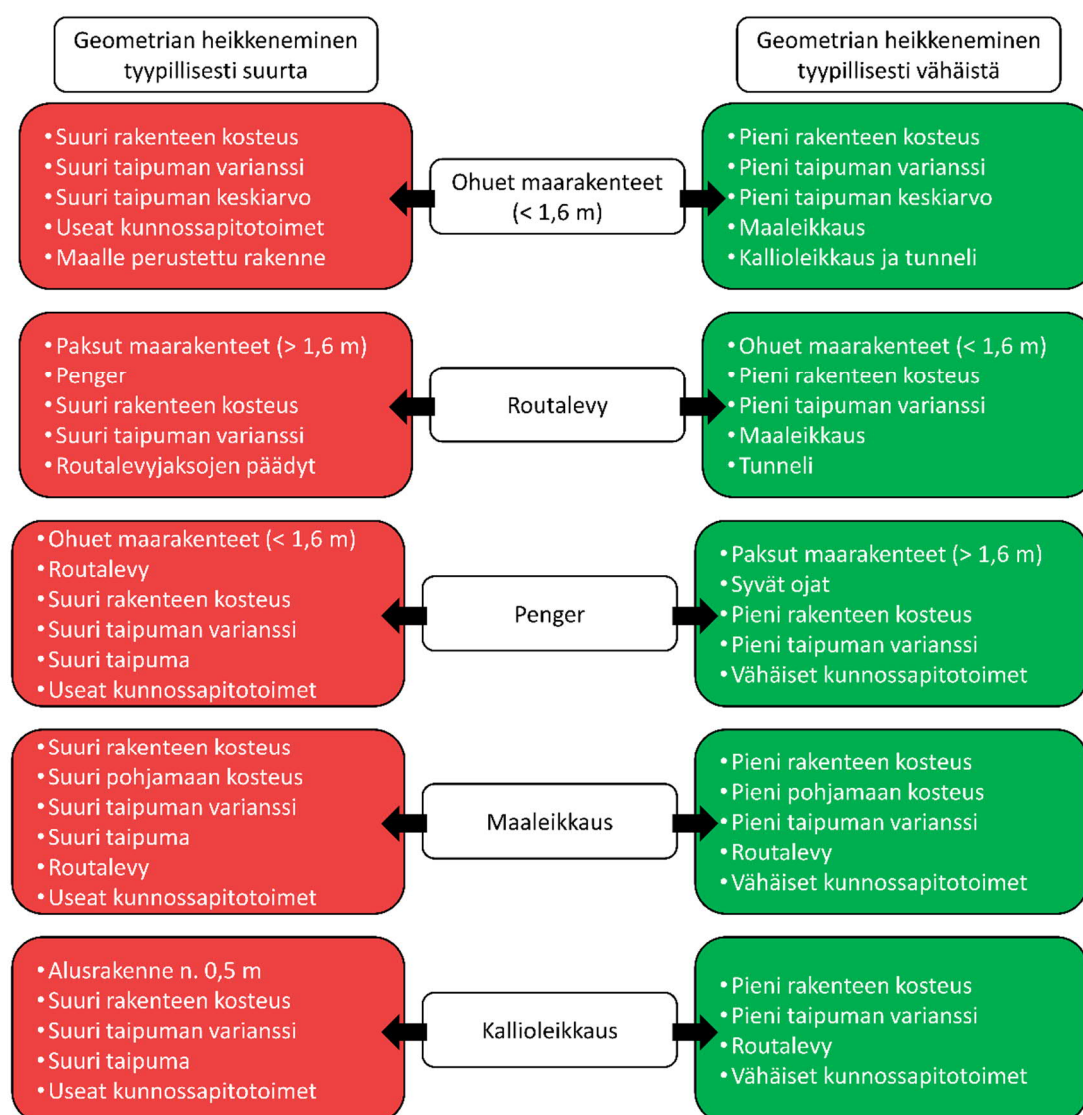
Tiedonlouhinta on monimutkainen mutta kattava tapa lähestyä radan kuormituskestävyyttä. Datan valmisteluun, tiedonlouhintaan ja tulosten analysointiin kuluu aikaa ja tekijän täytyy olla erittäin perehtynyt tiedonlouhintaan, louhittavaan dataan sekä datan taustalla oleviin ilmiöihin. GUHA-tiedonlouhinnan tuloksena datasta saadaan selville yhteyksiä, joita on vaikea ihmisvoimin havaita.

Tiedonlouhinta ei ole automaatti, johon voidaan syöttää dataa ja tulokseksi saadaan ratkaisut kaikkiin dataan liittyviin ongelmiin. Tiedonlouhinnan voisi mieltää enemmän mikroskooppina, jonka avulla voidaan tarkastella datassa esiintyviä mielenkiintoisia yhteyksiä, joita ei voi paljaalla silmällä havaita. Ja kuten mikroskooppikin, tiedonlouhinta tulee kohdistaa ja tarkentaa oikein, jotta nähdään jotakin mielenkiintoista.

Tiedonlouhinnan perusteella tietyillä tekijöillä on havaittu olevan vahvempi yhteys suureen geometrian heikkenemiseen kuin toisilla. Kaikilla tekijöillä on kuitenkin jokin yhteys kaiken suuruiseen geometrian heikkenemiseen eri tilanteissa. Yleisluonteinen tulos tiedonlouhinnasta on se, ettei yksi haitallinen tekijä saa muuten hyvää rakennetta huonoksi, eikä yksi hyvä tekijä saa muuten huonoa rakennetta hyväksi.

Tyypillisesti geometrian heikkeneminen on hidasta kuivilla ja paksuilla rakenteilla sekä tunneleissa. Suurta geometrian heikkenemistä on yleisimmin epäjatkuvuuskohdissa sekä ohuilla ja kosteilla maarakenteilla. Epäjatkuvuuskohdissa taipuman varianssi ja rakenteen

kosteus ovat tyypillisesti suuria. Yhteydet tiettyjen tekijöiden välillä ovat riippuvaisia muista tekijöistä rakenteessa. Näitä muista tekijöistä riippuvaisia yhteyksiä on havainnollistettu kuvassa 54.



Kuva 54. Tiedonlouhinnan perusteella rakenteiden suoriutumiseen vaikuttavia tekijöitä.

Kuvan 54 tarkoituksena on esittää valkoisella pohjalla olevien tekijöiden käyttäytymistä muiden tekijöiden vaikutuksesta. Punaisella pohjalla on niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat negatiivisesti, eli lisäävät suuren geometrian heikkenemisen osuutta. Vihreällä pohjalla taas on niitä tekijöitä, jotka lisäävät vähäisen geometrian heikkenemisen osuutta. Mitä enemmän tekijöitä toisesta laidasta rakenteessa on, sitä yleisimmin se käyttäytyy niiden vaikutusten mukaisesti. Esimerkiksi ohuilla maarakenteilla geometrian heikkeneminen on tyypillisesti suurta, kun rakenne on kostea, taipuma suurta, kunnossapitotoimia tehdään usein ja rakenne on perustettu maalle. Geometrian heikkeneminen voi kuitenkin ohuellakin rakenteella olla vähäistä, mikäli rakenne on kuiva, taipuma on vähäistä ja rakenne sijaitsee kallioleikkauksella tai maaleikkauksella.

Jotkin tekijät voivat erilaisissa olosuhteissa vaikuttaa sekä suureen että vähäiseen geometrian heikkenemisnopeuteen. Esimerkiksi Karjaa–Ervelä-välillä routalevykohteissa geometrian heikkeneminen on ollut pääasiassa suurta, kun maarakenteet ovat ohuet. Kuitenkin Kouvola–Kotka-rataosalla geometrian heikkeneminen on vähäistä ohuilla rakenteilla, joilla on routalevy. Näissä paikoissa eroja tutkimuskohteiden välillä oli muun muassa rakenteen kosteudessa.

Tiedonlouhinnan avulla saatiin selville yhteyksiä maarakenteiden ja radan kuormituskestävyyden välillä. Osa yhteyksistä oli havaittu jo ennen tiedonlouhintaa. Osa yhteyksistä taas ei voitu datan tai muun saatavilla olevan tiedon perusteella selittää. Näitä yhteyksiä tulisikin tarkastella tarkemmin muiden tutkimusten kautta.

Aiemmin havaittuja yhteyksiä, jotka tulivat erityisen vahvasti ilmi tiedonlouhinnassa, olivat Karjaa–Ervelä-välin uuden tukikerroksen jälkihoidon ongelmat sekä epäjatkuvuuskohtien ongelmat. Yhteyksiä, joita tiedonlouhinnan perusteella tulisi tutkia tarkemmin, ovat:

- kosteuden vaikutus ohuisiin rakenteisiin maaperustuksella
- paksujen rakenteiden huono suoriutuminen, kun niissä on maatutkamittausten perusteella tulkittu olevan routalevy
- kallioleikkaukset, joissa on ohut ja mahdollisesti kostea alusrakenne
- epäjatkuvuuskohtien suurien kosteuden arvojen syiden tutkiminen.

Tiedonlouhinnalla pystyttiin osoittamaan radan mittauksista tuotetusta datasta löytyvän yllä mainittuja yhteyksiä. Näiden ilmiöiden selittäminen kuuluu tehdä maarakenteiden ja rautatietekniikan teorioihin perustuen. GUHA-tiedonlouhinnan tarkoituksena oli osoittaa mielenkiintoisia yhteyksiä datan sisällä ja antaa suuntaa jatkotutkimuksille. Tämän perusteella GUHA-tiedonlouhintaa on onnistuttu soveltamaan rautateistä saatavaan dataan varsin hyvin.

LÄHTEET

Alameri, M. (1979). Suomen rautatiet, Verlag Josef Otto Slezak, s. 9–29.

Andrade, A.R. & Teixeira, P.F. (2015). Statistical modelling of railway track geometry degradation using Hierarchical Bayesian models, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 142, s. 169–183.

Brecciaroli, F. & Kolisoja, P. (2006). Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading: Literature review, Ratahallintokeskus, Helsinki, s. 21–27.

Bruttotonnit rataosittain vuonna 2016, Liikennevirasto, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.3.2018): https://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/23852/Bruttotonnit+rataosittain+2016_190917.pdf/595e9962-0700-4421-be7a-e1aa3b9e80f2.

Dahlberg, T. (2001). Some railroad settlement models—A critical review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 215(4), s. 289–300. Saatavissa: <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1243/0954409011531585>.

Ehrola, E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet, 1st ed. Rakennustieto Oy, Tampere, s. 171–173.

Esveld, C. (2001). *Modern railway track*, 2nd ed. MRT-Prod, Zaltbommel, 654 s.

Guler, H., Jovanovic, S. & Evren, G. (2011). Modelling railway track geometry deterioration, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, Vol. 164(2), s. 65–75. Saatavissa: <https://search.proquest.com/docview/906851622>.

Hakulinen, M. (2017). Luentomateriaali 15.3.2018: Dynamic ground interaction of Pendolino-trains on soft soil. Tampereen teknillinen yliopisto, 36 s.

Han, J., Pei, J. & Kamber, M. (2011). *Data Mining: Concepts and Techniques*, ProQuest Ebook Central, s. 5–8.

Hájek, P. & Havránek, T. (1978). *Mechanizing Hypothesis Formation: Mathematical Foundations for a General Theory*, 1st ed. Springer, Berlin/Heidelberg, 321 s.

InfraRYL (2010). *Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset*. Infra 03-10001, Rakennustieto Oy, 555 s.

Järvenpää, M. & Turunen, E. (2012). Suomessa 2004-2008 sattuneiden tieliikenneonnettomuuksien analysointia GUHA-tiedonlouhintamenetelmällä, Tampereen teknillinen yliopisto, 32 s. Saatavilla: [https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/suomessa-20042008-sattuneiden-tieliikenneonnettomuuksien-analysointia-guhatiedonlouhintamenetelmalla\(36e341ec-55f7-4ff4-8df2-01c68aa2d57c\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/suomessa-20042008-sattuneiden-tieliikenneonnettomuuksien-analysointia-guhatiedonlouhintamenetelmalla(36e341ec-55f7-4ff4-8df2-01c68aa2d57c).html).

Kalliainen, A. & Kolisoja, P. (2013). Ratapenkereen leveys ja luiskakaltevuus: Loppuraportti. 33/2013, Liikennevirasto, s. 24–79. Saatavissa: [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/ratapenkereen-leveys-ja-luiskakaltevuus--loppuraportti\(b62f1ee4-3784-4433-bf59-e3816daf3f63\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/ratapenkereen-leveys-ja-luiskakaltevuus--loppuraportti(b62f1ee4-3784-4433-bf59-e3816daf3f63).html).

Kalliainen, A., Kolisoja, P. & Nurmikolu, A. (2014). Radan 3D-rakennemalli ja ratarakenteen kuormituskestävyys. 55/2014, Liikennevirasto, 174 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2014-55_radan_3d-rakennemalli_web.pdf.

Kauppinen, M. (2011). Ratakiskon elinkaari. 01/2011, Liikennevirasto, 113 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts_2011-01_ratakiskon_elinkaari_web.pdf.

Korkeamäki, S. (2011). Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa. 4/2011, Liikennevirasto, Helsinki, 93 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts_2011-04_rataan_kohdistuva_web.pdf.

Li, D. (2000). Deformations and Remedies for Soft Railroad Subgrades Subjected to Heavy Axle Loads, *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics*, s. 307–321.

Li, D., Hyslip, J., Sussman, T. & Chrismer, S. (2016). *Railway Geotechnics*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Fla. [u.a.], 574 s.

Li, D. & Selig, E. (1995). Evaluation of Railway Subgrade Problems, *Transportation Research Record*, (1489), s. 17–23. Saatavissa: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1489/1489-003.pdf>.

Lichtberger, B. (2011). *Track Compendium*, 2nd ed. DW Media Group GmbH | Eurailpress, Hamburg, 621 s.

Liikennevirasto (2018a). (Kouvola)-Kotka, (Juurikorpi)-(Hamina) Vaihde- ja opastinturvalaitos käyttöohje. 0400 109 E 20503 N, Liikennevirasto, Ratatiedon extranet, Saatavissa: https://rhk-fi.directo.fi/tietopalvelu/rhk_n_extranet/.

Liikennevirasto (2017). Karjaa-(Turku) Kauko-ohjaus käyttöohje. 0400 109 E 20277 M, Liikennevirasto, Ratatiedon extranet, Saatavissa: https://rhk-fi.directo.fi/tietopalvelu/rhk_n_extranet/.

Liikennevirasto (2015). Kotkan ja Haminan liikennepaikkojen liikennöitävyys selvitys. 6/2015, Helsinki, 35 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/ls_2015-06_kotkan_haminan_web.pdf.

Liikennevirasto (2004). Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 13 Radan tarkastus. 1953/731/2004, Liikennevirasto, 51 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rato_13_radan_tarkastus.pdf.

Liikennevirasto (2002). Ratatekniset määräykset ja ohjeet osa 11 Radan päällysrakenne. 927/731/02, Liikennevirasto, 87 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rato_11_radan_paallysrakenne.pdf.

Liikennevirasto (2000). Ratatekniset määräykset ja ohjeet RAMO osa 15 Radan kunnossapito. 1693/731/00, Liikennevirasto, 63 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rato_15_radan_kunnossapito.pdf.

Liikennevirasto (1998). Ratatekniset määräykset ja ohjeet RAMO osa 19 Jatkuvakiskoraiteet ja -vaihteet. 1065/731/98, Liikennevirasto, 34 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rato_19_jatkuvakiskoraiteet_vaihteet.pdf.

Liikennevirasto (2010). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2 Radan geometria. 3/2010, Liikennevirasto, 73 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2010-03_rato_2_radan_geometria_web.pdf.

Liikennevirasto (2014). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 10 Junien kulunvalvonta JKV. 8/2014, Liikennevirasto, 107 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2014-08_rato10_web.pdf.

Liikennevirasto (2018b). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3 Radan rakenne. 13/2018, Liikennevirasto, 39 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2018-13_rato3_web.pdf.

Liikennevirasto (2012). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 4 Vaihteet. 22/2012, Liikennevirasto, 47 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2012-22_rato_4_web.pdf.

Liikennevirasto (2016). Rautateiden verkkoselostus 2018. 2/2016, Liikennevirasto, 65 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lv_2016-02_rautateiden_verkkoselostus_2018_web.pdf.

Liikennevirasto (2013). Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. 5/2013, Liikennevirasto, 114 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2013-05_teiden_ja_ratojen_web.pdf.

- Loukkalahti, A. (2010). Radan kallioleikkauksen kuivatuksen parantaminen. 26/2010, Liikennevirasto, Helsinki, 57 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts_2010-26_radan_kallioleikkauksen_web.pdf.
- Lundqvist, A. & Dahlberg, T. (2005). Load impact on railway track due to unsupported sleepers, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 219(2), s. 67–77. <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1243/095440905X8790>.
- Luomala, H., Peltokangas, O., Rantala, T. & Nurmikolu, A. (2015). Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi, Liikennevirasto, 108 s.
- Luomala, H., Rantala, T., Kolisoja, P. & Mäkelä, E. (2017). Assessment of track quality using continuous track stiffness measurements, s. 281–290.
- Malassu, E. (2016). Esiselvitys radan kuormituskestävyysmitoituksen kehittämisestä, Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö, Tampere, s. 80–86. Saatavissa: <http://dSPACE.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/24328>
- Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2010). Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raideseppelin ominaisuuksiin. 11/2010, Edit Prima Oy, Helsinki, 64 s. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121528/lts_2010-11_978-952-255-525-0.pdf?sequence=1.
- Nuutinen, P. (2018). Ratahankkeet tilannekatsaus. RATA 2018 Seminaariesitys, Liikennevirasto, s. 18. Saatavissa: https://www.liikennevirasto.fi/documents/20485/417835/Ratahankkeet+tilannekatsaus_p%C3%A4ivitetty.pdf/f1db2bb7-f156-4ca7-bc54-717af4154a82.
- Peltokangas, O., Luomala, H. & Nurmikolu, A. (2013). Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. 6/2013, Liikennevirasto, 190 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts_2013-06_radan_pystysuuntainen_web.pdf.
- Peltokangas, O. & Nurmikolu, A. (2015). Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja tukemiskalusto Suomen rataverkolla. 23/2015, Liikennevirasto, Helsinki, 132 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-23_raidegeometrian_kunnossapito_web.pdf.
- Pylkkäinen, K. & Nurmikolu, A. (2015). Routa ja routiminen ratarakenteessa. 22/2015, Liikennevirasto, 210 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-22_routa_routiminen_web.pdf.
- Ratahallintokeskus (2005a). Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet. B15, Ratahallintokeskus, Helsinki, 27 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rhk_b15_radan_stabiliteetin_laskenta.pdf.

Ratahallintokeskus (2005b). Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. 2005-01, Ratahallintokeskus, 22 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rhk_radantarkastusohjeita_raiteentarkastustulokset.pdf.

Ratahallintokeskus (2008). Rantaradan Helsinki-Turku Ratatekninen ja liikenteellinen selvitys. Liikennevirasto, 96 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rhk_2008_rantaradan_helsinki-turku_ratatekninen_web.pdf.

Rataverkko, Liikennevirasto, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.11.2017): <https://www.liikennevirasto.fi/rataverkko#.WhVusWcUmgZ>.

Saarenketo, T. (2016). Experiences of integrated GPR and Laser Scanner analysis – We should not only look down but also around, Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting, s. 1273–1278 http://www.ngm2016.com/uploads/2/1/7/9/21790806/138-151-ngm_2016_-_experiences_of_integrated_gpr_and_laser_scanner_analysis_saarenketo.pdf.

Sato, Y. (1995). Japanese Studies on Deterioration of Ballasted Track, Vehicle System Dynamics, Vol. 24(sup1), s. 197–208.

SFS EN 13848-1 - A1 (2008). Kiskoliikenne. Rata. Ratageometrian laatu. Osa 1: Ratageometrian kuvaus, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 25 s.

SFS EN 1991-2 (2004). Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat, Suomen Standardisoimisliitto, SFS, 143 s.

SFS-EN 13450 + AC (2003). Raidesepeleliviainekset, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 31 s.

SFS-EN 13848-2 (2006). Kiskoliikenne. Rata. Ratageometrian laatu. Osa 2: Mittausjärjestelmät. Radantarkastusajoneuvot, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 35 s.

SFS-EN 13848-5 (2017). Kiskoliikenne. Rata. Ratageometrian laatu. Osa 5: Geometriasuureiden virherajat. Ratalinja, vaihteet ja risteykset, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 22 s.

SFS-EN 13848-6 (2014). Railway applications. Track. Track geometry quality. Part 6: Characterisation of track geometry quality, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 28 s.

Shenton, M.J. (1985). Ballast deformation and track deterioration, Track technology, Thomas Telford LTD, Lontoo, s. 253–265.

Silvast, M. & Nurmikolu, A. (2015). Maatutkamenetelmän soveltaminen ratarakenteen kunnossapito- ja parantamissuunnittelussa. 21/2015, Liikennevirasto, Helsinki, 99 s.

Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-21_maatutkamenetel-man_soveltaminen_web.pdf.

Simunek, M. & Rauch, J. LISp-Miner -ohjelmisto. Saatavissa: <https://lispminer.vse.cz/>.

Tammirinne, M. (2002). Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus. 7/2002, Oy Edita Ab, Helsinki, 204 s. Saatavissa: <https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf/3200741.pdf>.

Tiehallinto (2003). Tien perustamistavan valinta. 481/2002/20/7, Tiehallinto, Helsinki, 51 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/pdf/2100019-03tien_perustamistavan_valinta.pdf.

Tilastojen ABC, Tilastokeskus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.1.2018): http://tilastokoulu.stat.fi/verkkokoulu_v2.xql?page_type=sisalto&course_id=tkoulu_tlkt&lesson_id=4&subject_id=5.

Turunen, E. (2010a). Luentomateriaali: Data mining with GUHA – Part 2 GUHA produces hypothesis. Tampere University of Technology, 15 s. Saatavissa: <http://math.tut.fi/~eturunen/AppliedLogics2008.html>.

Turunen, E. (2010b). Luentomateriaali: Data mining with GUHA – Part 3 GUHA is a logic approach to data mining, 21 s. Saatavissa: <http://math.tut.fi/~eturunen/AppliedLogics2008.html>.

Vale, C. & Lurdes, S.M. (2013). Stochastic model for the geometrical rail track degradation process in the Portuguese railway Northern Line, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 116 s. 91–98.

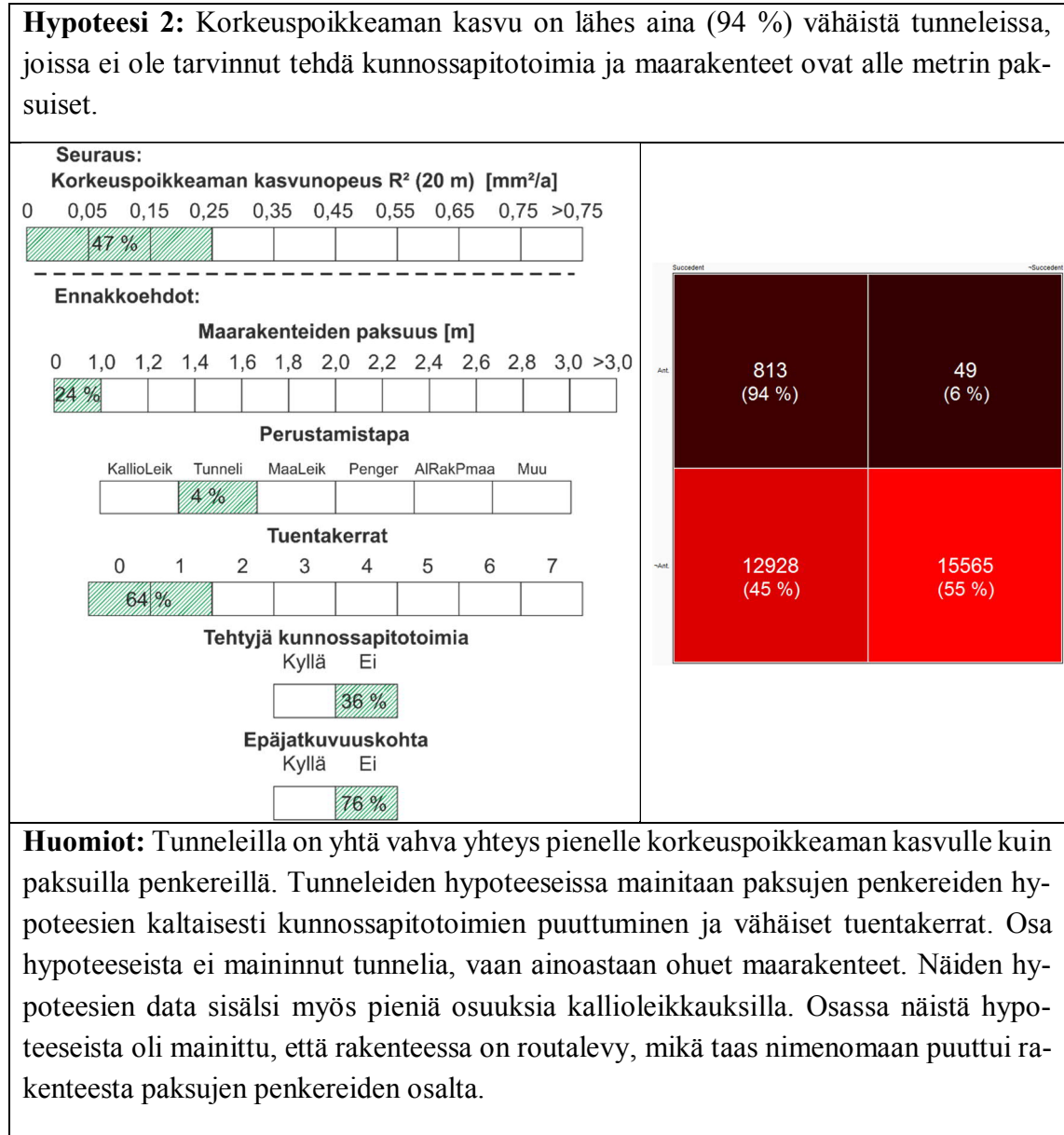
Vinter, J. (2015). Eristekerroksen materiaalin vaikutus maanvaraisen ratapenkereen toimivuuteen. 30/2015, Liikennevirasto, 98 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-30_eristyskerroksen_materiaalin_web.pdf.

Vorster, J. & Gräbe, H. (2013). The use of ground-penetrating radar to develop a track substructure characterisation model, Journal of the South African institution of civil engineering, Vol. 55(3), s. 69–78. Saatavissa: <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaice/v55n3/08.pdf>.

Wang, P., Wang, L., Chen, R., Xu, J., Xu, J. & Gao, M. (2016). Overview and outlook on railway track stiffness measurement, 现代交通学报 : 英文版, 2016, Volume 24, Issue 2, Vol. 24(2), s. 89–102. Saatavissa: <http://lib.cqvip.com/qk/85396A/201602/668858469.html>.

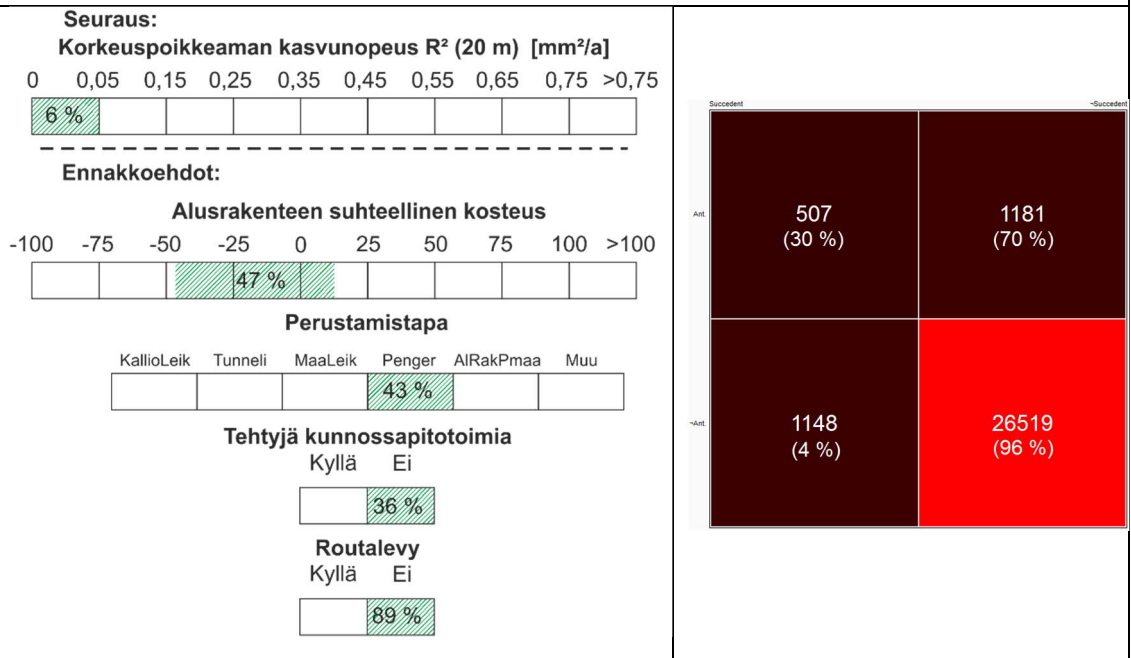
LIITE A: TIEDONLOUHINNAN TUOTTAMIA HYPOTEESEJA KARJAA-ERVELÄ-VÄLILTÄ

Taulukko 6. Kr-Erv hypoteesi 2 kysymykseen 1.



Taulukko 7. Kr-Erv hypoteesi 3 kysymykseen 1.

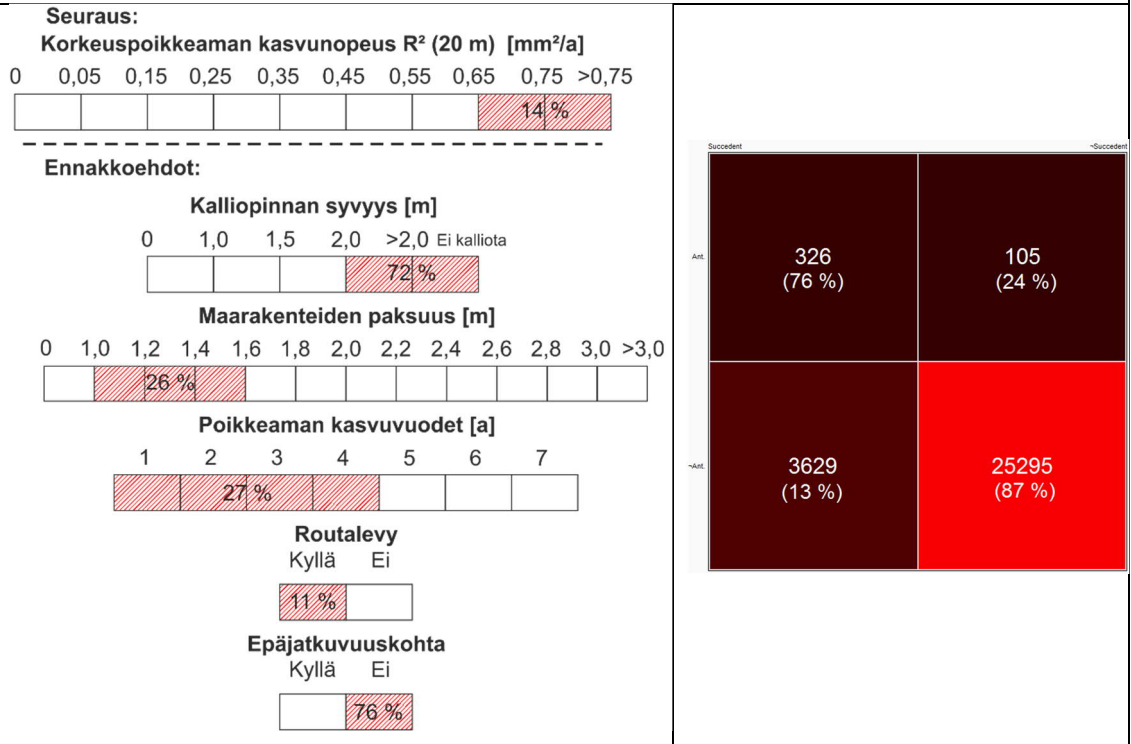
Hypoteesi 3: Pienestä alusrakennekosteudesta penkereellä, jolla ei ole routalevyä tai tehtyjä kunnossapitotoimia, seuraa erittäin vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua yli neljä kertaa yleisemmin kuin koko rataosuudella yleensä.



Huomiot: Hypoteesin tuloksen yhteys ei ole niin vahva kuin aiemmissa hypoteeseissa, mutta suhteessa siihen, kuinka paljon yleisesti rataa johtaa erittäin pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun, tulos on merkittävän erilainen. Ennakkoehtojen mukaisesta radasta 30 % (507 m) johtaa erittäin vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun taas vastaava luku muilla rakenteilla on 4 % (1 148 m). Kun verrataan erittäin vähäisen korkeuspoikkeaman määrää (1 655 m) hypoteesia tukevan radan määrään (507 m), huomataan, että merkittävä osa (31 %) erittäin vähäisestä korkeuspoikkeaman kasvusta johtuu juurikin ennakkoehtojen mukaisesta radasta.

Taulukko 8. Kr-Erv hypoteesi 4 kysymykseen 2.

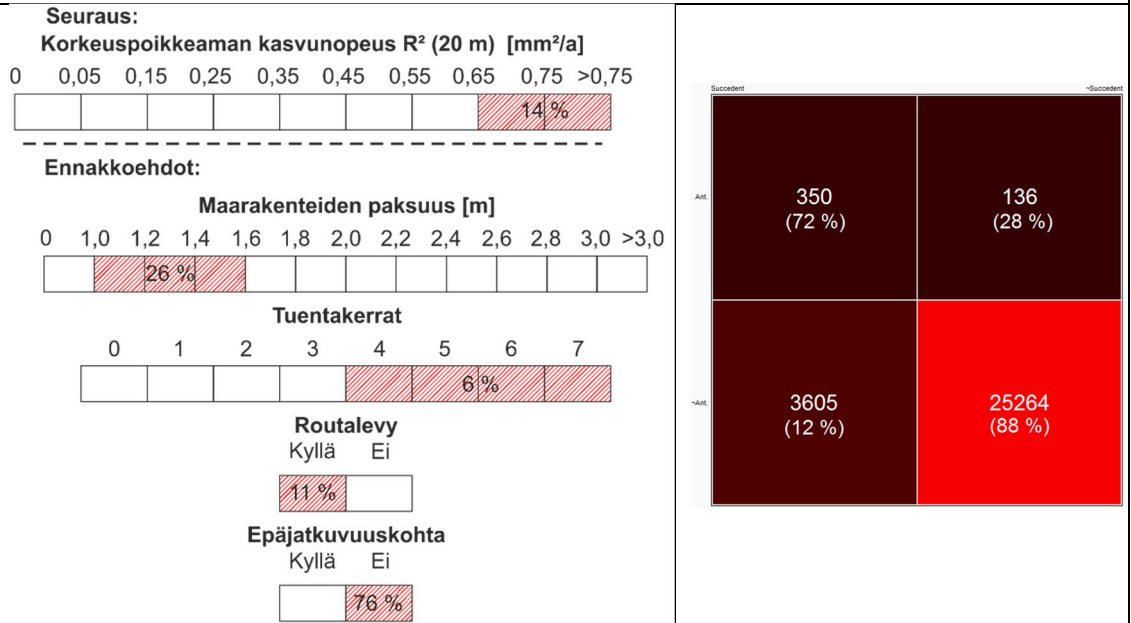
Hypoteesi 4: Korkeuspoikkeaman kasvu yleensä on suurta, kun maalle perustetun radan rakenteet ovat erittäin ohuet (1–1,6 m), rakenteessa on routalevy, rakenne ei ole epäjatkuuskohdan alueella ja korkeuspoikkeaman kasvuvuosien lukumäärä on alle 4.



Huomiot: Kalliopinta on erittäin syvällä, joten voidaan olettaa rakenteiden olevan maaperustuksella, vaikka maarakenteiden paksuus on pieni. Tämä tarkoittaa sitä, että ratarakenteen ja pohjamaan välissä on hyvin vähän rakenteita. Kun tarkastellaan hypoteesin taustalla olevaa dataa, se on peräisin Pohjankurun vaihteen V002 kohdalta ja kilometripaalu 98 ympäröivältä peltokohteelta, jossa alusrakenne on suoraan pohjamaan päällä. Vähäiset poikkeaman kasvuvuodet viittaavat siihen, että geometriaa on parannettu useaan otteeseen tarkastelujakson aikana.

Taulukko 9. Kr-Erv hypoteesi 5 kysymykseen 2.

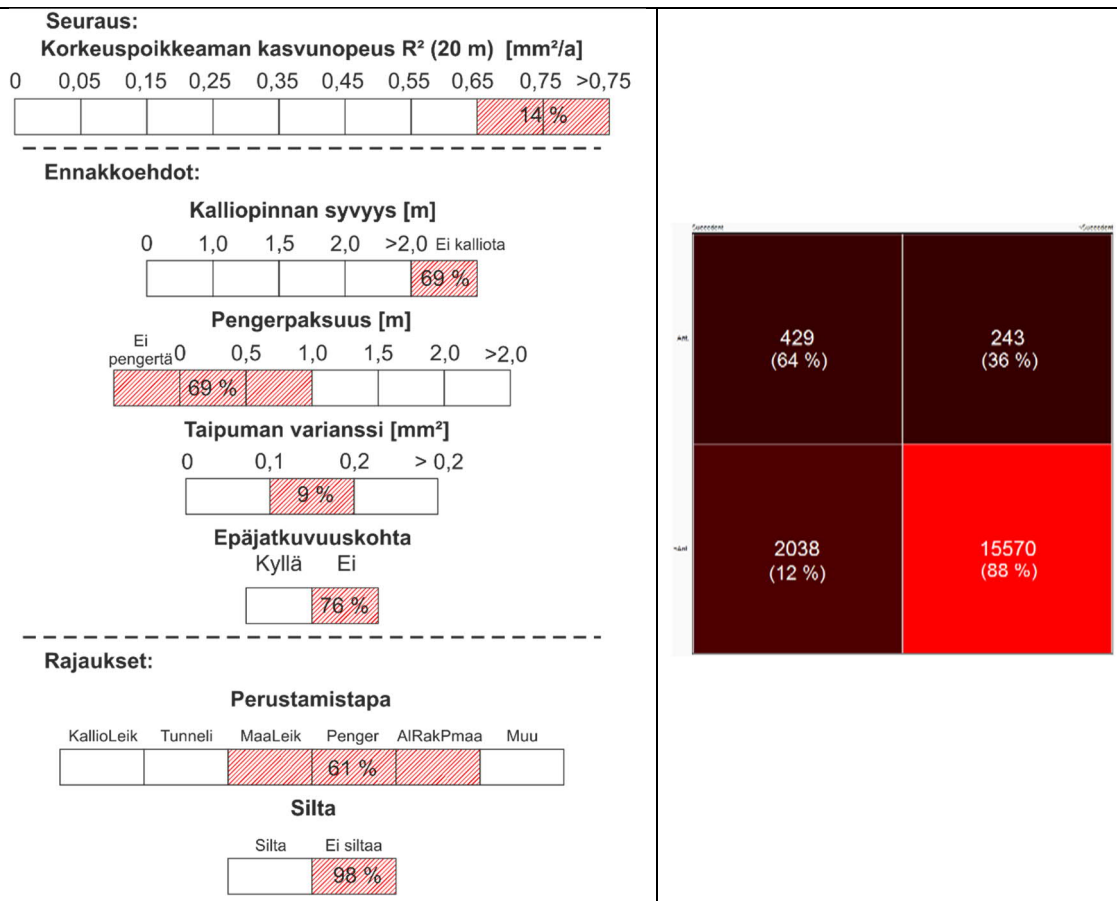
Hypoteesi 5: Korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä suurta, kun radan rakennekerrokset ovat ohuet (1–1,6 m), rakenteessa on routalevy, rakenne ei ole epäjatkuvuuskohtan alueella ja kunnossapitohistorian mukaan tuentakerran on tehty useammin kuin 4 kertaa 7 vuoden aikana.



Huomiot: Tämä hypoteesi kertoo varsin samasta ilmiöstä kuin hypoteesi 4. Datan tarkastelun perusteella, hypoteeseja 4 ja 5 tukeva data on peräisin täysin samoista paikoista. Kyseessä ovat siis rinnakkaiset hypoteesit. Tässä hypoteesissa tuentakerrat ovat tekijänä poikkeaman kasvuvuosien sijaan.

Taulukko 10. Kr-Erv hypoteesi 6 kysymykseen 2.

Hypoteesi 6: Maaperustuksella korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä suurta, kun pengerrin on alle metrin paksuinen, kyseessä ei ole epäjatkuvuuskohta, mutta taipuman varianssi on koholla.

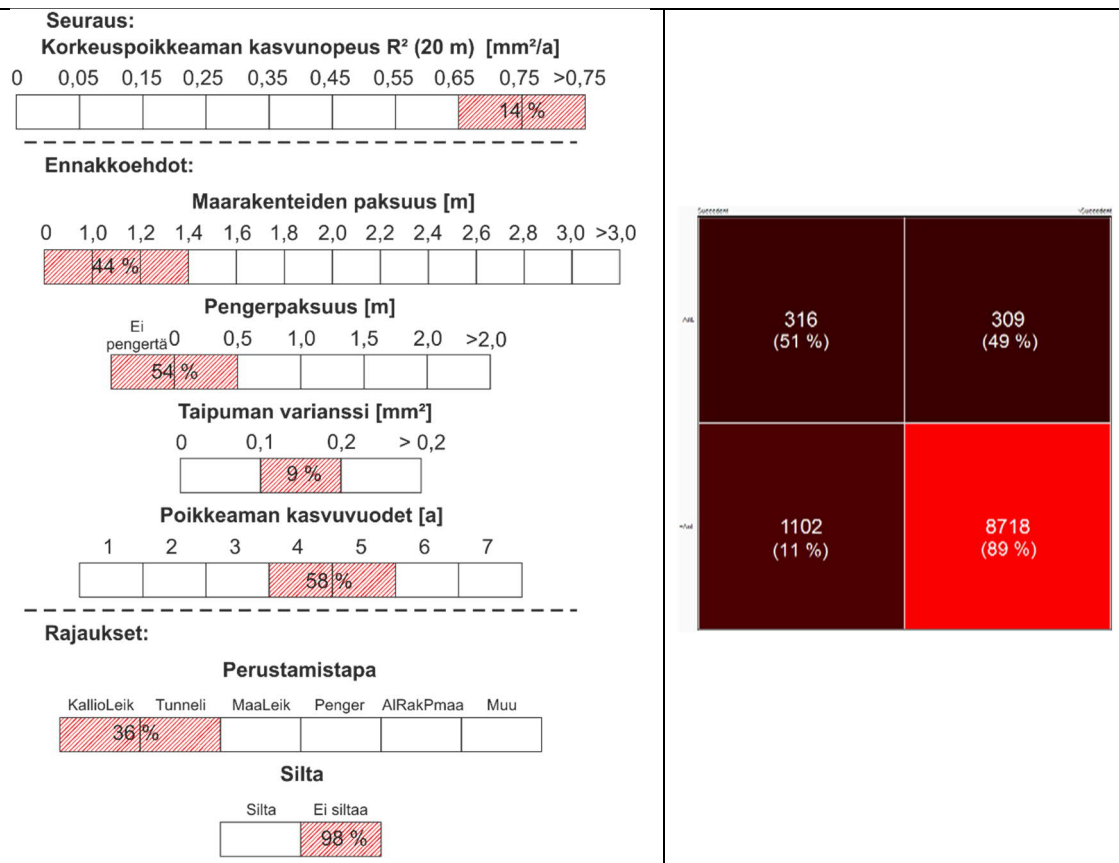


Huomiot: Rata on perustettu maaperustukselle ja pengerpaksuus on pieni, joten voidaan päätellä maarakenteiden kokonaispaksuuden olevan pieni, koska alusrakenne on tyypillisesti alle metrin paksua.

Kun ohuilla rakenteilla maaperustuksella taipuman varianssi on suurta, korkeuspoikkeaman kasvu on myös suurta. Tämä on huomionarvoista siksi, ettei kyseessä ole epäjatkuvuuskohta, vaan homogeeninen osa rataa ja myös siksi, että taipuman suuri varianssi on melko harvinaista.

Taulukko 11. Kr-Erv hypoteesi 7 kysymykseen 2.

Hypoteesi 7: Kalliolle perustetulla radalla korkeuspoikkeaman kasvunopeus yleensä on suurta, kun radassa on alle 1,4 m paksuiset maarakenteet, jotka sisältävät alle 0,5 m pengertä, taipuman varianssi on koholla ja korkeuspoikkeaman kasvuvuosien määrä on 4–5.

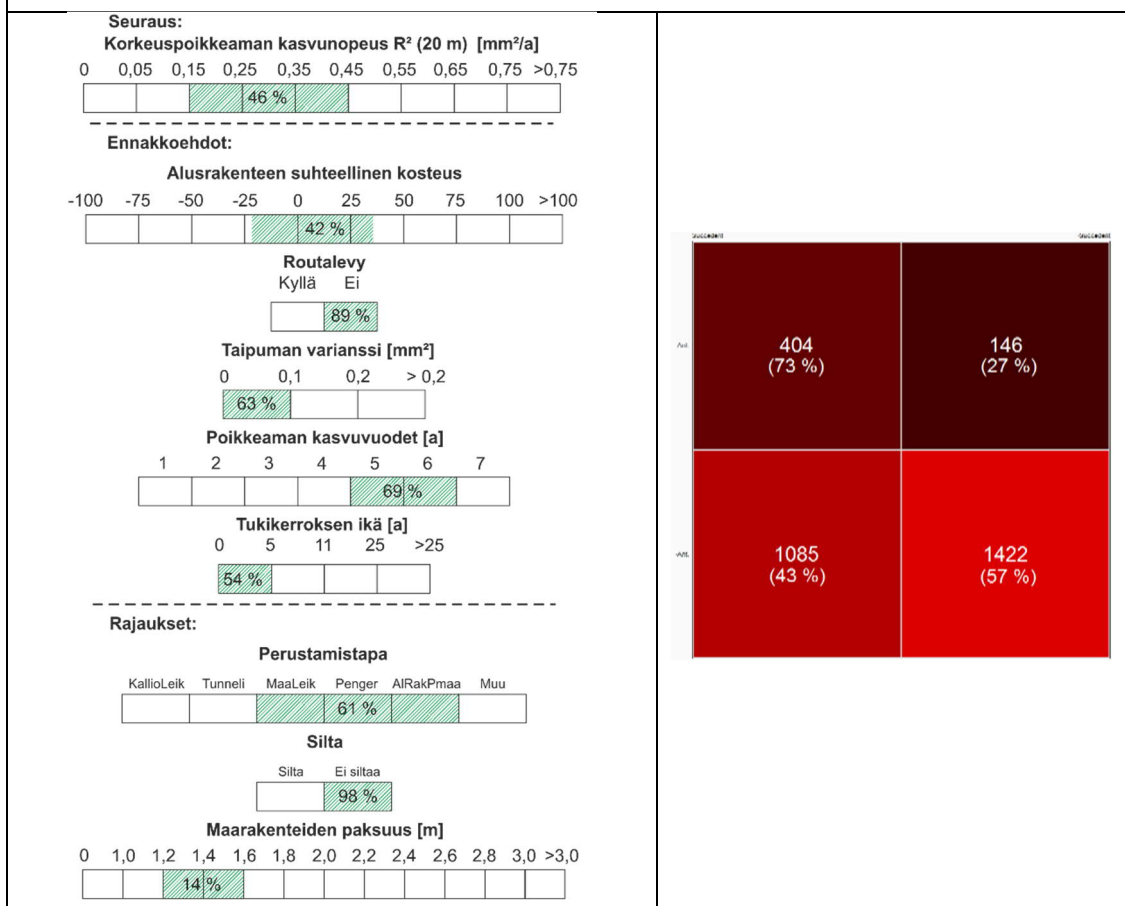


	Suhteena	Suhteena
+/+	316 (51 %)	309 (49 %)
-/+	1102 (11 %)	8718 (89 %)

Huomiot: Kallioperustuksella olevalla radalla hypoteesi on hyvin lähellä maaperustuksella olevan radan hypoteesia. Poikkeuksellisen suuret taipuman varianssin arvot ovat jälleen läsnä, jolloin suuren korkeuspoikkeaman kasvun ja suuren taipuman varianssin yhteys on jälleen vahva. Vertaamalla hypoteeseja 6 ja 7 huomataan, että suuri korkeuspoikkeaman kasvu on yhtä yleistä maaperustuksilla kuin kallioperustuksilla.

Taulukko 12. Kr-Erv hypoteesi 8 kysymykseen 3.

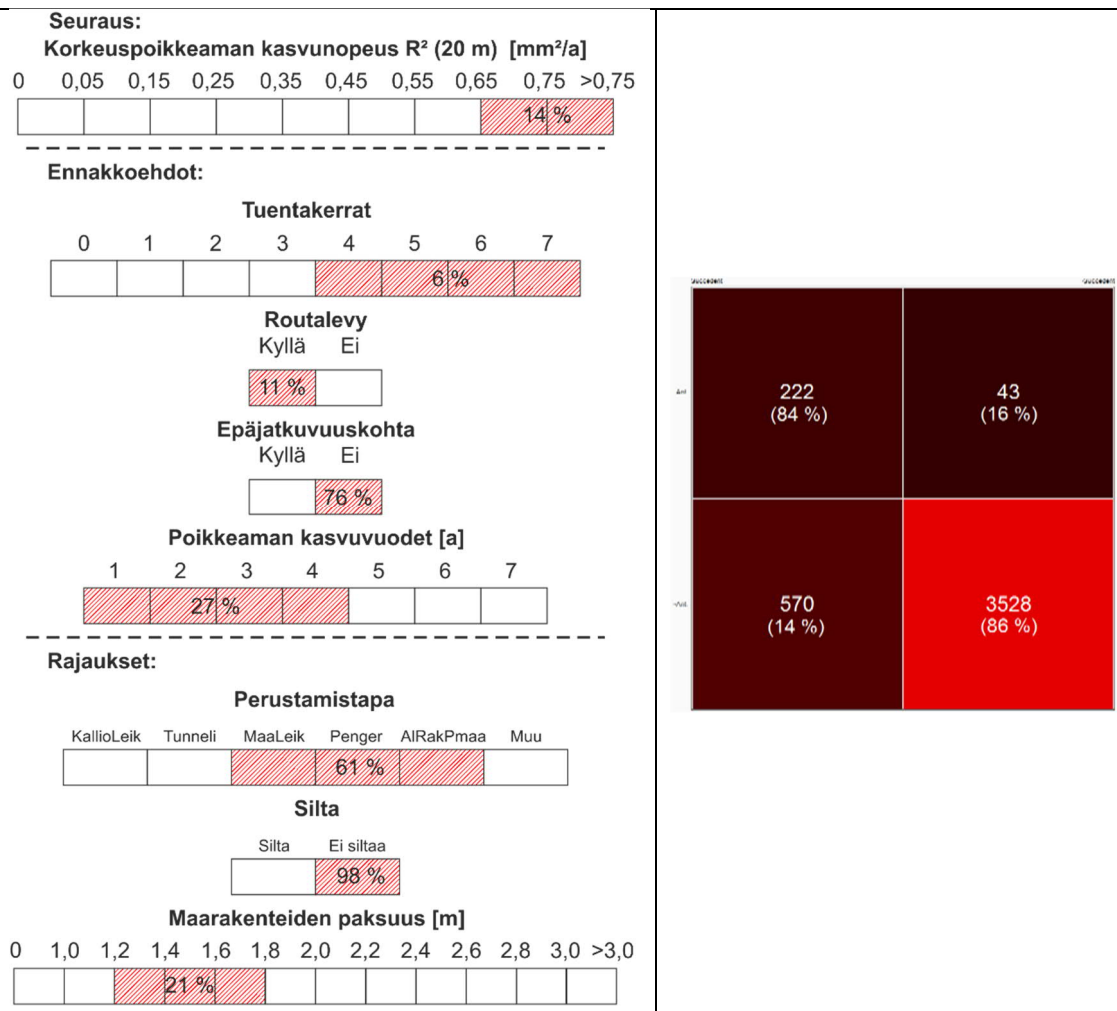
Hypoteesi 8: Ohuilla maalle perustetuilla rakenteilla (1,2–1,6 m) keskiarvoiseen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 73 % sellaisista rakenteista, joissa alusrakenne on keskiarvoisen kuiva, rakenteessa ei ole routalevyä, taipuman varianssi on vähäistä, tukikerros on alle 5 vuotta vanhaa ja korkeuspoikkeaman kasvuvuotia on 5–6. Muualla ohuilla rakenteilla samaan korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 43 % rakenteista.



Huomiot: Hypoteesin tuloksien perusteella ohuella rakenteella keskiarvoiseen korkeuspoikkeaman kasvuun päästään sellaisella rakenteella, joka toimii ilman routalevyä ja on keskiarvoisen kuiva. Tällöin joko kuivatus on todennäköisesti hoidettu hyvin tai pohjamaa on hyvin vettä läpäisevää.

Taulukko 13. Kr-Erv hypoteesi 9 kysymykseen 3.

Hypoteesi 9: Korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä suurta sellaisilla 1,2–1,8 m paksuisilla rakenteilla, joissa on routalevy, tuentoja on tehty yli 4 kertaa 7 vuoden tarkastelujakson aikana, korkeuspoikkeama on kasvanut enintään 4 kertaa 7 vuoden tarkastelujakson aikana ja rakenne ei ole epäjatkuvuuskohdassa.

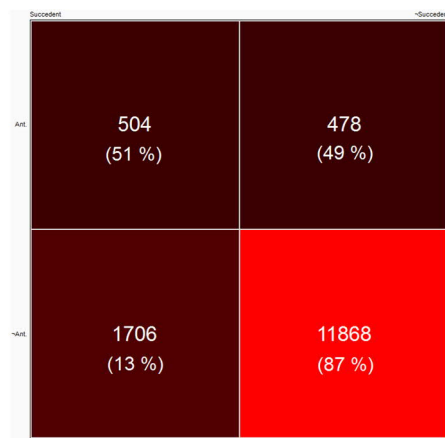
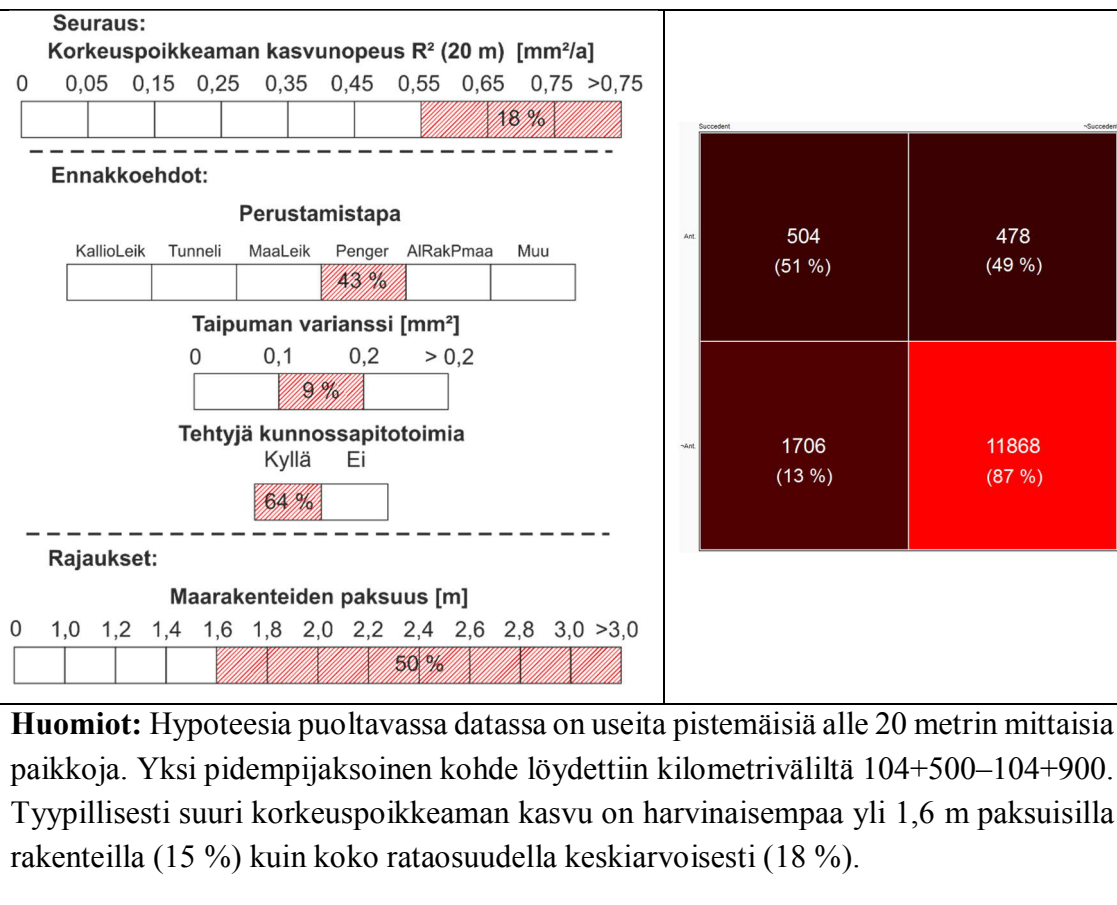


	222 (84 %)	43 (16 %)
	570 (14 %)	3528 (86 %)

Huomiot: Useat tuennat ja routalevy jälleen muuttavat edellisen hypoteesin tulosta siten, että korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti suurta.

Taulukko 14. Kr-Erv hypoteesi 10 kysymykseen 3.

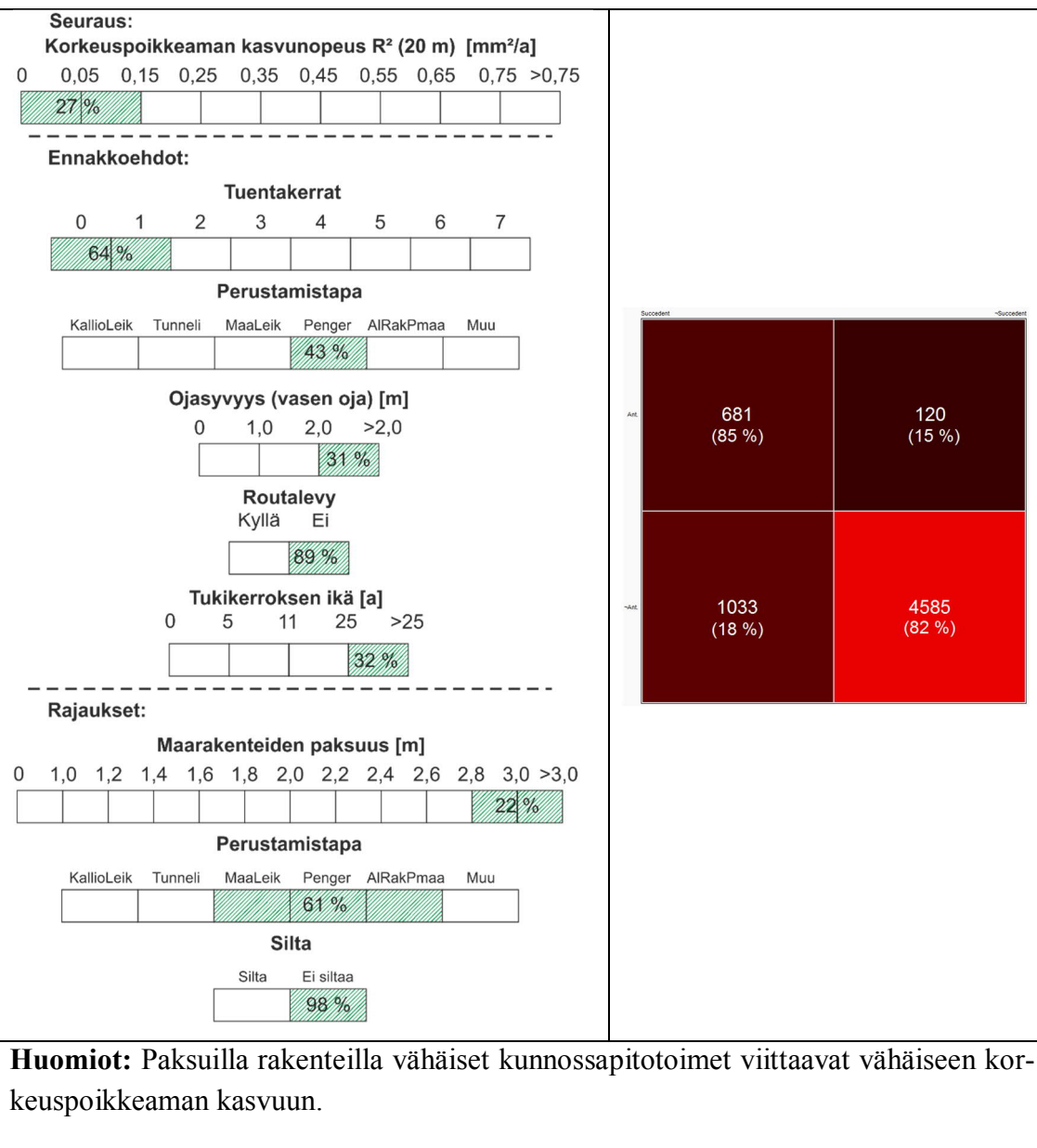
Hypoteesi 10: Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 51 %:lla yli 1,8 m paksuisista penkereelle perustetuista rakenteista, joilla on tehty kunnossapitotoimia ja taipuman varianssi on suurta.



Huomiot: Hypoteesia puoltavassa datassa on useita pistemäisiä alle 20 metrin mittaisia paikkoja. Yksi pidempijaksoinen kohde löydettiin kilometriväliltä 104+500–104+900. Tyypillisesti suuri korkeuspoikkeaman kasvu on harvinaisempaa yli 1,6 m paksuisilla rakenteilla (15 %) kuin koko rataosuudella keskiarvoisesti (18 %).

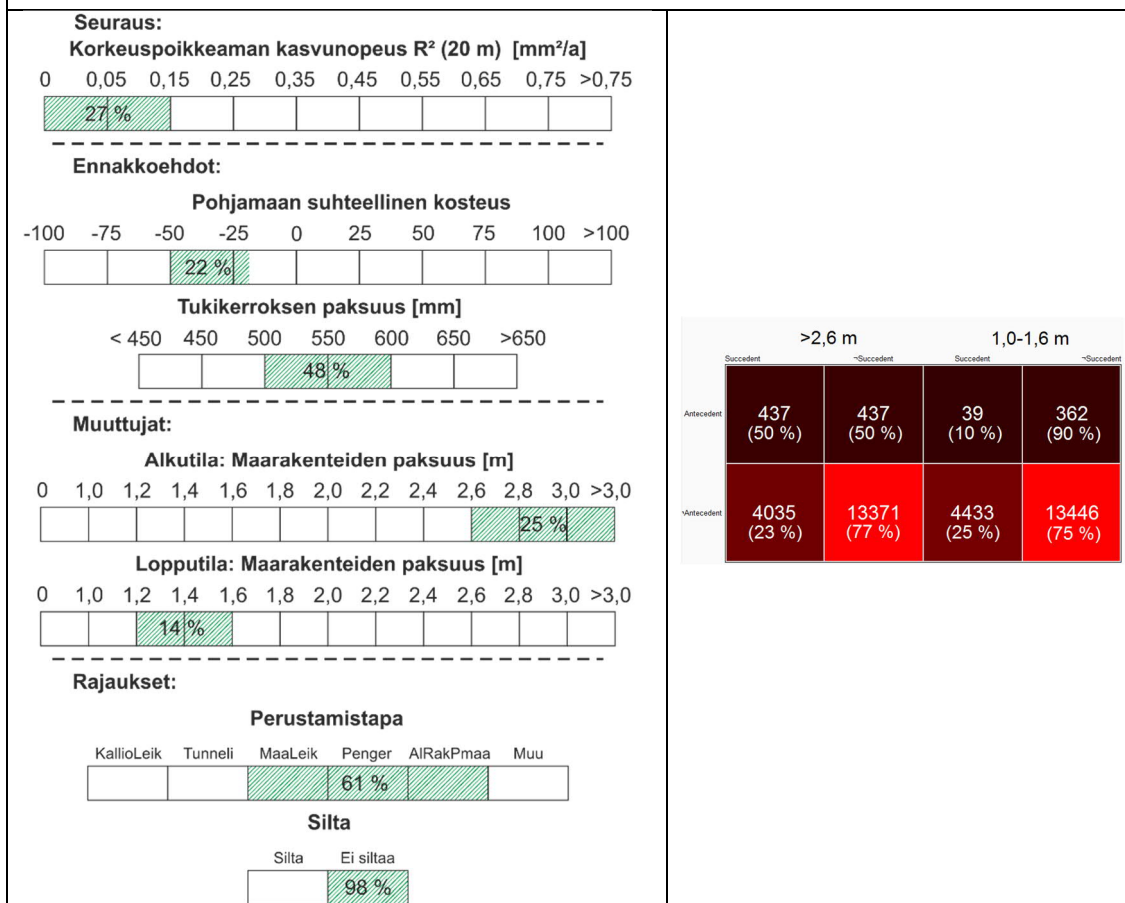
Taulukko 15. Kr-Erv hypoteesi 11 kysymykseen 3.

Hypoteesi 11: Erittäin paksuilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä erittäin vähäistä, kun ojat ovat syvät, rakenteessa ei ole routalevyä, tuentoja on tehty enintään kerran 7 vuoden tarkastelujaksolla ja tukikerros on vanhaa.



Taulukko 16. Kr-Erv hypoteesi 12 kysymykseen 3.

Hypoteesi 12: Korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin vähäistä 50 %:lla yli 2,6 m paksuisista rakenteista, kun vastaava luku 1,0–1,6 m paksuisilla rakenteilla on 10 %, kun pohjamaa on kuivaa ja tukikerros on paksuudeltaan 500–600 mm.

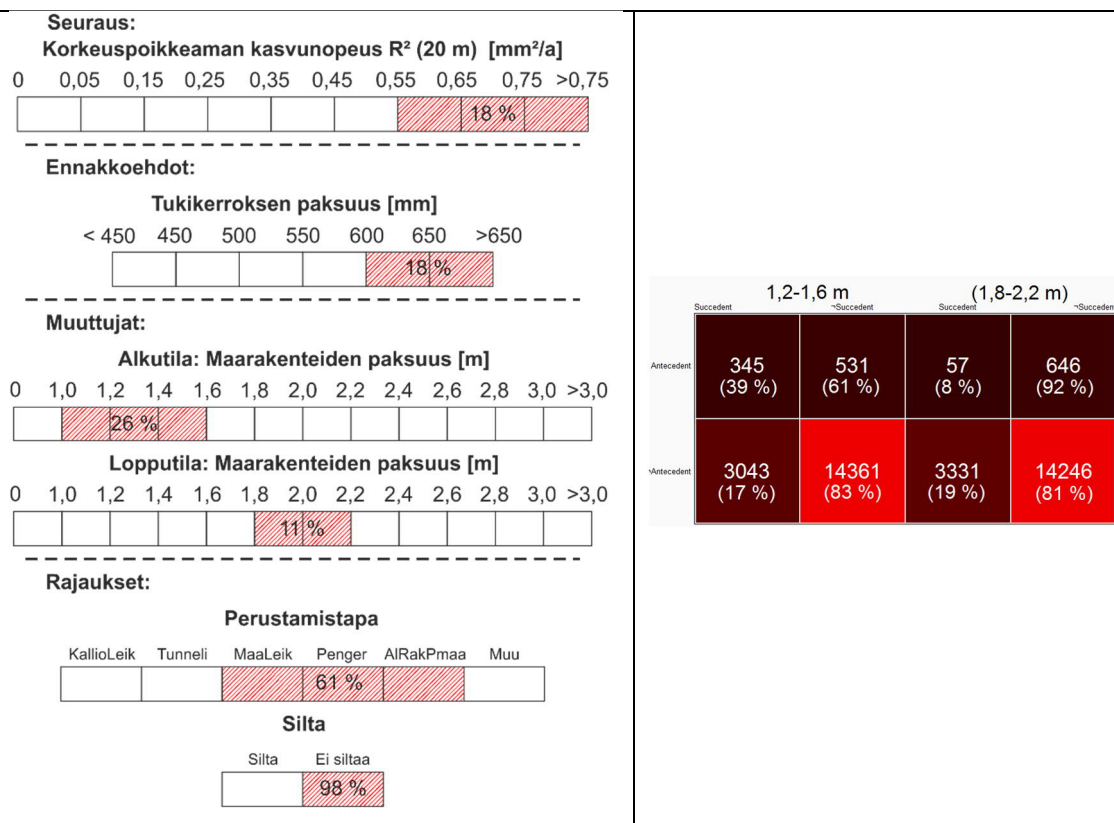


	>2,6 m		1,0-1,6 m	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	437 (50 %)	437 (50 %)	39 (10 %)	362 (90 %)
~Antecedent	4035 (23 %)	13371 (77 %)	4433 (25 %)	13446 (75 %)

Huomioit: Pieni pohjamaan kosteus ja paksu tukikerros nähdään etuina rakenteen kuorituskestävyydelle, mutta silti ohuet rakenteet eivät yleensä johda pienimpiin korkeuspoikkeaman kasvun arvoihin. Taas paksuilla rakenteilla erinomaisesti suoriutuvaa ennakkoehtojen mukaista rataa on paljon enemmän. Tämä tukee jo saatua käsitystä siitä, että ohuet rakenteet johtavat yleisemmin johonkin muuhun kuin pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun taas paksut rakenteet johtavat yleisimmin johonkin muuhun kuin suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Taulukko 17. Kr-Erv hypoteesi 13 kysymykseen 3.

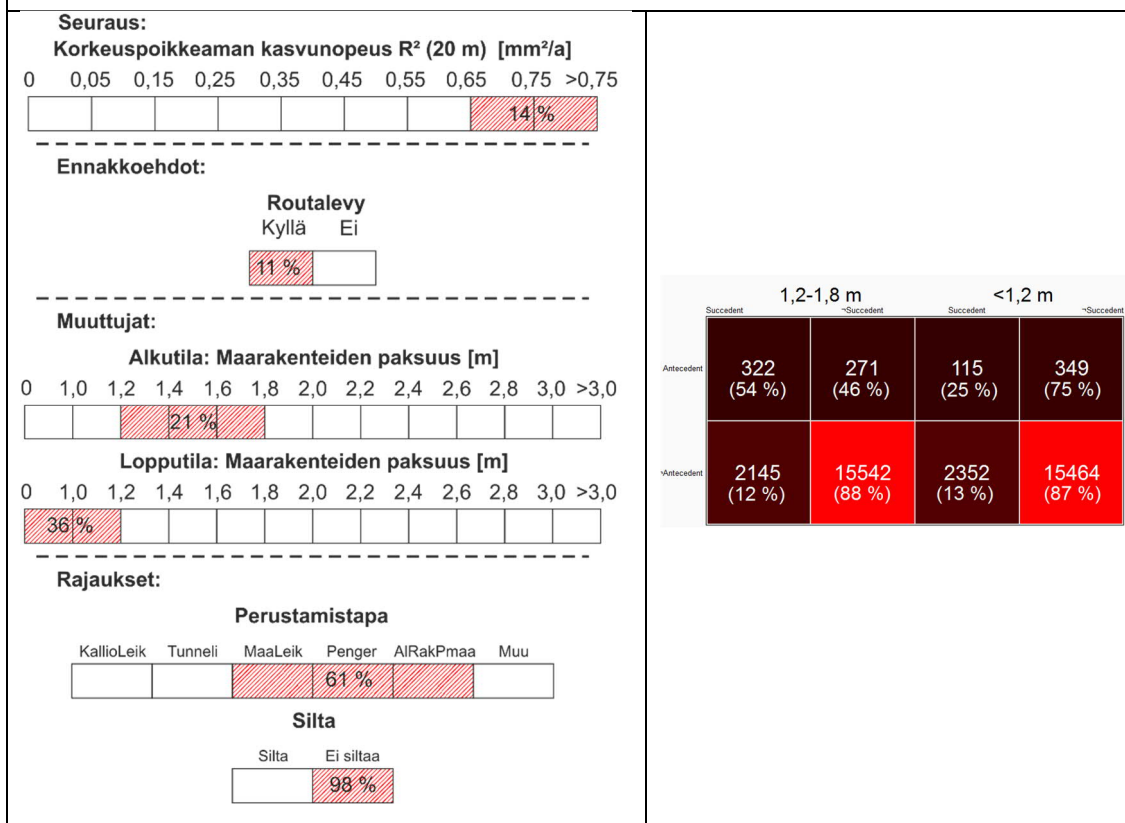
Hypoteesi 13: Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta alle 20 %:lla maaperustuksella olevasta radasta. 1,2–1,6 m paksuisilla rakenteilla, tämä luku nousee 39 %:in ja 1,8–2,2 m paksuisilla rakenteilla se laskee 8 %:iin, kun tukikerros on paksuudeltaan yli 600 mm.



Huomiot: Rakennekerrosten paksuuden kasvattaminen alle 1,6 metristä yli 1,8 metriin pienentää merkittävästi suurimman korkeuspoikkeaman kasvun osuutta paksulla tukikerroksella. Tämä 1,6–1,8 metrin raja hyvän ja huonon välillä on täysin tiedonlouhinnan itse valitsema ja toistuu useassa eri hypoteesissa.

Taulukko 18. Kr-Erv hypoteesi 14 kysymykseen 3.

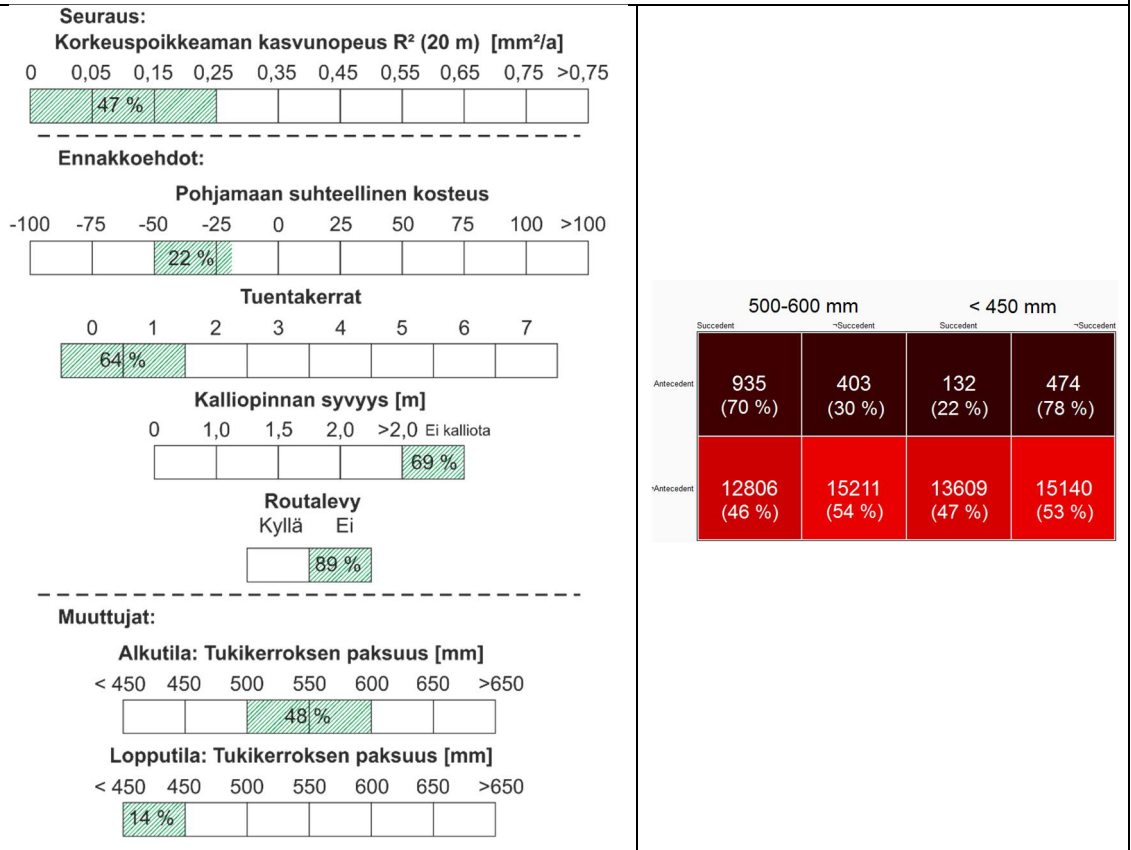
Hypoteesi 14: Korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta noin 13 % maaperustuksella olevasta radasta. Suurimpien korkeuspoikkeamien osuus on 54 %, kun maarakenteiden paksuus on 1,2–1,8 m, kun vastaava luku on 25 % alle 1,2 m paksuisilla rakenteilla, kun rakenteessa on routalevy.



Huomiot: Ohuilla rakenteilla on keskiarvoista yleisempää, että suurta korkeuspoikkeaman kasvua ilmenee. Kuitenkin erittäin ohuilla (< 1,2 m) paksuisilla rakenteilla suuri korkeuspoikkeaman kasvu on harvinaisempaa kuin 1,2–1,8 metrin paksuisilla rakenteilla. Alle 1,2 metrin paksuisia maalle perustettuja rakenteita löytyy Karjaan ja Pohjankurun liikennepaikoilta sekä muutamasta maaleikkauksesta Pohjankurun ja Ervelän väliltä.

Taulukko 19. Kr–Erv Hypoteesi 15 kysymykseen 4.

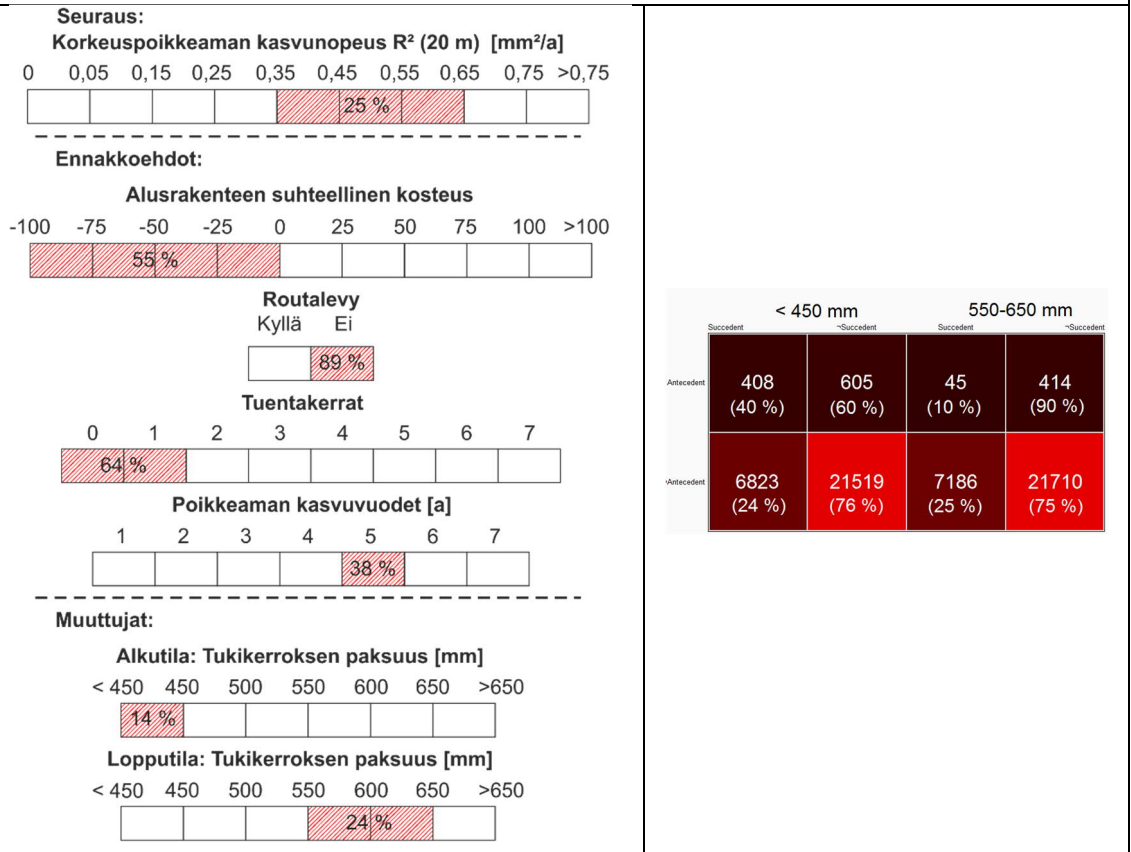
Hypoteesi 15: Korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista vähäisempää 70 %:lla 500–600 mm paksuisella tukikerroksella ja 22 %:lla alle 450 mm paksuisella tukikerroksella, kun kalliopintaa ei ole havaittu, pohjamaan kosteus on vähäistä, radassa ei ole routalevyä ja tuentoja on tehty enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana. Muualla keskiarvoista pienempää korkeuspoikkeaman kasvua on noin 47 %:lla rakenteista.



Huomiot: Pieni kosteus ja vähäiset tuentakerrat yleensä indikoivat pientä korkeuspoikkeaman kasvua 500–600 mm paksuisella tukikerroksella, mutta alle 450 mm tukikerrospaksuudella korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisemmin jotain muuta kuin pientä.

Taulukko 20. Kr–Erv Hypoteesi 16 kysymykseen 4.

Hypoteesi 16: Korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 40 %:lla alle 450 mm paksuisella tukikerroksella ja 10 %:lla 550–650 mm paksuisella tukikerroksella, kun alusrakenne on kuiva, rakenteessa ei ole routalevyä, tuentoja on enintään kerran 7 vuoden tarkastelujaksolla ja korkeuspoikkeaman kasvuvuotia on 5. Muualla keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 25 %:lla rakenteista.



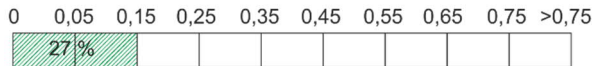
Huomiot: Ohuella tukikerroksella korkeuspoikkeaman keskiarvoista suurempi kasvu on keskiarvoista yleisempää. Paksulla tukikerroksella se on keskiarvoista harvinaisempaa.

Taulukko 21. Kr-Erv Hypoteesi 17 kysymykseen 4.

Hypoteesi 17: Korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 83 %:lla rakenteista, joilla on alle 500 mm paksuinen tukikerros, kun kalliopinta on syvemmällä kuin 2 m tai sitä ei ole havaittu ollenkaan, maarakenteiden paksuus on yli 2,4 m, rakenteessa ei ole routalevyä, tuentoja on tehty enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana ja tukikerros on yli 25 vuotta vanhaa. Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 19 %:lla kaikista niistä rakenteista, joiden tukikerros on alle 500 mm paksuinen.

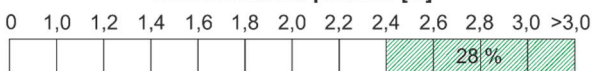
Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]



Ennakkoehdot:

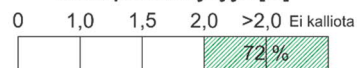
Maarakenteiden paksuus [m]



Tuentakerrat



Kalliopinnan syvyys [m]

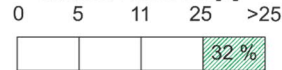


Routalevy

Kyllä Ei

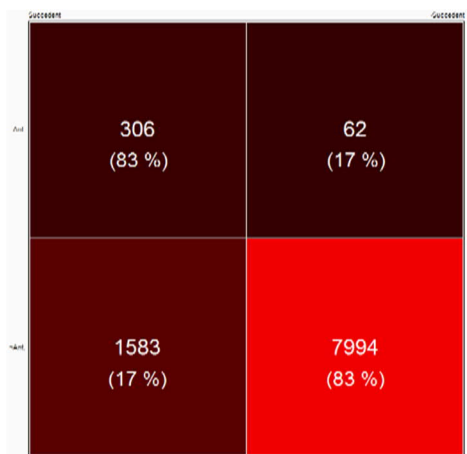
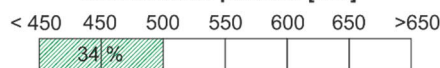


Tukikerroksen ikä [a]



Rajaukset:

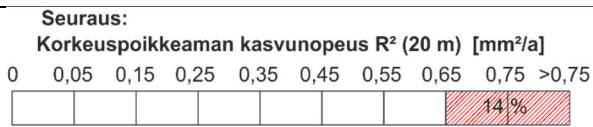
Tukikerroksen paksuus [mm]



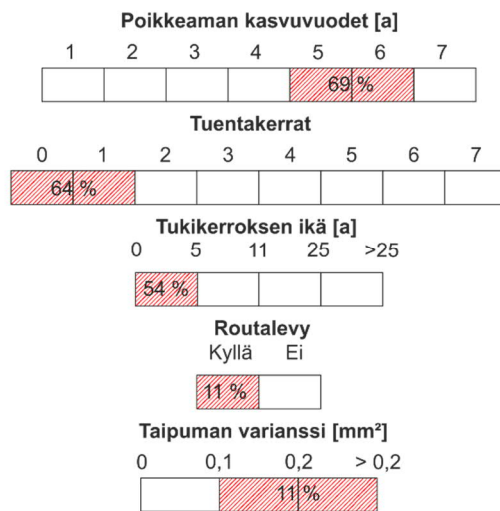
Huomioit: Kun huomioidaan kaikki rakenteet, joissa tukikerros on alle 500 mm, vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu on merkittävästi harvinaisempaa (19 %) kuin keskiarvoisesti koko rataosalla (27 %). Paksut rakenteet kuitenkin suoriutuvat hyvin ohuella tukikerroksella.

Taulukko 22. Kr-Erv Hypoteesi 18 kysymykseen 4.

Hypoteesi 18: Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 49 %:lla rakenteista, joilla on alle 500 mm paksuinen tukikerros, kun taipuman varianssi on suurta, rakenteessa ei ole routalevyä, tukikerros on uutta, korkeuspoikkeaman kasvuvuosia on 5–6 ja tuentoja on tehty enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 14 %:lla kaikista niistä rakenteista, joiden tukikerros on alle 500 mm paksuinen.



Ennakkoehdot:



Rajaukset



	Successent	Successent
Ant	370 (49 %)	391 (51 %)
~Ant	981 (11 %)	8203 (89 %)
	~Successent	~Successent

Huomiot: Vaikka hypoteesin halutut seuraukset ovat vain 49 % ennakkoehtojen mukaisesta radasta, voidaan tulosta pitää silti merkittävänä, sillä muualla suurinta korkeuspoikkeaman kasvua on vain 11 %. Alle 500 mm paksuisella tukikerroksella suuri korkeuspoikkeaman kasvu on yhtä yleistä kuin koko rataosalla keskiarvoisesti.

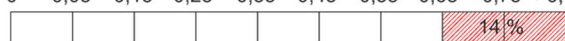
Taulukko 23. Kr-Erv Hypoteesi 19 kysymykseen 4.

Hypoteesi 19: Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 72 %:lla rakenteista, joilla on yli 500 mm paksuinen tukikerros, kun kallionpinta on yli 2 m syvyydellä tai sitä ei ole havaittu ollenkaan, maarakenteiden paksuus on 1,0–1,8 m, rakenteessa on routalevy ja tuentoja on tehty 4–7 kertaa seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 13 %:lla kaikista niistä rakenteista, joiden tukikerros on yli 500 mm paksuinen.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

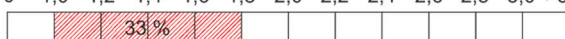
0 0,05 0,15 0,25 0,35 0,45 0,55 0,65 0,75 >0,75



Ennakkoehdot:

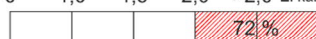
Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Kalliopinnan syvyys [m]

0 1,0 1,5 2,0 >2,0 Ei kalliota



Tuentakerrat

0 1 2 3 4 5 6 7



Routalevy

Kyllä Ei



Rajaukset

Tukikerroksen paksuus [mm]

< 450 450 500 550 600 650 >650

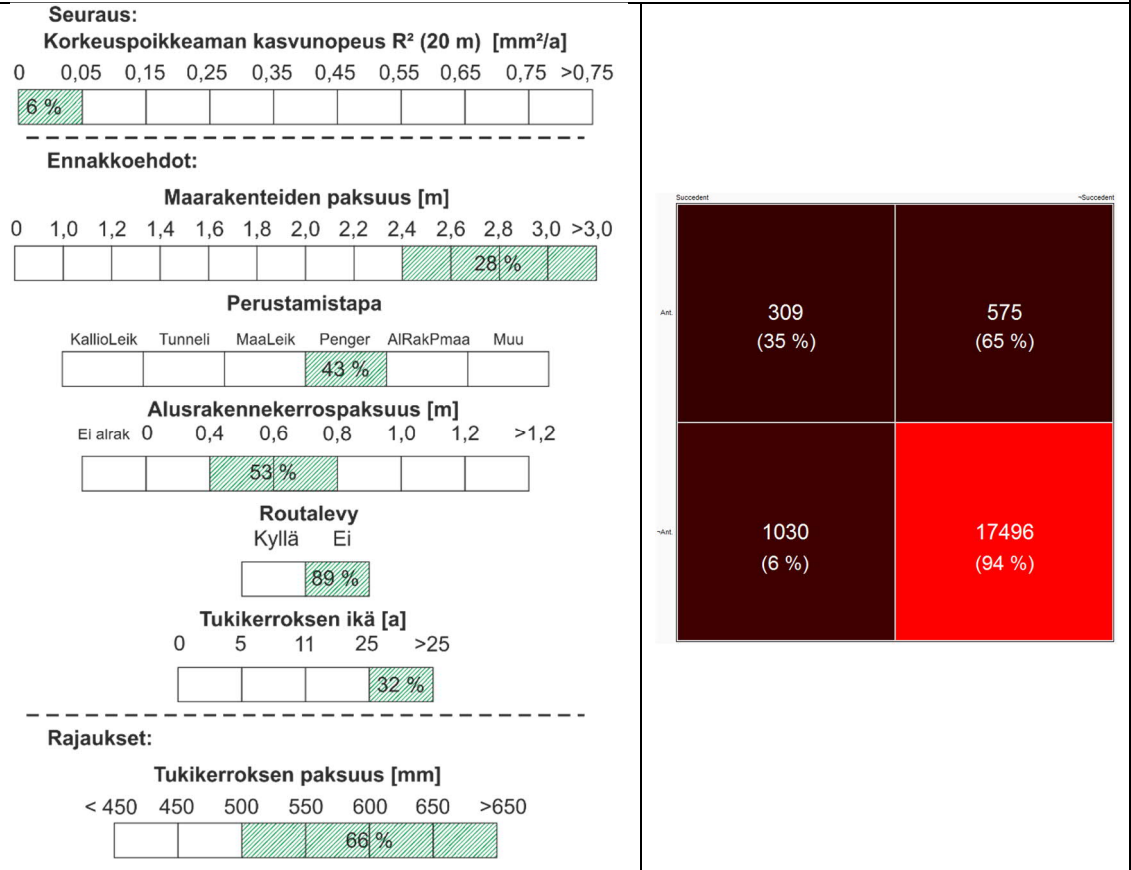


	Succedent	~Succedent
Ant	332 (72%)	129 (28%)
~Ant	2272 (12%)	16677 (88%)

Huomiot: Yli 500 mm tukikerroksella suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus (13 %) on hieman koko rataosuuden keskiarvoa (14 %) harvinaisempaa. Hypoteesia puoltava data on pohjankurun V002 vaihteelta ja kilometripaalu 98 ympäröivältä peltoalueelta.

Taulukko 24. Kr–Erv Hypoteesi 20 kysymykseen 4.

Hypoteesi 20: Korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin vähäistä 35 %:lla rakenteista, joilla on yli 500 mm paksuinen tukikerros, kun penkereelle perustetun rakenteen paksuus on yli 2,4 m ja alusrakenteen paksuus on 0,4–0,8 m, rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on vanhaa. Erittäin pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 7 %:lla kaikista niistä rakenteista, joiden tukikerros on yli 500 mm paksuinen.

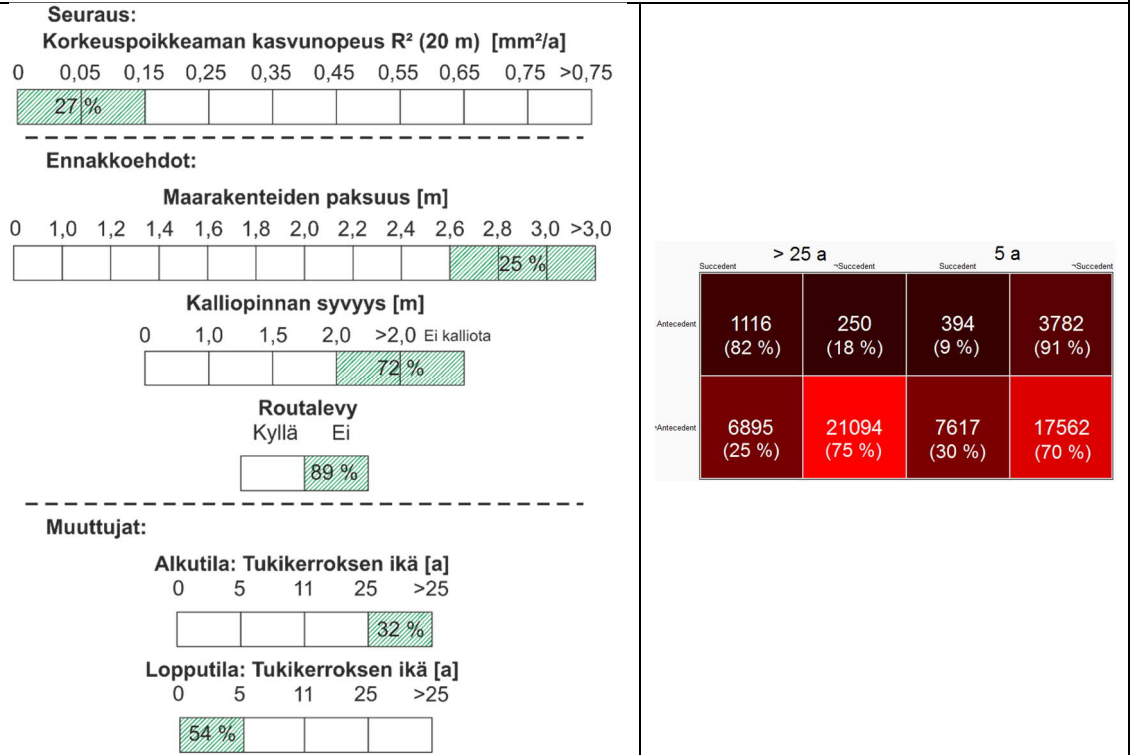


	Succedent	-Succedent
Ant.	309 (35 %)	575 (65 %)
-Ant.	1030 (6 %)	17496 (94 %)

Huomiot: Vaikka erittäin vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on vain reilulla kolmasosalla hypoteesin ennakkoehtojen mukaisista rakenteista, voidaan sitä silti pitää merkittävänä, sillä vähäisintä korkeuspoikkeaman kasvua on niin pienellä osuudella rataa ylipäänsä.

Taulukko 25. Kr-Erv Hypoteesi 21 kysymykseen 4.

Hypoteesi 21: Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on vanhalla tukikerroksella 82 %:lla rakenteista, kun vastaava luku uudella tukikerroksella on 9 %, kun maarakenteiden paksuus on yli 2,6 m, kallionpinta on yli 2 m syvyydellä tai sitä ei ole havaittu ja rakenteessa ei ole routalevyä. Kaikista rakenteista vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 27 %:lla.

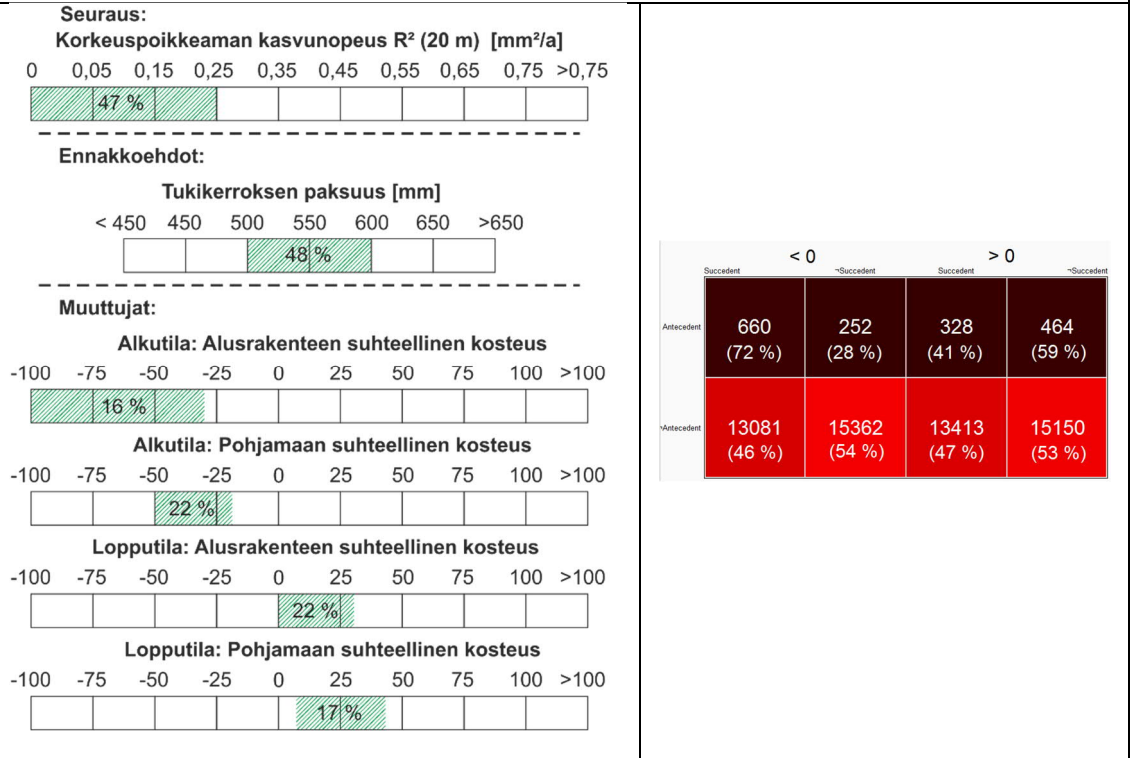


	> 25 a		5 a	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	1116 (82 %)	250 (18 %)	394 (9 %)	3782 (91 %)
~Antecedent	6895 (25 %)	21094 (75 %)	7617 (30 %)	17562 (70 %)

Huomiot: Hypoteesin vahvuus on merkittävä. Paksuilla maarakenteilla, joissa ei ole routalevyä, korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä vähäistä. Kun näillä rakenteilla on vanha tukikerros, korkeuspoikkeaman kasvu on lähes poikkeuksetta vähäistä. Kuitenkin uudella tukikerroksella on harvinaista, että korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä.

Taulukko 26. Kr-Erv Hypoteesi 22 kysymykseen 5.

Hypoteesi 22: Vähäisen korkeuspoikkeaman osuus on 72 %, kun suhteellinen alusrakenteen on alle -30 ja suhteellinen pohjamaan kosteus alle -20, kun tukikerroksen paksuus on 500–600 mm. Vastaavilla ehdoilla vähäisen korkeuspoikkeaman osuus on 41 %, kun alusrakenteen kosteus on 0–30 ja pohjamaan kosteus on 10–40. Koko datassa vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 47 %:lla radasta.

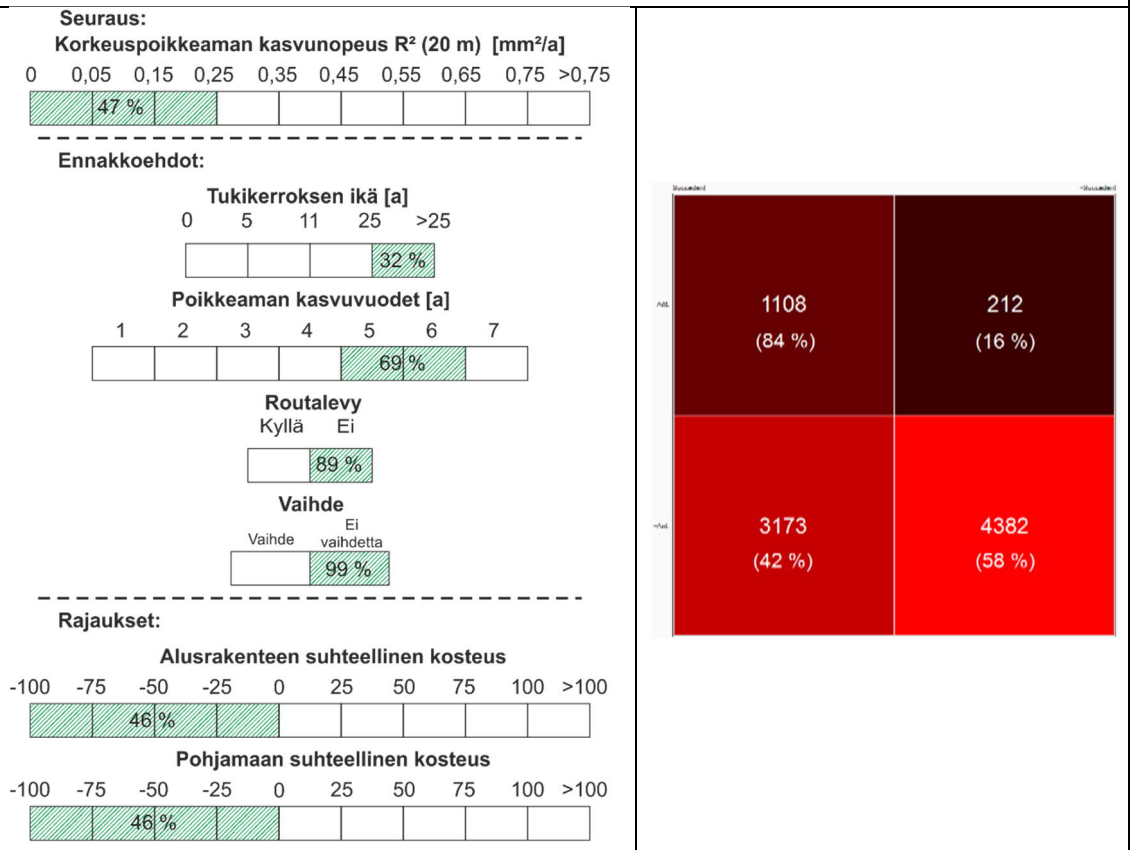


	< 0		> 0	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	660 (72 %)	252 (28 %)	328 (41 %)	464 (59 %)
~Antecedent	13081 (46 %)	15362 (54 %)	13413 (47 %)	15150 (53 %)

Huomiot: Hypoteesin tulos on yksinkertaistettuna se, että kun suhteellinen rakenteiden kosteus muuttuu keskiarvoa paljon pienemmästä hieman keskiarvoista suurempaan, vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu tulee harvinaisemmaksi.

Taulukko 27. Kr–Erv Hypoteesi 23 kysymykseen 5.

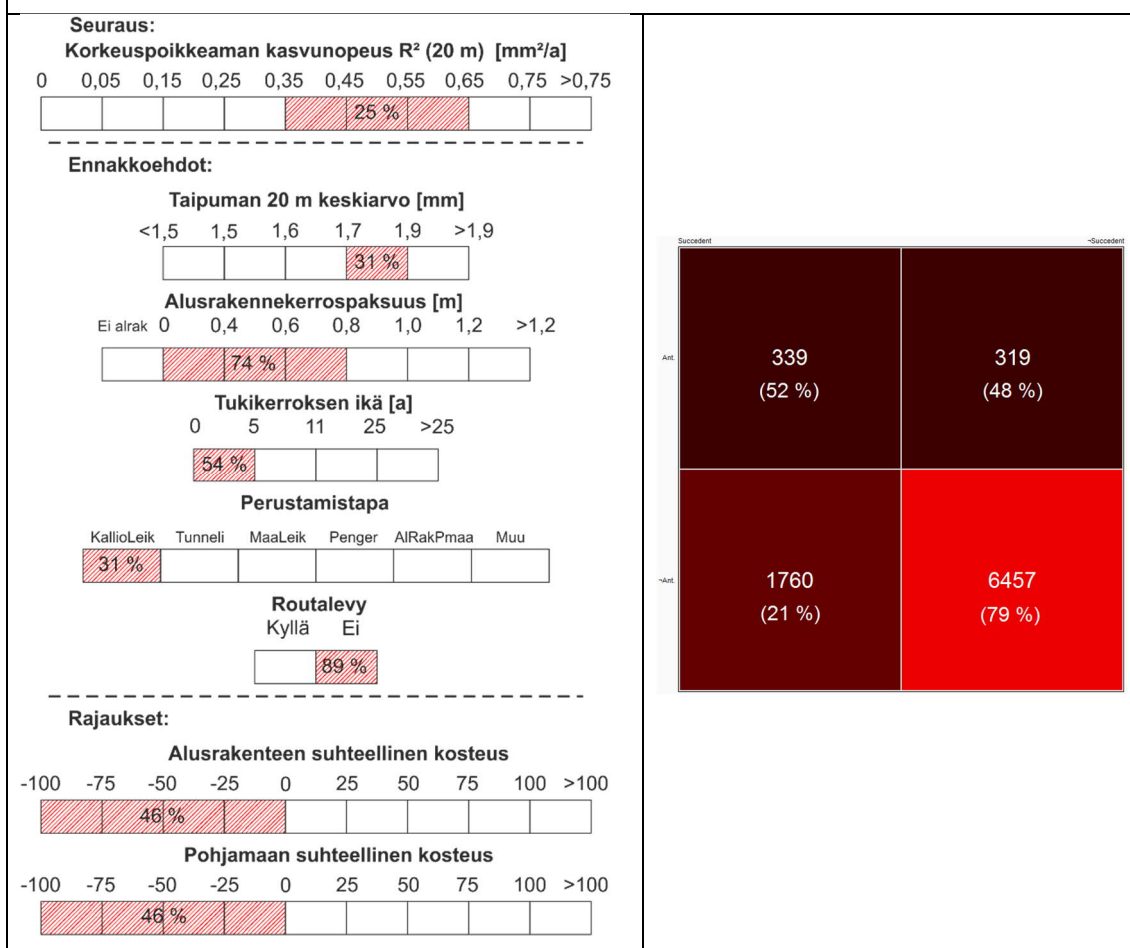
Hypoteesi 23: Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat alle 0, korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 84 %:lla sellaisesta radasta, jossa ei ole routalevyä, tukikerros on yli 25 vuotta vanhaa, korkeuspoikkeaman kasvuvuotia on 5 tai 6 ja rata ei ole vaihdealueella. Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 48 % kaikesta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat alle 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 47 %.



Huomiot: Hypoteesin mukaan on tyypillistä, että korkeuspoikkeaman kasvu on hidasta, kun kosteus on vähäistä ja mukana on muitakin tyypillisesti korkeuspoikkeaman kasvua pienentäviä tekijöitä, kuten vanha tukikerros ja useat korkeuspoikkeaman kasvuvuodet. Kun tarkastellaan kuivia rakenteita kokonaisuutena, huomataan, ettei niiden osuus pienestä korkeuspoikkeaman kasvusta ole juurikaan keskiarvoista suurempi.

Taulukko 28. Kr–Erv Hypoteesi 24 kysymykseen 5.

Hypoteesi 24: Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat alle 0, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 52 %:lla sellaisesta radasta, joka on kallioleikkauksella, alusrakenteen paksuus on alle 0,8 m, radassa ei ole routalevyä, taipumat ovat suuria ja tukikerros on uutta. Keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 24 % kaikesta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat alle 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 25 %.



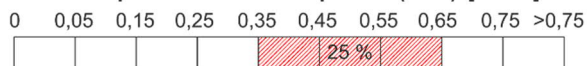
Huomiot: Suuri korkeuspoikkeaman kasvu ja pienet rakennekosteudet liittyivät vahvasti kallioleikkauksiin. Huomattavaa on, että pienillä rakennekosteuksilla keskiarvoa suurempi korkeuspoikkeaman kasvu (0,35–0,65 mm²/a) on hieman harvinaisempaa kuin koko rataosuudella yleisesti. Kallioleikkaukset on kuitenkin hyvä erottaa joukosta, koska niiden osalta pohjamaan (kallion) kosteus ei ole rakenteen kunnon kannalta määräävä tekijä.

Taulukko 29. Kr–Erv Hypoteesi 25 kysymykseen 5.

Hypoteesi 25: Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat alle 0 ja rata on maaperustuksella, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 31 %:lla sellaisesta radasta, jossa ei ole routalevyä, alusrakenteen paksuus on alle 0,8 m, tukikerros on uutta ja kallionpinta on yli 2 metrin syvyydellä tai sitä ei ole havaittu. Keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 22 % kaikesta maalle perustetusta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat alle 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 25 %.

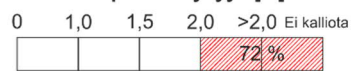
Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]

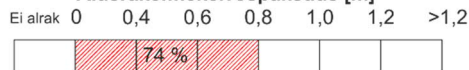


Ennakkoehdot:

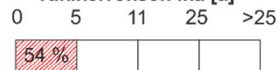
Kalliopinnan syvyys [m]



Alusrakennekerrospaksuus [m]



Tukikerroksen ikä [a]



Routalevy

Kyllä Ei



Rajaukset:

Alusrakenteen suhteellinen kosteus



Pohjamaan suhteellinen kosteus



Perustamistapa

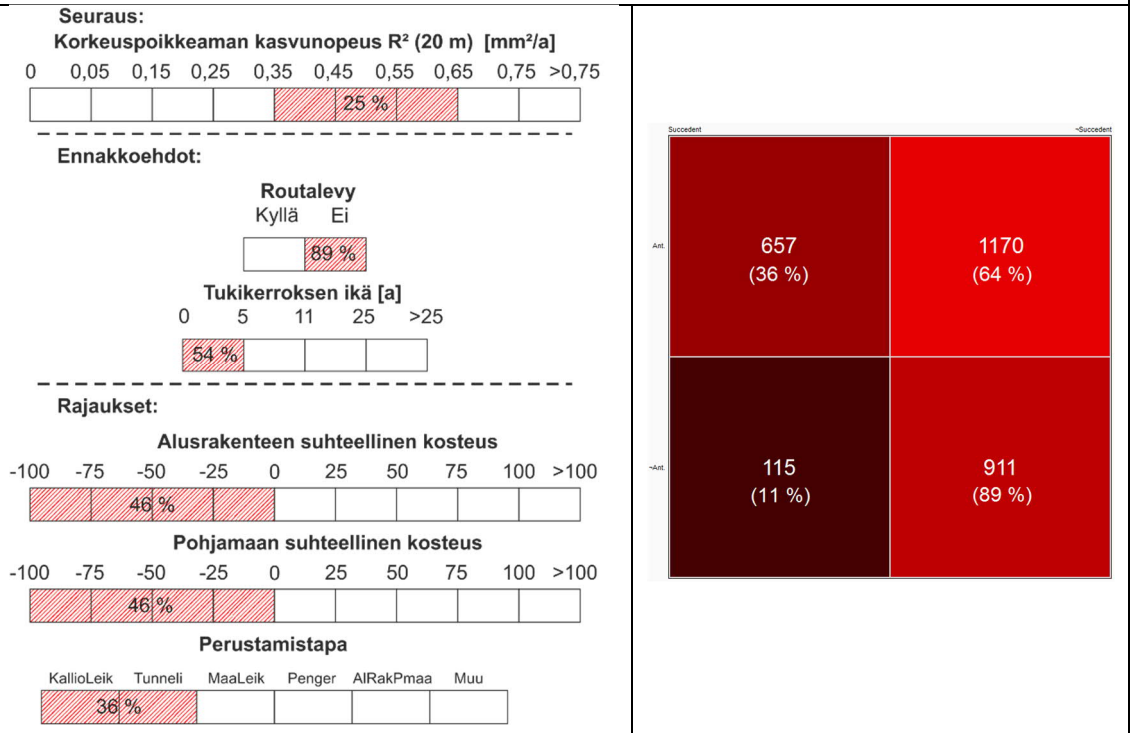


	Successent	-Successent
Ant	621 (31 %)	1377 (69 %)
-Ant	706 (18 %)	3318 (82 %)

Huomiot: Keskiarvoista suuremman korkeuspoikkeaman kasvun osuus väheni, kun kalliolle perustettu rata poistettiin datasta. Hypoteesia tukeva data oli pääasiassa siirtymäkohdissa, joissa perustu vaihtuu äkillisesti paksulta penkereeltä kalliolle. Datassa oli myös yksi pidempi jakso, jossa oli useampia pistemäisiä kohtia kilometrivälillä 104+500–104+900. Tämä jakso on havaittu jo aiemminkin ongelmalliseksi maarakenteiden paksuuksien louhinnoissa.

Taulukko 30. Kr–Erv Hypoteesi 26 kysymykseen 5.

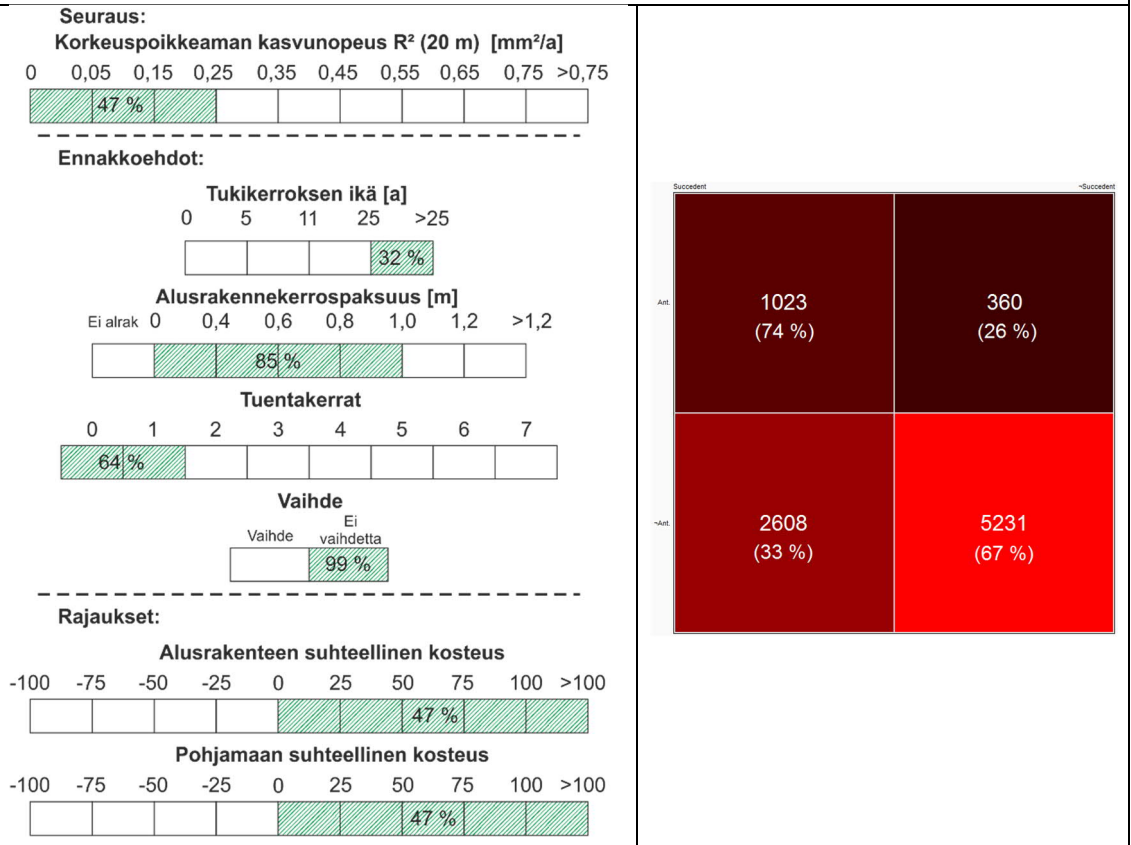
Hypoteesi 26: Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat alle 0 ja rata on perustettu kalliolle, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 36 %:lla sellaisesta radasta, jonka tukikerros on uutta ja rakenteessa ei ole routalevyä. Keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 27 % kaikesta kalliolle perustetusta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat alle 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 25 %.



Huomiot: Tukikerroksen matala ikä on vahvasti mukana hypoteeseissa ja se on aina mukana suuren korkeuspoikkeaman hypoteeseissa, kun rakenteet ovat kuivat. Keskiarvoista suurempi korkeuspoikkeaman kasvu on selvästi yleisempää kuivalla kalliolla perustetulla radalla (27 %) kuin kuivalla maalle perustetulla radalla (22 %). Keskiarvoista suurempi korkeuspoikkeaman kasvu on yleisempää kuivilla kallioleikkauksilla kuina koko rataosuudella.

Taulukko 31. Kr-Erv Hypoteesi 27 kysymykseen 5.

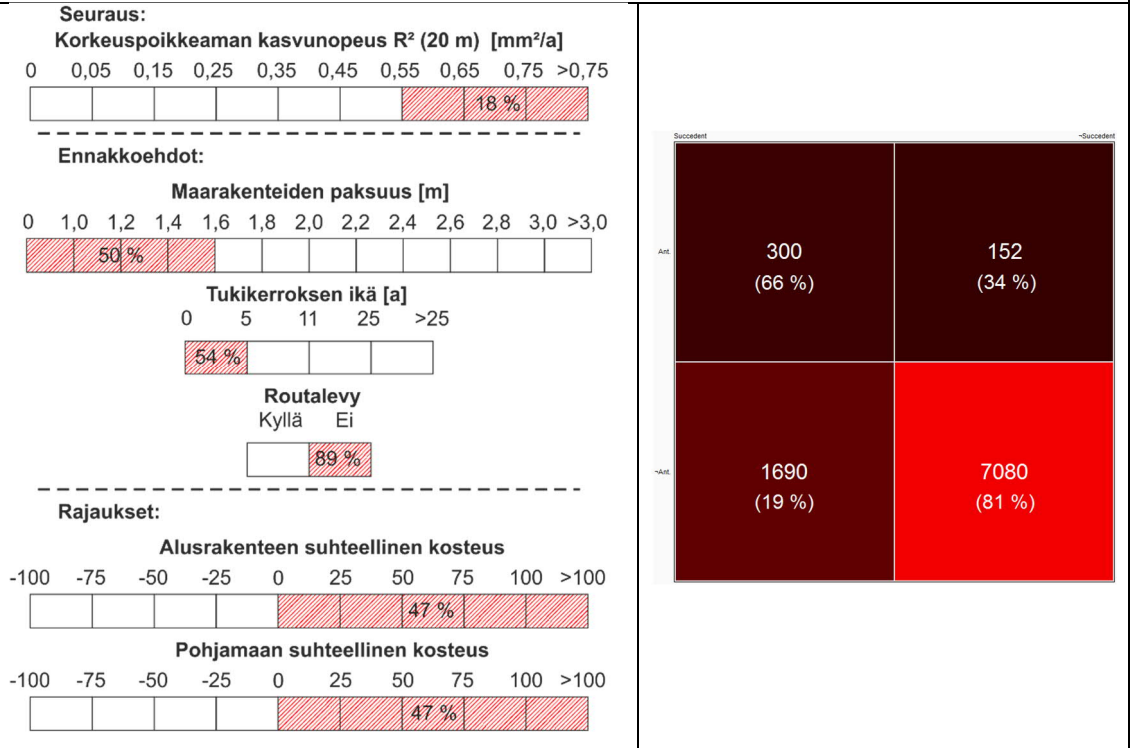
Hypoteesi 27: Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat yli 0, korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 74 %:lla sellaisesta radasta, jonka alusrakenteen paksuus on alle metrin, tukikerros on vanhaa, kohde ei ole vaihdealueella ja rataa on tuettu enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana. Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 39 % kaikesta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat yli 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 47 %.



Huomiot: On merkittävästi harvinaisempaa, että korkeuspoikkeaman kasvu on pientä, kun rakennekosteudet ovat yli 0 (39 %) kuin koko rataosalla (47 %) tai kun rakennekosteudet ovat alle 0 (48 %).

Taulukko 32. Kr–Erv Hypoteesi 28 kysymykseen 5.

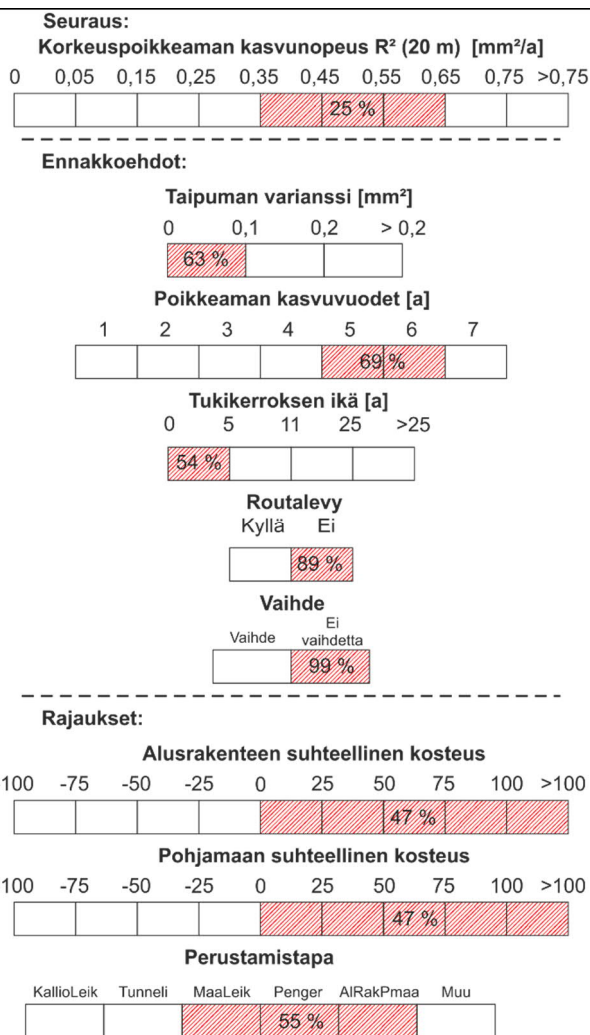
Hypoteesi 28: Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat yli 0, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 66 %:lla sellaisesta radasta, jonka maarakenteiden paksuus on alle 1,6 m, radassa ei ole routalevyä ja tukikerros on uutta. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 22 % kaikesta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat yli 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 18 %.



Huomiot: Suurella kosteuden arvolla vaikuttaisi olevan yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Sen lisäksi, että yhteys on vahvempi, korkeuspoikkeaman kasvun luokat ovat nyt pääasiassa hypoteeseissa kaikista suurimpia, eikä vain keskiarvoista suurempia. Kostealla rakenteella on myös suurempi osuus suuresta korkeuspoikkeaman kasvusta, mitä koko rataosuudella yleensä.

Taulukko 33. Kr-Erv Hypoteesi 29 kysymykseen 5.

Hypoteesi 29: Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat yli 0 ja rata on maaperustuksella, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 41 %:lla sellaisesta radasta, jossa eri ole routalevyä, taipuman varianssi on vähäistä, korkeuspoikkeaman kasvuvuotia on 5 tai 6, tukikerros on uutta ja kohde ei ole vaihdealueella. Keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 30 % kaikesta maalle perustetusta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat yli 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 25 %.

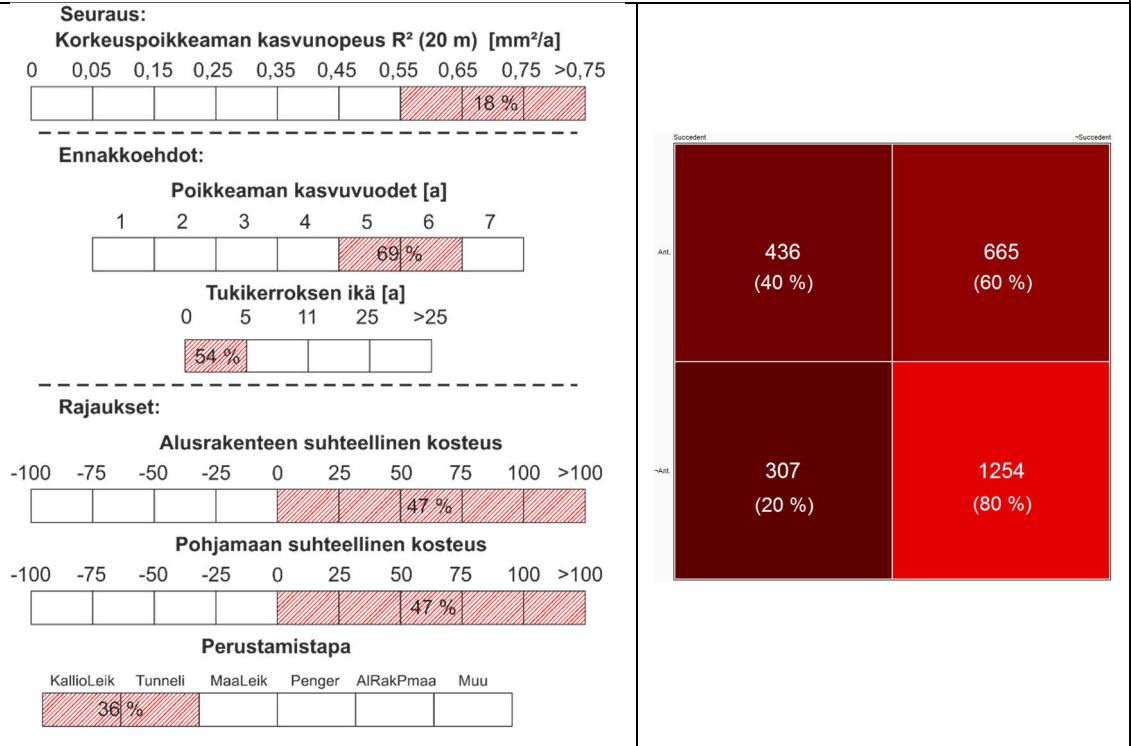


	Succedent	-Succedent
Alit	886 (41 %)	1269 (59 %)
-Alit	1060 (24 %)	3345 (76 %)

Huomiot: Keskiarvoista suurempi korkeuspoikkeaman kasvu on merkittävästi yleisempää kosteilla rakenteilla, jotka ovat maaperustuksella, kuin keskiarvoisesti rataosuudella.

Taulukko 34. Kr–Erv Hypoteesi 30 kysymykseen 5.

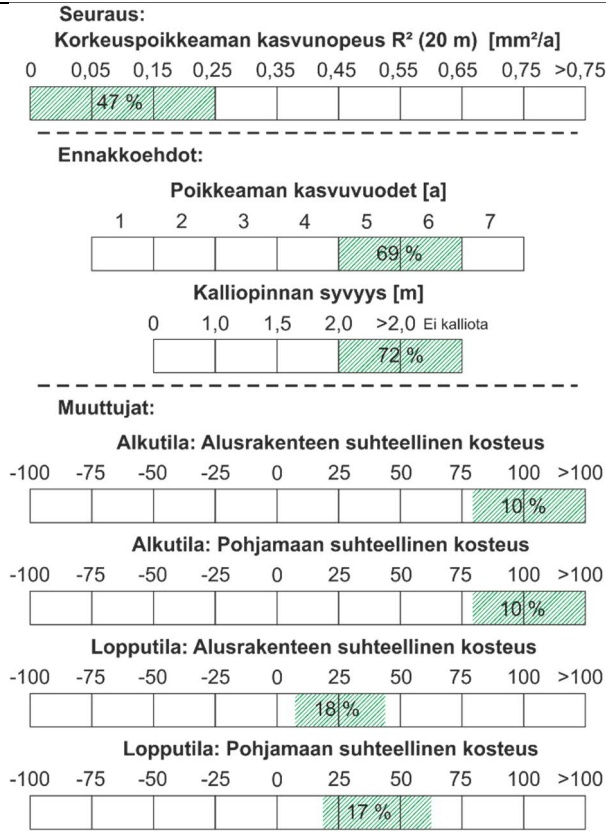
Hypoteesi 30: Kun alusrakenteen ja pohjamaan suhteellinen kosteus ovat yli 0 ja rata on perustettu kalliolle, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 40 %:lla sellaisesta radasta, jonka tukikerros on uutta ja korkeuspoikkeaman kasvuvuotia on 5 tai 6. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 28 % kaikesta kalliolle perustetusta radasta, jolla alusrakenteen ja pohjamaan kosteus ovat yli 0. Koko rataosuudella vastaava luku on 18 %.



Huomiot: Suuri korkeuspoikkeaman kasvu on merkittävästi yleisempää kosteilla rakenteilla kuin keskiarvoisesti rataosuudella. Suurin osa suuresta korkeuspoikkeaman kasvusta kalliolle perustetuilla kosteilla rakenteilla tapahtuu ennakkoehtojen mukaisella radalla.

Taulukko 35. Kr-Erv Hypoteesi 31 kysymykseen 5.

Hypoteesi 31: Vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 62 %, kun rakenne on erittäin kostea ja kalliopinnan syvyys on yli 2 m tai sitä ei ole havaittu ja korkeuspoikkeaman kasvuvuotia on 5 tai 6. Vastaavilla ehdoilla vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 29 %, kun rakenne on vähän keskiarvoista kosteampi. Koko rataosuudella pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 47 %:lla rakenteista.



	> 80		0-60	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	319 (62 %)	192 (38 %)	113 (29 %)	271 (71 %)
~Antecedent	13422 (47 %)	15422 (53 %)	13628 (47 %)	15343 (53 %)

Huomiot: Erittäin suurilla rakennekosteuksilla pieni korkeuspoikkeaman kasvu yleisempää kuin vain hieman kosteilla rakenteilla.

Taulukko 36. Kr-Erv Hypoteesi 32 kysymykseen 5.

Hypoteesi 32: Keskiarvoista suuremman korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 45 %, kun kosteuspitoisuus on keskiarvoista vähän suurempi ja rata on perustettu penkereelle, eikä radassa ole routalevyä. Vastaavilla ehdoilla keskiarvoista suuremman korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 22 %, kun rakenteet ovat erittäin kosteat. Koko rataosuudella keskiarvoista suurempaa korkeuspoikkeaman kasvua on 38 %.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,15 0,25 0,35 0,45 0,55 0,65 0,75 >0,75



Ennakkoehdot:

Perustamistapa



Routalevy

Kyllä Ei



Muuttujat:

Alkutila: Alusrakenteen suhteellinen kosteus

-100 -75 -50 -25 0 25 50 75 100 >100



Alkutila: Pohjamaan suhteellinen kosteus

-100 -75 -50 -25 0 25 50 75 100 >100



Lopputila: Alusrakenteen suhteellinen kosteus

-100 -75 -50 -25 0 25 50 75 100 >100



Lopputila: Pohjamaan suhteellinen kosteus

-100 -75 -50 -25 0 25 50 75 100 >100



	0-50		>80	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	304 (45 %)	377 (55 %)	82 (22 %)	284 (78 %)
~Antecedent	10882 (38 %)	17792 (62 %)	11104 (38 %)	17885 (62 %)

Huomiot: Erittäin suurilla rakennekosteuksilla suuri korkeuspoikkeaman kasvu on harvinaisempaa kuin vain hieman kosteilla rakenteilla.

Taulukko 37. Kr-Erv Hypoteesi 33 kysymykseen 6.

Hypoteesi 33: Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 77 %, kun taipuman keskiarvo on keskiarvoista suurempaa rakenteilla, joilla maarakenteiden paksuus on alle 1,6 m, alusrakenne on alle 0,4 m, pengertä on alle 0,5 m, ojat ovat matalat ja kohde ei ole sillalla. Vastaavilla ehdoilla pienen korkeuspoikkeaman osuus on 19 %, kun taipuman keskiarvo on keskiarvoista pienempää. Pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 47 %:lla kaikista rakenteista.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]

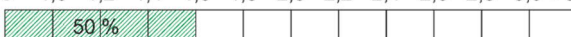
0 0,05 0,15 0,25 0,35 0,45 0,55 0,65 0,75 >0,75



Ennakkoehdot:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



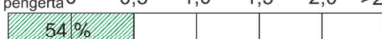
Alusrakennepaksuus [m]

Ei alarak 0 0,4 0,6 0,8 1,0 1,2 >1,2



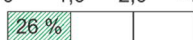
Pengertä paksuus [m]

Ei pengertä 0 0,5 1,0 1,5 2,0 >2,0



Ojasyvyys (vasen oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Silta

Silta Ei siltaa



Muuttujat:

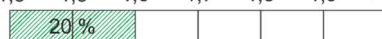
Alkutila: Taipuman 20 m keskiarvo [mm]

<1,5 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 >1,9



Lopputila: Taipuman 20 m keskiarvo [mm]

<1,5 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 >1,9



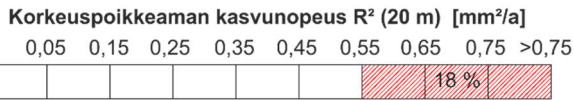
	1,7-1,9 mm		< 1,6 mm	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	602 (77 %)	176 (23 %)	77 (19 %)	327 (81 %)
~Antecedent	13139 (46 %)	15438 (54 %)	13664 (47 %)	15287 (53 %)

Huomiot: Ohuella rakenteella taipuman keskiarvon vähenemisellä on vaikutus vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun.

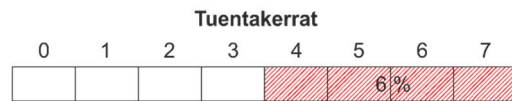
Taulukko 38. Kr–Erv Hypoteesi 34 kysymykseen 6.

Hypoteesi 34: Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 60 %, kun taipuman keskiarvo on keskiarvoista suurempaa rakenteilla, joita on tuettu vähintään 4 kertaa 7 vuoden tarkastelujakson aikana, ja kohde ei ole sillalla tai vaihdealueella. Vastaavilla ehdoilla suuren korkeuspoikkeaman osuus on 25 %, kun taipuman keskiarvo on keskiarvoista pienempää. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 18 %:lla kaikista rakenteista.

Seuraus:



Ennakkoehdot:



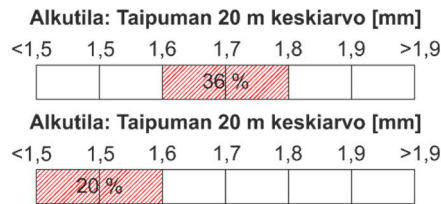
Silta



Vaihde



Muuttujat:



	1,6-1,8 mm		< 1,6 mm	
	Succedent	*Succedent	Succedent	*Succedent
Antecedent	400 (60 %)	272 (40 %)	199 (25 %)	609 (75 %)
*Antecedent	4962 (17 %)	23721 (83 %)	5163 (18 %)	23384 (82 %)

Huomiot: Suurella taipuman keskiarvolla on vahva yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun rataa tuetaan usein. Kuitenkin myös pienellä taipuman keskiarvolla on keskiarvoista suurempi yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun, vaikkakin se on merkittävästi pienempi kuin suurella taipuman keskiarvolla.

Taulukko 39. Kr–Erv Hypoteesi 35 kysymykseen 6.

Hypoteesi 35: Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on alle 1,7 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista pienempää 76 %:lla radasta, kun kallionpintaa ei ole havaittu, ojat ovat matalat, radassa ei ole routalevyä, taipuman varianssi on vähäistä ja korkeuspoikkeaman kasvuvuotia on 4 tai 5. Koko rataosalla keskiarvoista pienempää korkeuspoikkeaman kasvua on 56 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on alle 1,7 mm, vastaava luku on 54 %.

Seuraus:
Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]
 0 0,05 0,15 0,25 0,35 0,45 0,55 0,65 0,75 >0,75

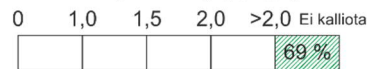


Ennakkoehdot:

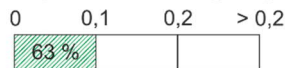
Poikkeaman kasvuvuodet [a]



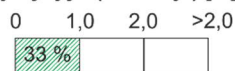
Kalliopinnan syvyys [m]



Taipuman varianssi [mm²]



Ojasyvyys (oikea oja) [m]



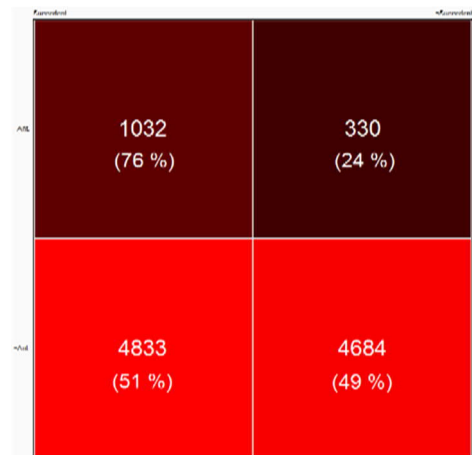
Routalevy

Kyllä Ei



Rajoitukset:

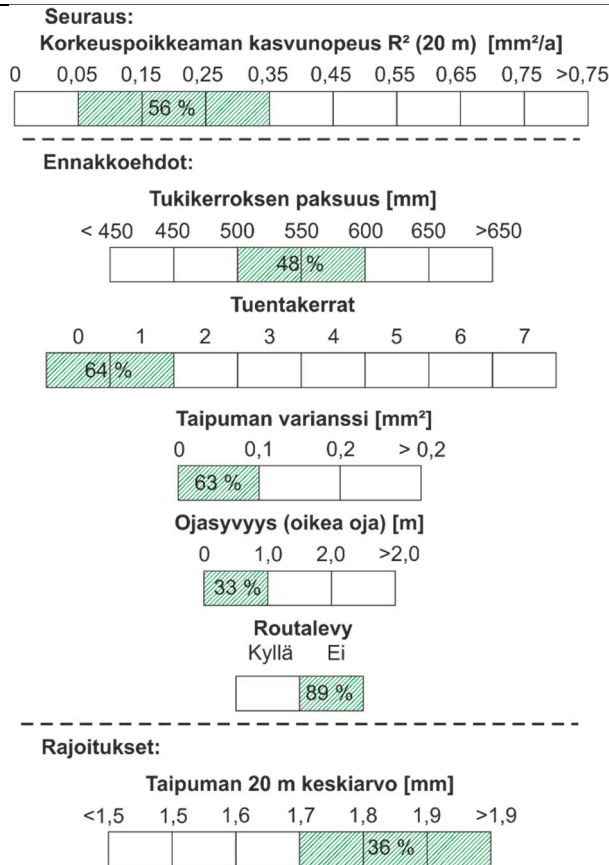
Taipuman 20 m keskiarvo [mm]



Huomiot: Keskiarvoista pienemmällä taipumalla on yhtä vahva yhteys korkeuspoikkeaman keskiarvoiseen kasvuun kuin koko rataosalla keskiarvoisesti. Hypoteesissa ei ole mukana kaikista pienimpiä korkeuspoikkeaman kasvun arvoja.

Taulukko 40. Kr–Erv Hypoteesi 36 kysymykseen 6.

Hypoteesi 36: Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on yli 1,7 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista pienempää 83 %:lla radasta, kun tukikerroksen paksuus on 500–600 mm, ojat ovat matalat, radassa ei ole routalevyä, taipuman varianssi on vähäistä ja rataa on tuettu enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujaksolla. Koko rataosalla keskiarvoista pienempää korkeuspoikkeaman kasvua on 56 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on alle 1,7 mm, vastaava luku on 53 %.

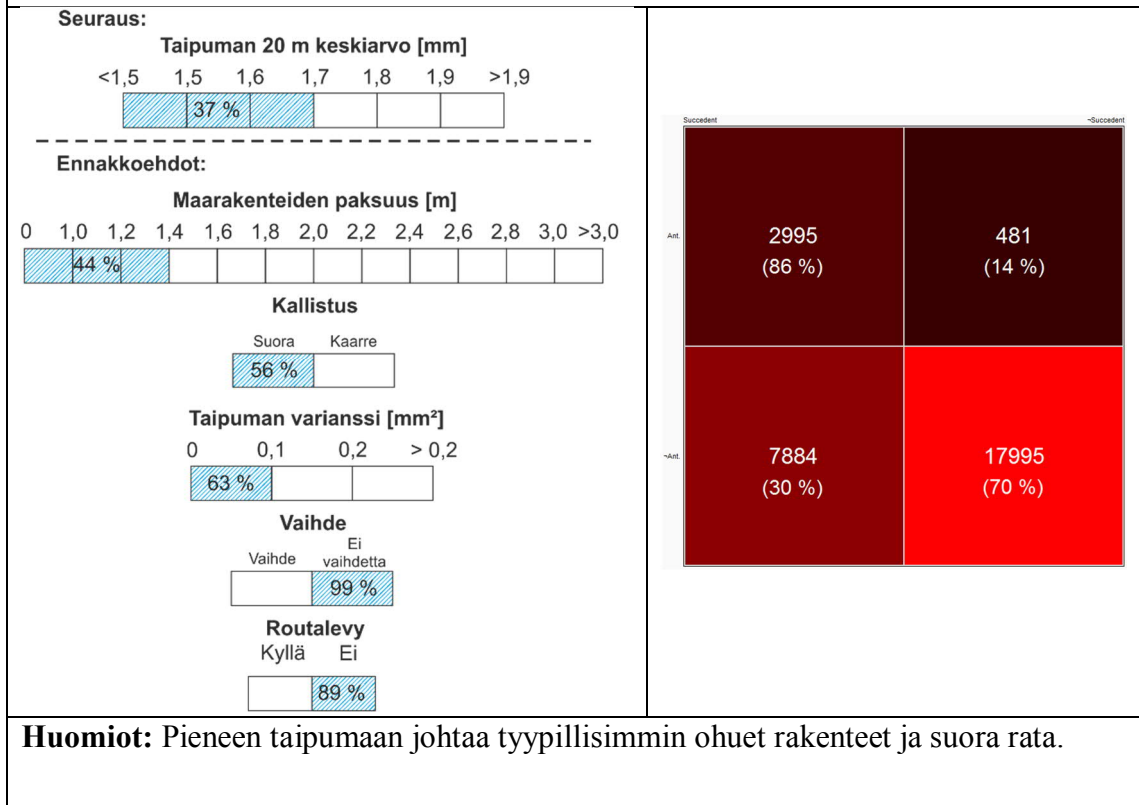


	Succedent	-Succedent
Att.	1074 (83 %)	216 (17 %)
-Att.	4545 (49 %)	4796 (51 %)

Huomiot: Keskiarvoista suurempi taipuma käyttäytyy erittäin samankaltaisesti kuin keskiarvoista pienempi taipuma, kun verrataan hypoteeseja 35 ja 36. Hypoteesissa ei ole mukana kaikista pienimpiä korkeuspoikkeaman kasvun arvoja.

Taulukko 41. Kr-Erv Hypoteesi 37 kysymykseen 6.

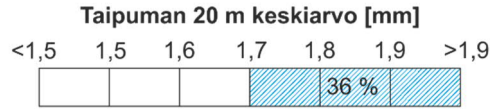
Hypoteesi 37: Alle 1,7 mm keskiarvoiseen taipumaan johtaa 86 % sellaisesta radasta, joka on suoralla, sen maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, radassa ei ole routalevyä, taipuman varianssi on pientä ja kohde ei ole vaihdealueella. Pientä taipuman keskiarvoa on 37 %:lla koko rataosuudesta.



Taulukko 42. Kr-Erv Hypoteesi 38 kysymykseen 6.

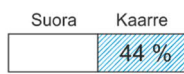
Hypoteesi 38: Yli 1,7 mm keskiarvoiseen taipumaan johtaa 86 % sellaisesta radasta, joka on kaarteessa, ojat eivät ole syviä, taipuman varianssi on pientä, kohde ei ole vaihdealueella ja rataa on tuettu enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujaksolla. Suurta taipuman keskiarvoa on 36 %:lla koko rataosuudesta.

Seuraus:

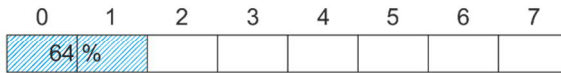


Ennakkoehdot:

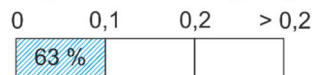
Kallistus



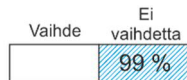
Tuentakerrat



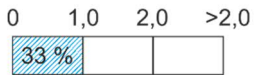
Taipuman varianssi [mm²]



Vaihde



Ojasyvyys (oikea oja) [m]



	Succedent	~Succedent
Att.	1504 (82 %)	323 (18 %)
~Att.	9127 (33 %)	18401 (67 %)

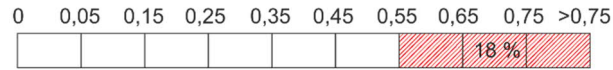
Huomiot: Suureen taipumaan johtaa tyypillisimmin kaarteet ja tasainen rata.

Taulukko 43. Kr-Erv Hypoteesi 39 kysymykseen 6.

Hypoteesi 39: Suurella taipuman varianssilla suuren korkeuspoikkeaman osuus on 75 %, kun pienellä taipuman varianssilla vastaava luku on 17 % sellaisella rakenteella, jonka maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, kallionpintaa ei ole havaittu ja kyseessä ei ole epäjatkuvuuskohta. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 18 %:lla kaikista rakenteista.

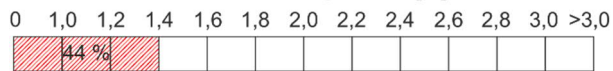
Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

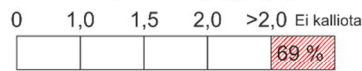


Ennakkoehdot:

Maarakenteiden paksuus [m]



Kalliopinnan syvyys [m]

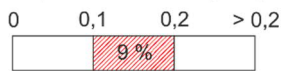


Epäjatkuvuuskohta

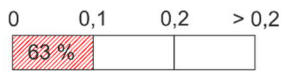


Rajaukset:

Taipuman varianssi [mm^2]



Taipuman varianssi [mm^2]

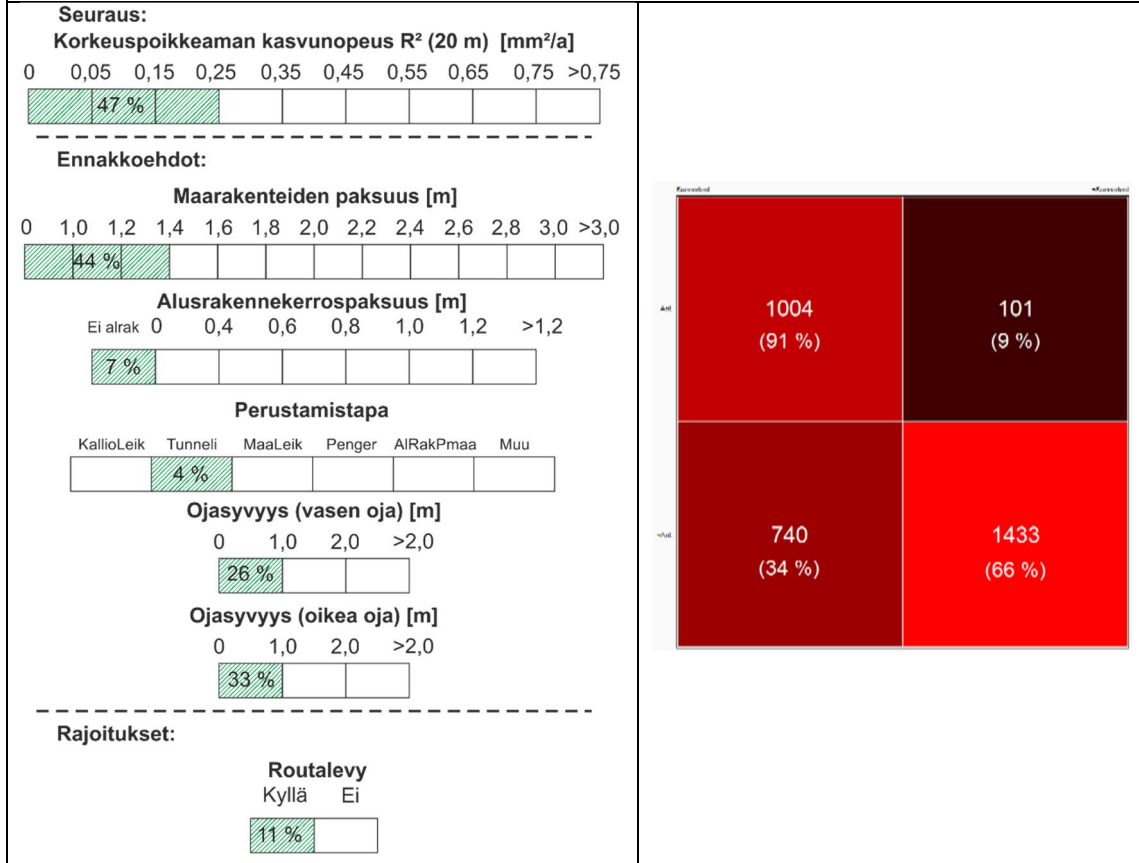


	0,1-0,2 mm^2		< 0,1 mm^2	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	417 (75 %)	140 (25 %)	594 (17 %)	2908 (83 %)
*Antecedent	4945 (17 %)	23853 (83 %)	4768 (18 %)	21085 (82 %)

Huomiot: Suuri taipuman varianssi viittaa vahvasti suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Taulukko 44. Kr–Erv Hypoteesi 40 kysymykseen 7.

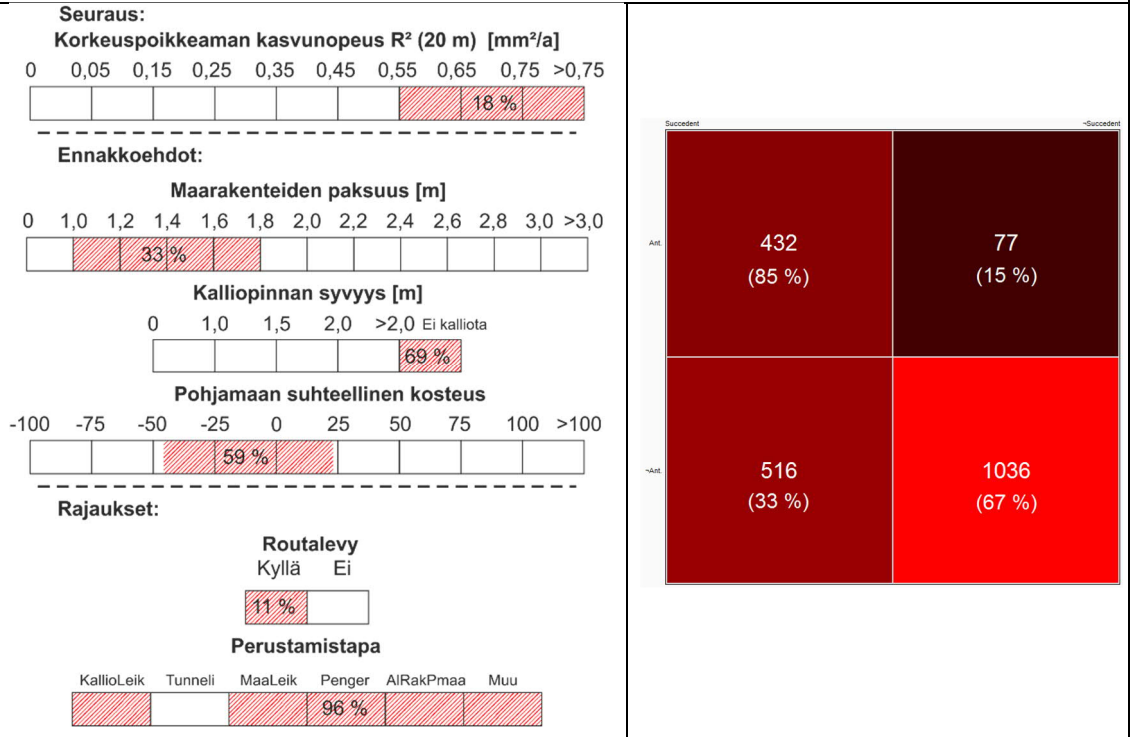
Hypoteesi 40: Kun radassa on routalevy, korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä lähes aina (91 %) sellaisella radalla, joka sijaitsee tunnelissa, ja jossa on vain tukikerros ja ojat eivät ole syviä.



Huomiot: Yleisin tapaus rakenteelle, jossa on routalevy, on tunneli, jonka korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä. Kontingenssitaulusta nähdään, että yli kolmasosa kaikista routalevykohteista on nimenomaan näiden ennakkoehtojen mukaista rataa ja siitä 91 %:lla korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä.

Taulukko 45. Kr–Erv Hypoteesi 41 kysymykseen 7.

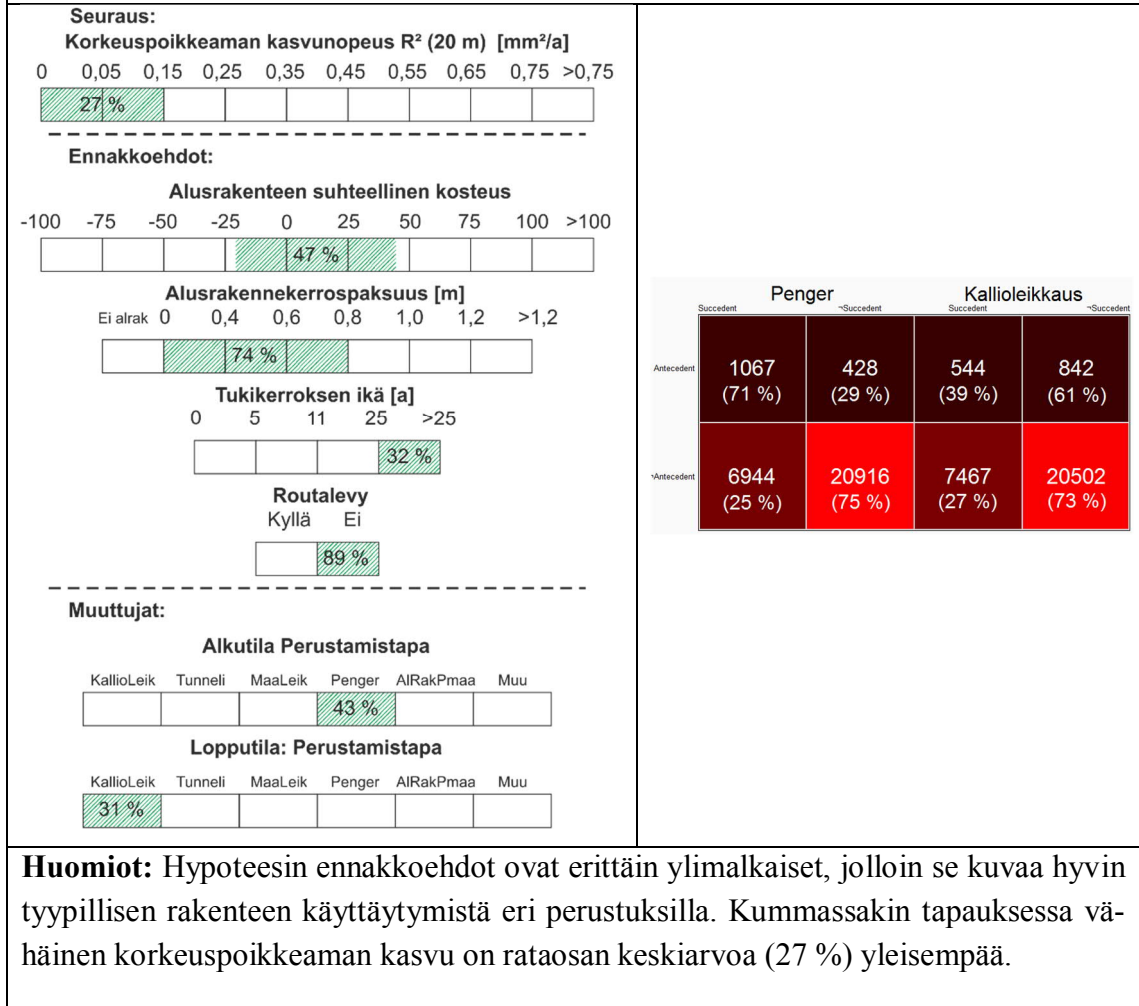
Hypoteesi 41: Kun radassa on routalevy ja rakenne ei sijaitse tunnelissa, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 85 %:lla sellaisesta radasta, jonka maarakenteiden paksuus on 1,0–1,8 m, kallionpintaa ei ole havaittu ja pohjamaan kosteus on pientä. Suurta geometrian heikkenemistä on koko rataosalla 18 %:lla rakenteista. Vastaava luku on 46 % niistä rakenteista, joissa on routalevy ja jotka eivät sijaitse tunneleissa.



Huomiot: On merkittävästi keskiarvoista yleisempää, että routalevykohteissa, jotka eivät ole tunnelissa, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta. Kun ehdot rajataan ohuille rakenteilla, joissa kallionpintaa ei ole havaittu, tulokset vahvistuvat edelleen ja valtaosalla rakenteista korkeuspoikkeaman kasvu on suurta.

Taulukko 46. Kr-Erv Hypoteesi 42 kysymykseen 8.

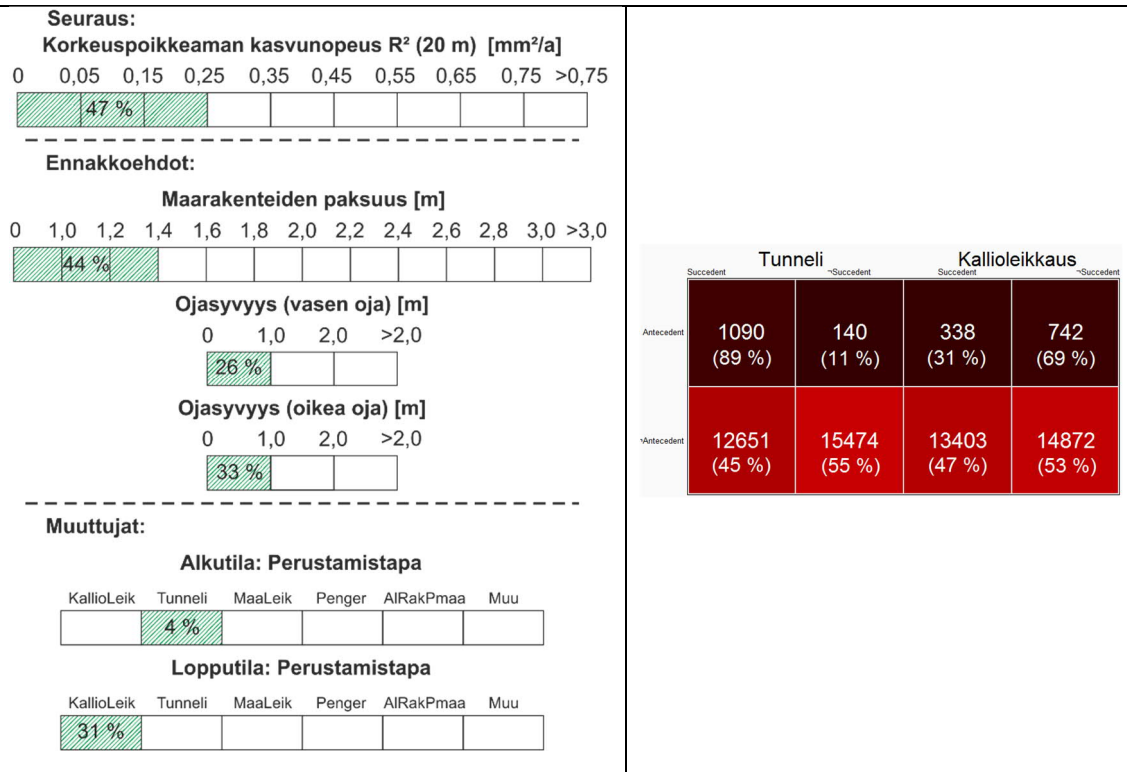
Hypoteesi 42: Erittäin vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on penkereelle perustetulla radalla 71 % ja kallioleikkauksella 39 %, kun alusrakenne on hieman kosteaa ja alle 0,8 m paksuinen, rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on vanhaa.



Huomiot: Hypoteesin ennakkoehdot ovat erittäin ylimalkaiset, jolloin se kuvaa hyvin tyypillisen rakenteen käyttäytymistä eri perustuksilla. Kummassakin tapauksessa vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu on rataosan keskiarvoa (27 %) yleisempää.

Taulukko 47. Kr-Erv Hypoteesi 43 kysymykseen 8.

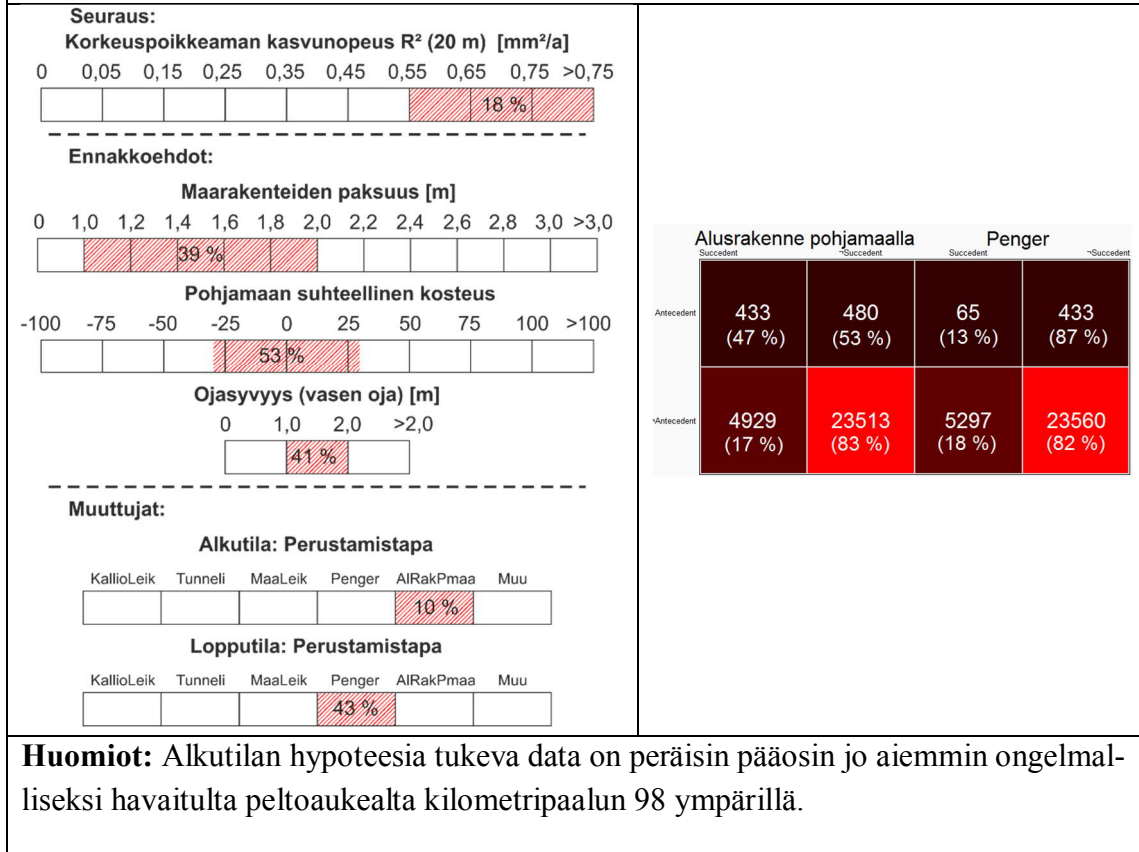
Hypoteesi 43: Vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on tunnelissa 89 % ja kallioleikkauksella 31 %, kun maakerrosten paksuus on alle 1,4 m ja ojat ovat matalat.



Huomiot: Tunnelissa rakenteet suoriutuvat hyvin huomattavasti yleisemmin kuin kallioleikkauksella. Kallioleikkauksilla vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu on hypoteesin mukaisilla ehdoilla harvinaisempaa kuin koko rataosalla keskiarvoisesti (47 %).

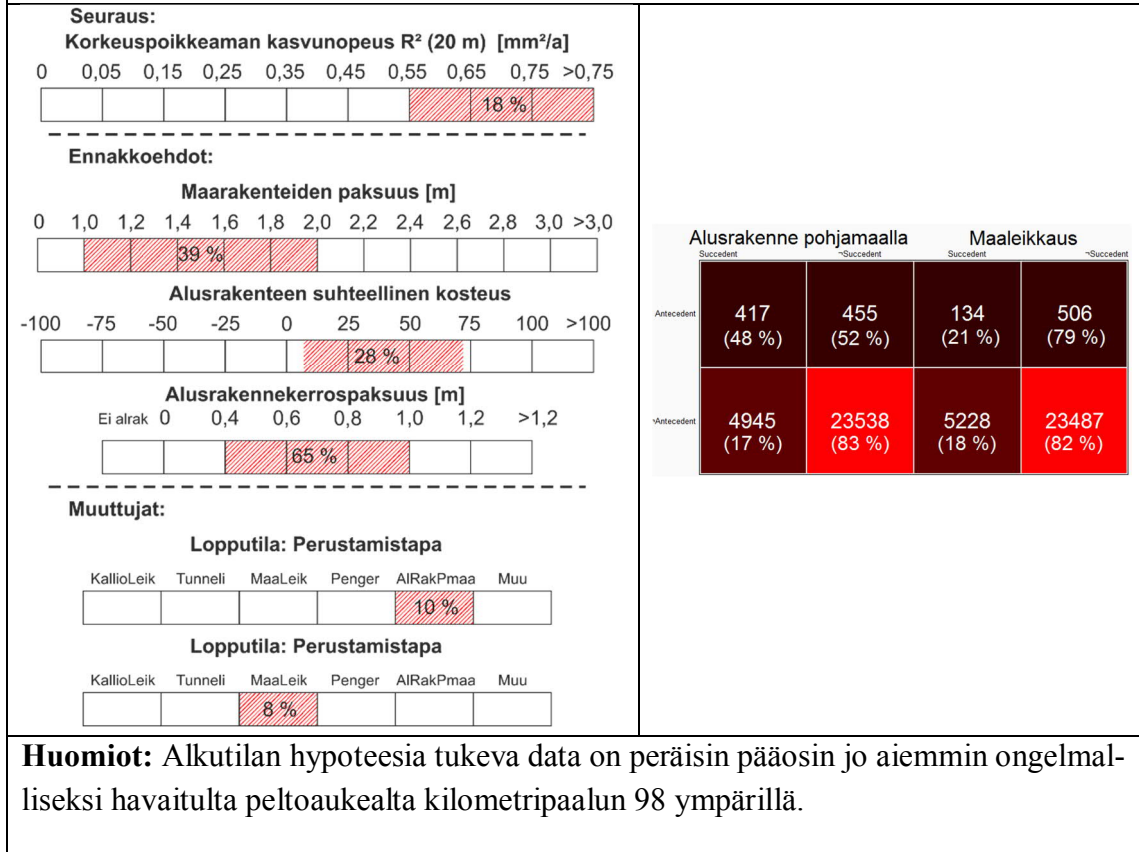
Taulukko 48. Kr-Erv Hypoteesi 44 kysymykseen 8.

Hypoteesi 44: Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on suoraan pohjamaan päälle perustetulla alusrakenteella 47 % ja penkereellä 13 %, kun maarakenteet ovat 1–2 m paksuiset, pohjankosteus on pieni ja ojat ovat 1–2 m syvyiset.



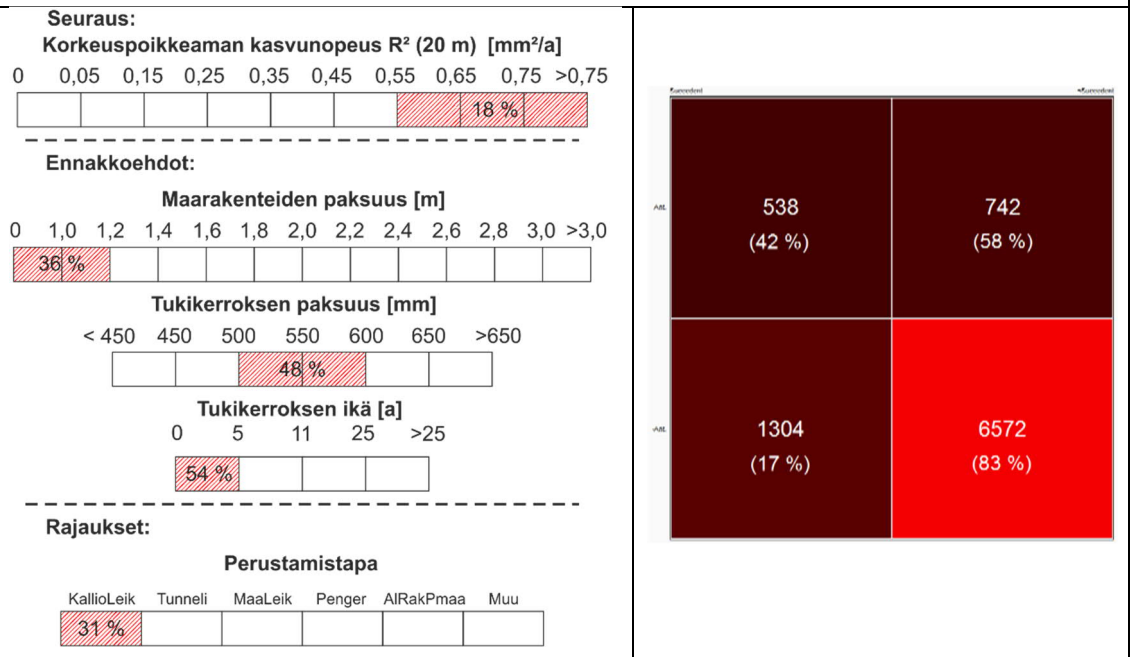
Taulukko 49. Kr–Erv Hypoteesi 45 kysymykseen 8.

Hypoteesi 45: Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on suoraan pohjamaan päälle perustetulla alusrakenteella 48 % ja maaleikkauksella 21 %, kun maarakenteet ovat 1–2 m paksuiset, alusrakenne on kosteaa ja paksuudeltaan 0,4–1,0 m.



Taulukko 50. Kr–Erv Hypoteesi 46 kysymykseen 8.

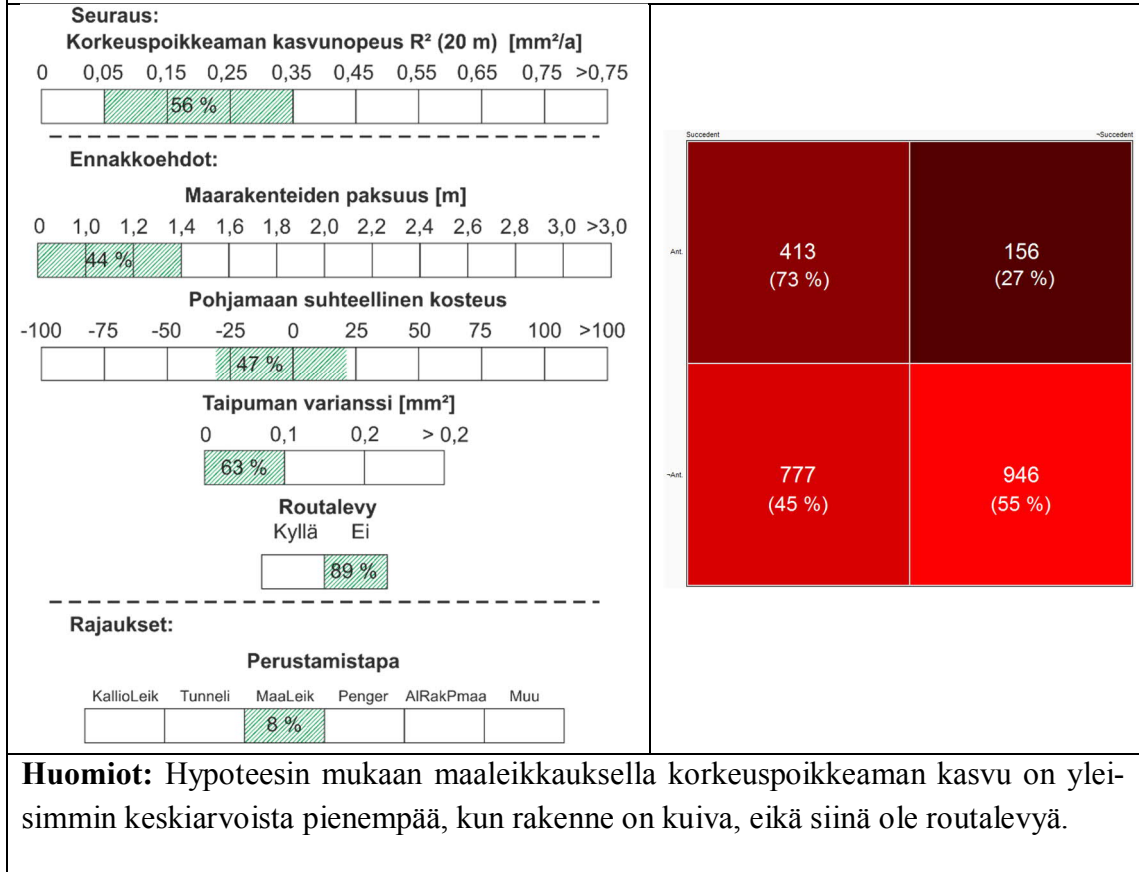
Hypoteesi 46: Kallioleikkauksella korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 42 % rakenteista, kun maarakenteet ovat alle metrin paksuiset, tukikerros on 500–600 mm paksuisista ja uutta. Kaikkiaan kallioleikkauksilla suurta korkeuspoikkeaman kasvu on 20 %:lla rakenteista.



Huomiot: Kallioleikkauksella on hieman keskiarvoista yleisempää, että korkeuspoikkeaman kasvu on suurta. Kun tukikerros on uutta, suurta korkeuspoikkeaman kasvua on jo merkittäväällä osalla radasta. Kun hypoteesin taustalla olevaa dataa tarkastellaan, huomataan, että data koostuu osittain yksittäisistä riveistä, mutta myös kolme pidempää jaksoa nousee esiin.

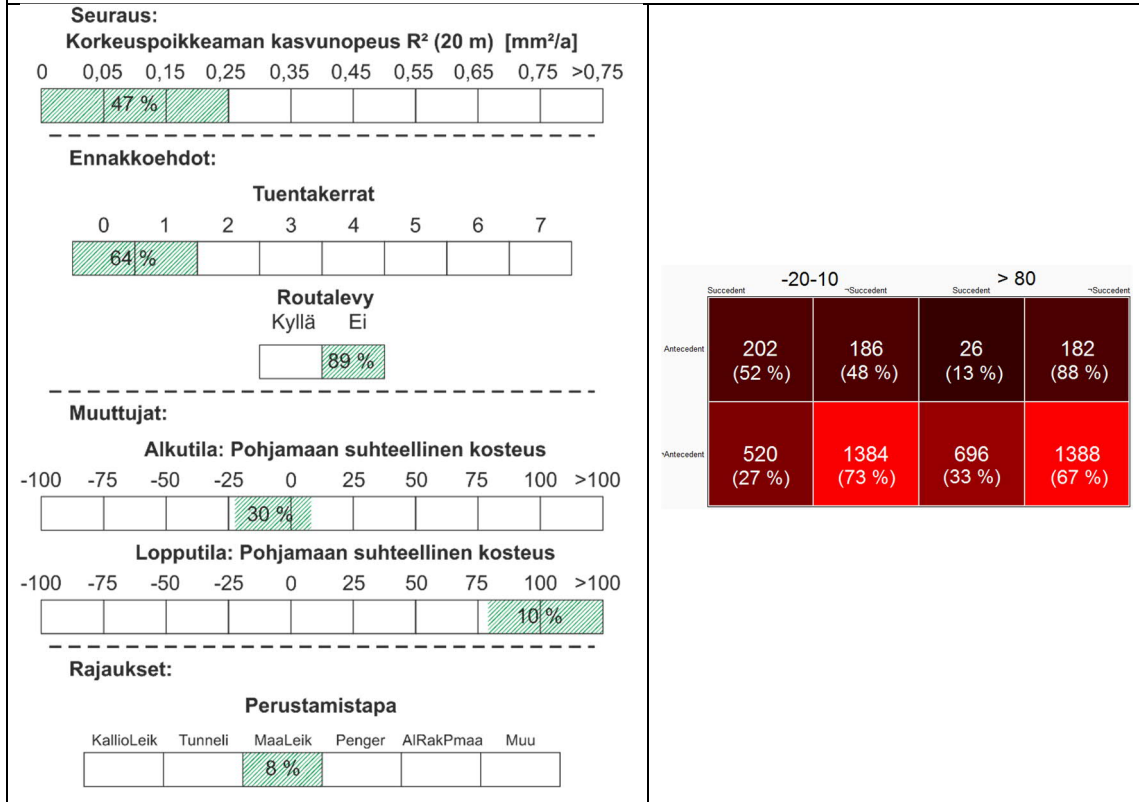
Taulukko 51. Kr-Erv Hypoteesi 47 kysymykseen 8.

Hypoteesi 47: Maaleikkauksella keskiarvoista vähäisempään korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 73 % sellaisista rakenteista, joiden maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, pohjamaan kosteus on keskiarvoista tai hieman sitä pienempää, rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on vähäistä.



Taulukko 52. Kr-Erv Hypoteesi 48 kysymykseen 8.

Hypoteesi 48: Maaleikkauksella pienen korkeuspoikkeaman osuus on 52 %, kun pohjamaan kosteus on keskiarvoista, ja 13 %, kun pohjamaan kosteus on erittäin suurta, sellaisella rakenteella, jossa ei ole routalevyä ja tuentoja on tehty enintään kerran seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana.

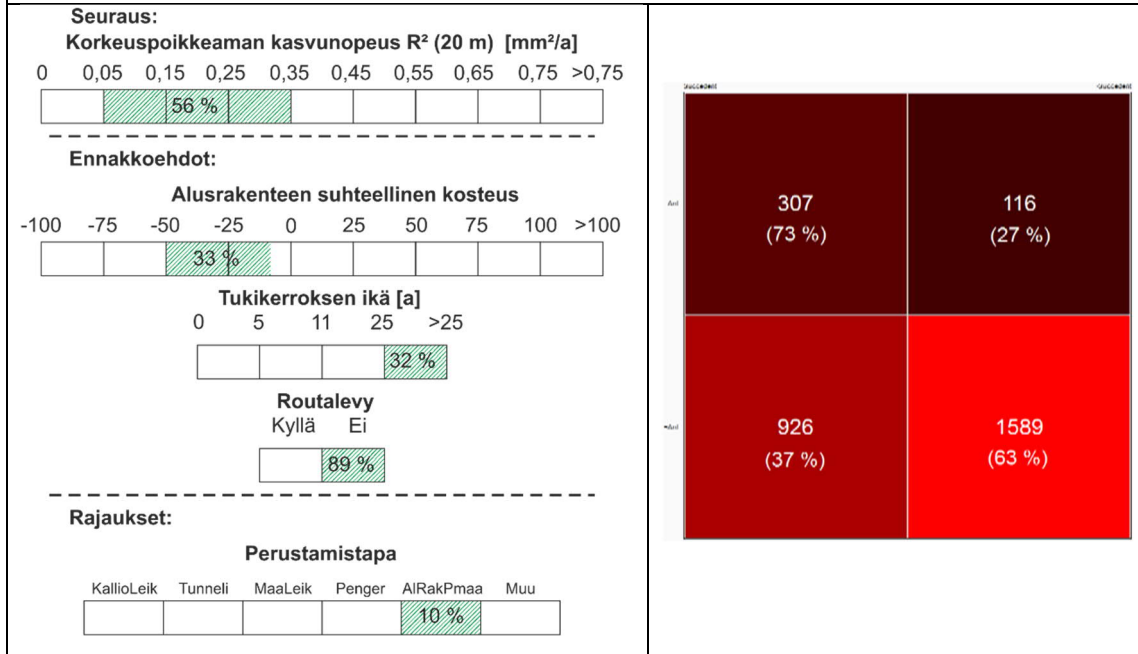


	-20-10		> 80	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	202 (52 %)	186 (48 %)	26 (13 %)	182 (88 %)
*Antecedent	520 (27 %)	1384 (73 %)	696 (33 %)	1388 (67 %)

Huomiot: Tulos vahvistaa käsitystä siitä, että pohjamaan kosteudella on merkittävä vaikutus erityisesti ohuilla rakenteilla.

Taulukko 53. Kr–Erv Hypoteesi 49 kysymykseen 8.

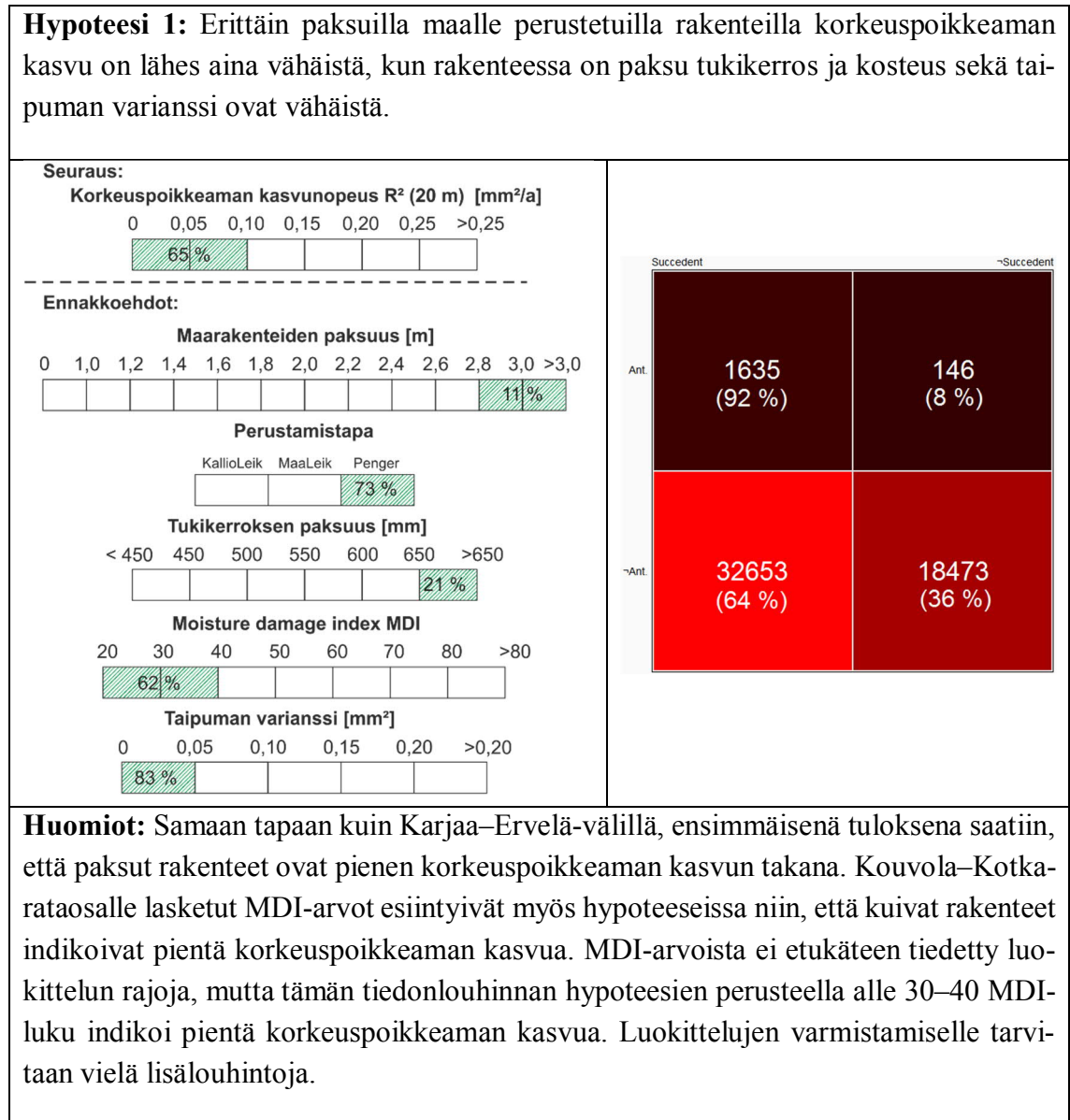
Hypoteesi 49: Keskiarvoista pienempää korkeuspoikkeaman kasvua on 73 %:lla rakenteista, joiden alusrakenne on perustettu suoraan pohjamaan päälle, kun alusrakenne on kuivaa, rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on vanhaa.



Huomiot: Ohuella rakenteella keskiarvoista pienempi korkeuspoikkeaman kasvu voi olla keskiarvoista yleisempää, mikäli pohjamaan kosteus on vähäistä, tukikerros vanhaa ja rakenteessa ei ole routalevyä.

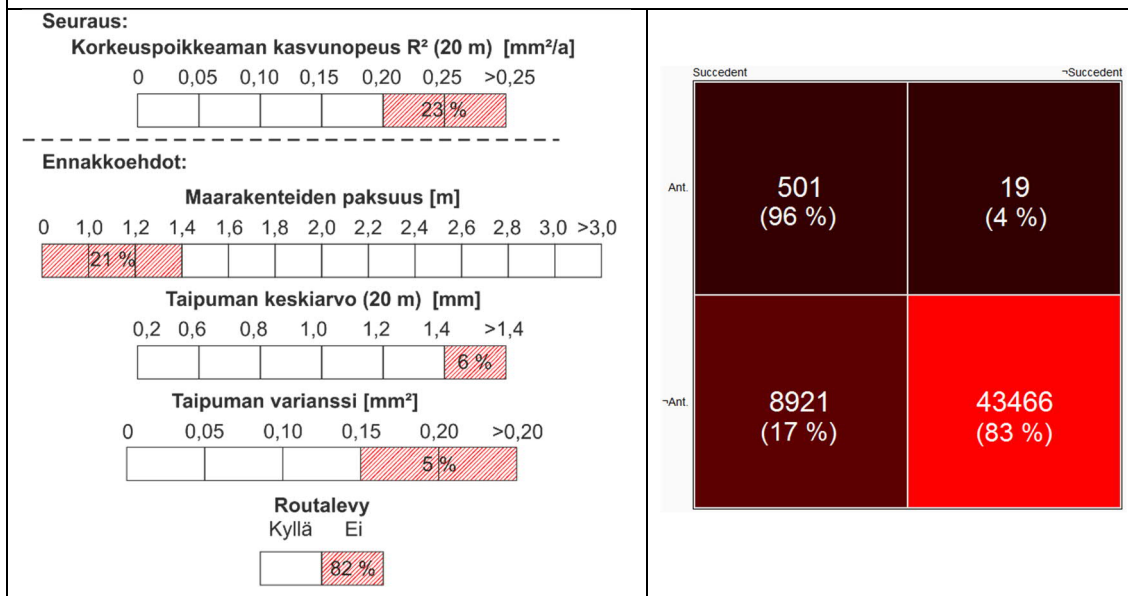
LIITE B: TIEDONLOUHINNAN TUOTTAMIA HYPOTEESEJA KOUVOLA-KOTKA-VÄLILTÄ

Taulukko 54. Kvl–Kot hypoteesi 1 kysymykseen 1.



Taulukko 55. Kvl–Kot hypoteesi 2 kysymykseen 1.

Hypoteesi 2: Ohuilla rakenteilla (< 1,4 m) korkeuspoikkeaman kasvu on lähes aina (96 %) suurta, kun rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuma sekä taipuman varianssi ovat suurta.



Huomiot: Hypoteesia tukeva data on peräisin pääasiassa vaihdealuilta ja Kotkan sataman puupölkkyraiteelta. Hypoteesia tukeva data Kotkan satamassa alkaa lähes metrilleen siitä, mistä alkaa puuratapölkkyraide ja jatkuu mittausten loppuun asti. Hypoteesiin liittyvät vaihteet ovat usealta eri liikennepaikalta.

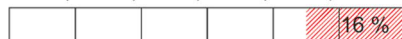
Taulukko 56. Kvl–Kot hypoteesi 3 kysymykseen 2.

Hypoteesi 3: Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 87 %:lla sellaisista rakenteista, jotka on perustettu penkereelle, mutta pengerpaksuus on pieni (< 0,5 m), ja taipuman sekä taipuman varianssin arvot ovat suuret.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

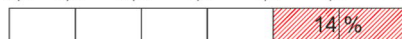
Pengerpaksuus [m]

Ei pengerta 0 0,5 1,0 1,5 2,0 >2,0



Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



Taipuman varianssi [mm²]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



	Succedent	~Succedent
Ant.	895 (87 %)	136 (13 %)
~Ant.	7443 (14 %)	44433 (86 %)

Huomiot: Ohuesta maarakenteesta ja suuresta taipumasta seuraa tyypillisesti suurta korkeuspoikkeaman kasvua. Tällaisia hypoteeseja oli valtaosa saaduista hypoteeseista. Maarakenne on ohut, kun penkereelle perustetun rakenteen pengerpaksuus on alle 0,5 m.

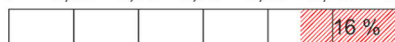
Taulukko 57. Kvl–Kot hypoteesi 4 kysymykseen 2.

Hypoteesi 4: Korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (86 %) suurta, kun rakenteen kosteus ja taipuman varianssi ovat suurta.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Taipuman varianssi [mm^2]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



	Succedent	~Succedent
Ant	732 (86 %)	116 (14 %)
~Ant	7606 (15 %)	44453 (85 %)

Huomiot: Rakenteen suuri kosteus on myös tekijänä suuressa korkeuspoikkeaman kasvussa. Hypoteesia puoltava data on peräisin pääasiassa vaihdealueilta, joissa maatutkausta häiritsevät vasta- ja siipikiskot, joten pelkästään tämän hypoteesin perusteella ei voida olla täysin varmoja rakenteen kosteuden vaikutuksesta korkeuspoikkeaman kasvuun.

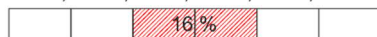
Taulukko 58. Kvl–Kot hypoteesi 5 kysymykseen 2.

Hypoteesi 5: Korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista suurempaa 44 %:lla sellaisesta radasta, jonka maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, alusrakennepaksuus on 0,4–0,8 m, alusrakenteen kosteus on tyypillistä suurempaa, taipuman keskiarvo on suuri ja kohde ei sijaitse vaihdealueella.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

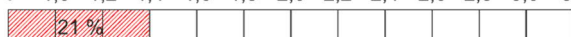
0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

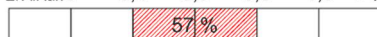
Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Alusrakenteen paksuus [m]

Ei AlRak 0 0,4 0,6 0,8 1,0 >1,0



Alusrakenteen kosteusindeksi

<30 30 40 50 60 70 80 >80



Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



Vaihde

Vaihde Ei vaihdetta



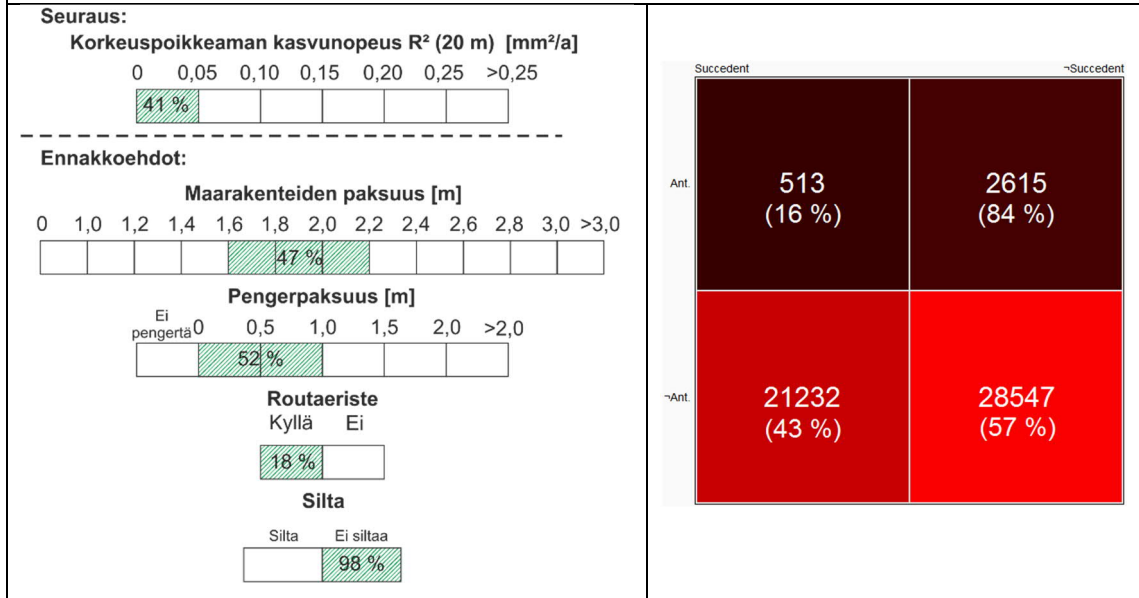
Succedent ~Succedent

Ant.	318 (44 %)	409 (56 %)
~Ant.	8156 (16 %)	44024 (84 %)

Huomiot: Ohuilla ja kosteilla rakenteilla, korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti keskiarvoista suurempaa.

Taulukko 59. Kvl–Kot hypoteesi 6 kysymykseen 2.

Hypoteesi 6: Kun maarakenteiden paksuus on 1,6–2,2 metriä, rakenteessa on routalevy ja pengertä on alle metri, eikä kohde ole sillalla, pientä korkeuspoikkeaman kasvua on vain 16 % radasta, kun muualla rataosalla vastaava luku on 43 %.



Huomiot: Niillä 1,6–2,2 metrin paksuisilla rakenteilla, joiden rakenteissa on tulkittu olevan routalevy, on keskiarvoista harvinaisempi yhteys pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun.

Taulukko 60. Kvl–Kot hypoteesi 7 kysymykseen 3.

Hypoteesi 7: Suuri korkeuspoikkeaman kasvu on yhtä yleistä alle 1,4 m paksuisilla rakenteilla (84 %) kuin pieni korkeuspoikkeaman kasvu on 1,6–2,0 m paksuisilla rakenteilla (83 %), kun rata on perustettu penkereelle, rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on ohut (< 450 mm).

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

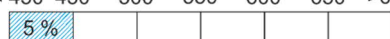
0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

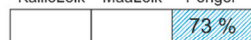
Tukikerroksen paksuus [mm]

< 450 450 500 550 600 650 >650



Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Routalevy

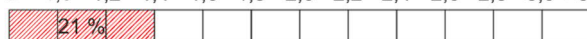
Kyllä Ei



Muuttujat:

Alkutila: Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Lopputila: Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



	< 1,4 m		1,6-2,0 m	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	411 (84 %)	81 (16 %)	441 (83 %)	93 (17 %)
~Antecedent	11998 (23 %)	40417 (77 %)	33847 (65 %)	18526 (35 %)

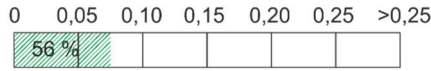
Huomiot: Tulosta luetaan siten, että sinisellä värjätty parametrin pysyvät aina samoina. Vastauksena on kaksi rinnakkaista hypoteesia, jossa toisessa (punaisella) maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m ja korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 83 %:lla radasta. Toinen hypoteesi (vihreällä) taas kertoo, että samoilla ennakkoehdoilla (sinisellä) 1,6–2,0 m paksuisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 84 %:lla radasta.

Näin ollen on yhtä yleistä, että ohuella rakenteella korkeuspoikkeaman kasvu on suurta kuin paksulla rakenteella vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu, kun rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerros on ohut. Kummatkin yhteydet ovat keskiarvoista merkittävästi yleisempiä.

Taulukko 61. Kvl–Kot hypoteesi 8 kysymykseen 3.

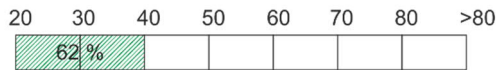
Hypoteesi 8: 1,4–1,6 m paksuisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (87 %) vähäistä, kun rakenteet ovat kuivat, taipuma ja taipuman varianssi ovat vähäistä, eikä rakenteessa ole routalevyä.

Seuraus:
Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]



Ennakkoehdot:

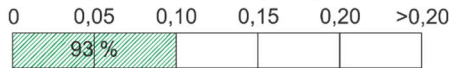
Moisture damage index MDI



Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]



Taipuman varianssi [mm^2]



Silta

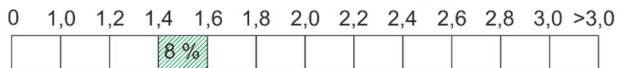


Routalevy



Rajaukset:

Maarakenteiden paksuus [m]

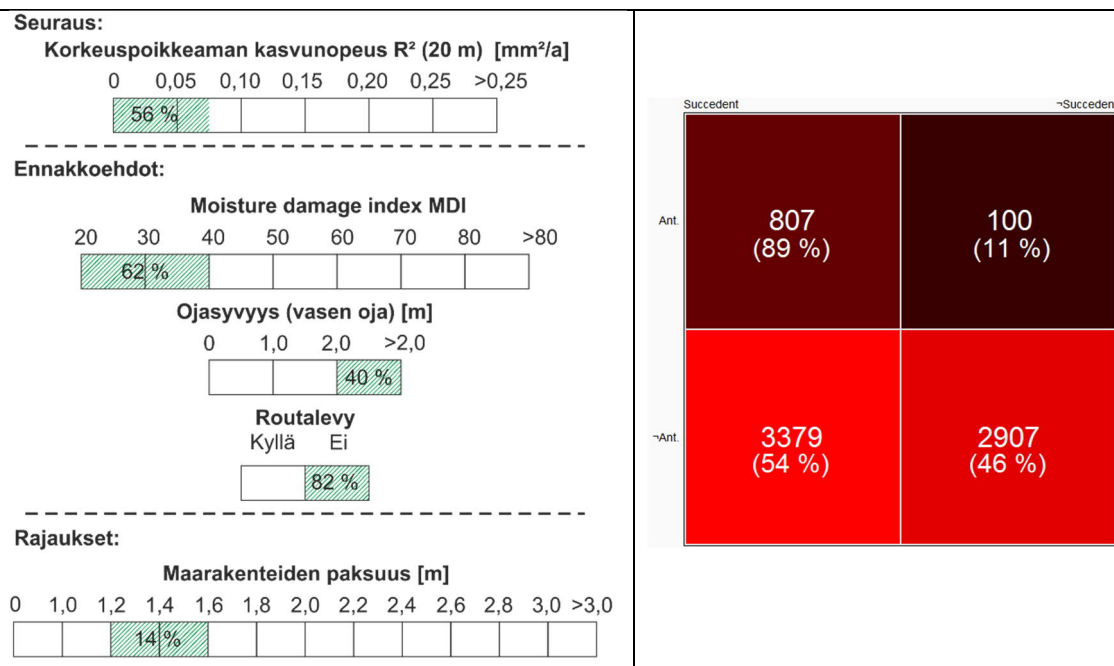


	Succedent	~Succedent
Ant.	1039 (87 %)	158 (13 %)
~Ant.	1485 (54 %)	1279 (46 %)

Huomiot: Hypoteesin tuloksista voidaan tulkita, että 1,4–1,6 metrin paksuisilla rakenteilla keskiarvoista suurempi korkeuspoikkeaman kasvu on melko harvinaista. Suurimmalla osasta rakenteista korkeuspoikkeaman kasvu on pienempää kuin keskiarvoinen kasvu. Kuivat rakenteet selittävät osittain tämän paksuisten rakenteiden hyvää kestävyttä, mutta kun dataa tutkitaan tarkemmin, huomataan, että pohjamaa vaihtelee hypoteesia puoltavilla riveillä kallion, moreenin ja silttisen saven välillä. Pelkkä pohjamaan materiaali ei siis näyttäisi määrävän ohuen rakenteen käyttäytymistä.

Taulukko 62. Kvl–Kot hypoteesi 9 kysymykseen 3.

Hypoteesi 9: Ohuilla rakenteilla (1,2–1,6 m) korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (89 %) vähäistä, jos rakenne on kuiva, siinä ei ole routalevyä ja ojat ovat syvät.



Huomiot: Suuri ojasyvyys esiintyi hypoteeseissa tekijänä, kun korkeuspoikkeaman kasvu oli pientä ohuilla rakenteilla. Tämä viittaa siihen, että rakennekerrospaksuuden lisäksi korkeuspoikkeaman kasvuun merkittävä tekijä on kuivatus ja rakenteiden kosteus.

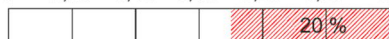
Taulukko 63. Kvl–Kot hypoteesi 10 kysymykseen 3.

Hypoteesi 10: Alle 1,6 m paksuisen rakenteen korkeuspoikkeaman kasvu on lähes aina (97 %) suurta, kun rakenne perustettu penkereelle, se on kostea, siinä ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on suurta.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

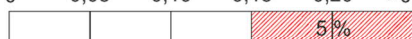
Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Taipuman varianssi [mm^2]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Routalevy

Kyllä Ei



Rajaukset:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0

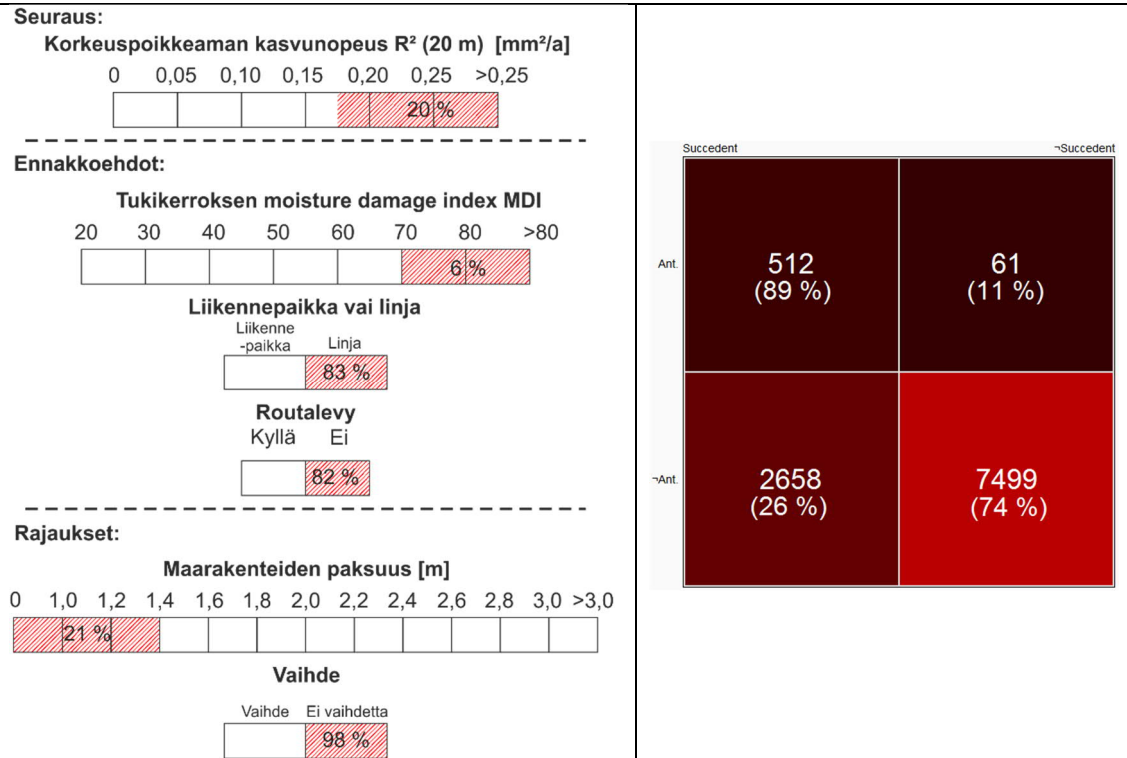


	Succedent	~Succedent
Ant.	501 (97 %)	13 (3 %)
~Ant.	3804 (26 %)	10570 (74 %)

Huomiot: Tiedonlouhinnan tulosten perusteella kosteudella on suuri vaikutus ohuiden rakenteiden käyttäytymiseen. MDI-arvo 40 näyttäisi toimivan jonkinlaisena rajana sille, onko rakenteessa ongelmia vai ei. Myöhemmin kosteuden vaikutusta tutkitaan vielä tarkemmin. Myös taipuman varianssi näyttäneen vakiintuvan korkeuspoikkeaman kasvun indikaattoriksi. Hypoteesia tukevassa datassa oli mukana vaihteita, mikä ei ole toivottua, sillä niissä virheet korostuvat.

Taulukko 64. Kvl–Kot hypoteesi 11 kysymykseen 3.

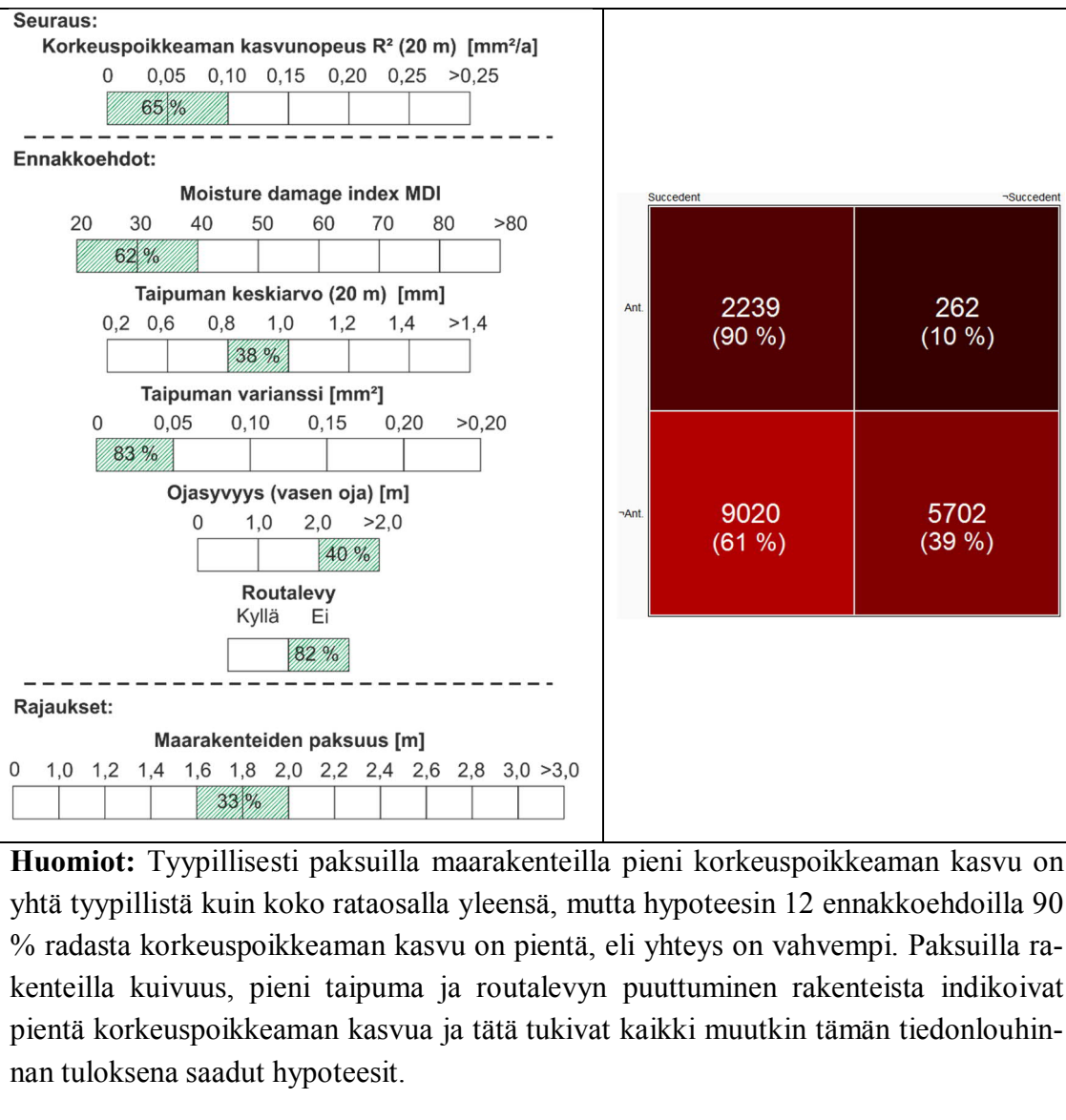
Hypoteesi 11: Kun maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, eikä kohde ole vaihdealueella, korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (89 %) suurta, kun rata sijaitsee linjalla, rakenteessa ei ole routalevyä ja kosteus on todella suuri.



Huomiot: Kun vaihteet on poistettu tiedonlouhinnasta, tuloksen merkitys ei muutu, mutta hypoteesiin valikoituneet rakennekerrospaksuudet ovat ohuemmat ja rakenteet kosteammat. Tukikerroksen MDI arvo on hypoteesissa yli 70, mikä on melko harvinaista rataosalla.

Taulukko 65. Kvl–Kot hypoteesi 12 kysymykseen 3.

Hypoteesi 12: 1,6–2,0 m paksuisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä (90 %) vähäistä, kun kosteus on vähäistä, rakenteessa ei ole routalevyä, taipuman keskiarvon ja taipuman varianssin arvot ovat vähäisiä ja ojat ovat syvät.



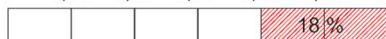
Taulukko 66. Kvl–Kot hypoteesi 13 kysymykseen 3.

Hypoteesi 13: 1,6–2,2 m paksuisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta yli puolella rakenteista (51 %), kun rakenteessa on routalevy, taipumat ovat suuria ja ojat syvät. Vastaava luku muualla on 14 %.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



Silta

Silta Ei siltaa



Ojasyvyys (oikea oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Routalevy

Kyllä Ei



Rajaukset:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0

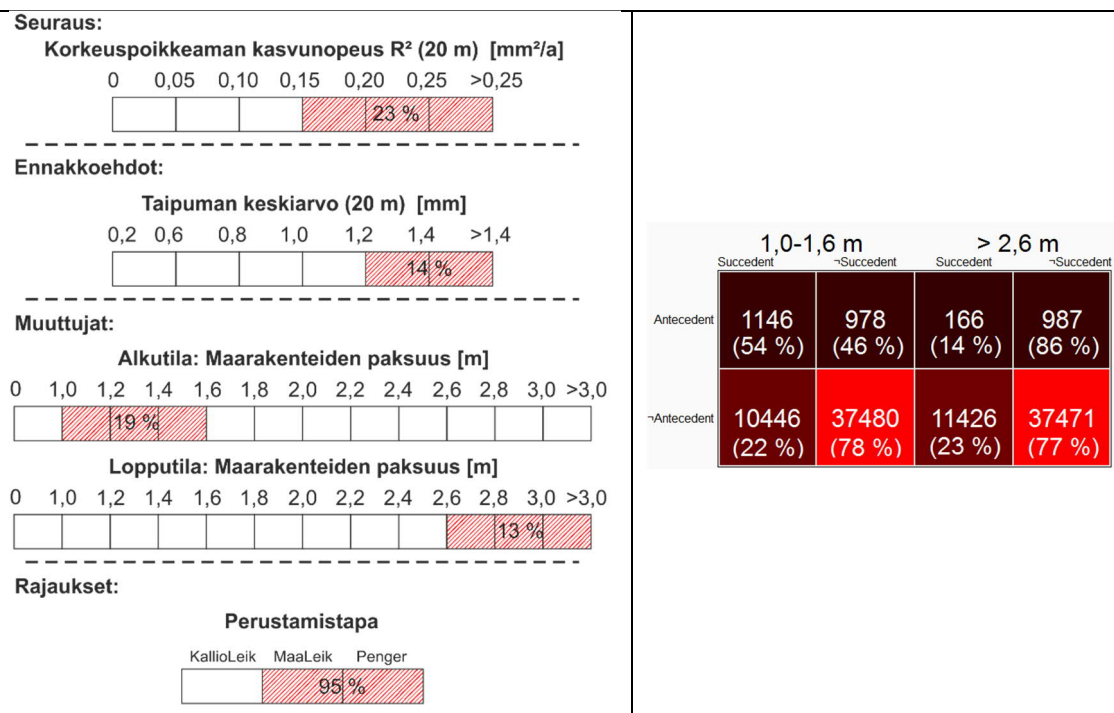


	Succedent	~Succedent
Ant.	851 (51 %)	807 (49 %)
~Ant.	3264 (14 %)	19876 (86 %)

Huomiot: Paksuilla rakenteilla suuret taipumat ja routalevyn käyttö indikoivat suuren korkeuspoikkeaman kasvun yleistymistä. Suuri ojasyvyys on tyypillisesti esiintynyt pienen korkeuspoikkeaman kasvun yhteydessä.

Taulukko 67. Kvl–Kot hypoteesi 14 kysymykseen 3.

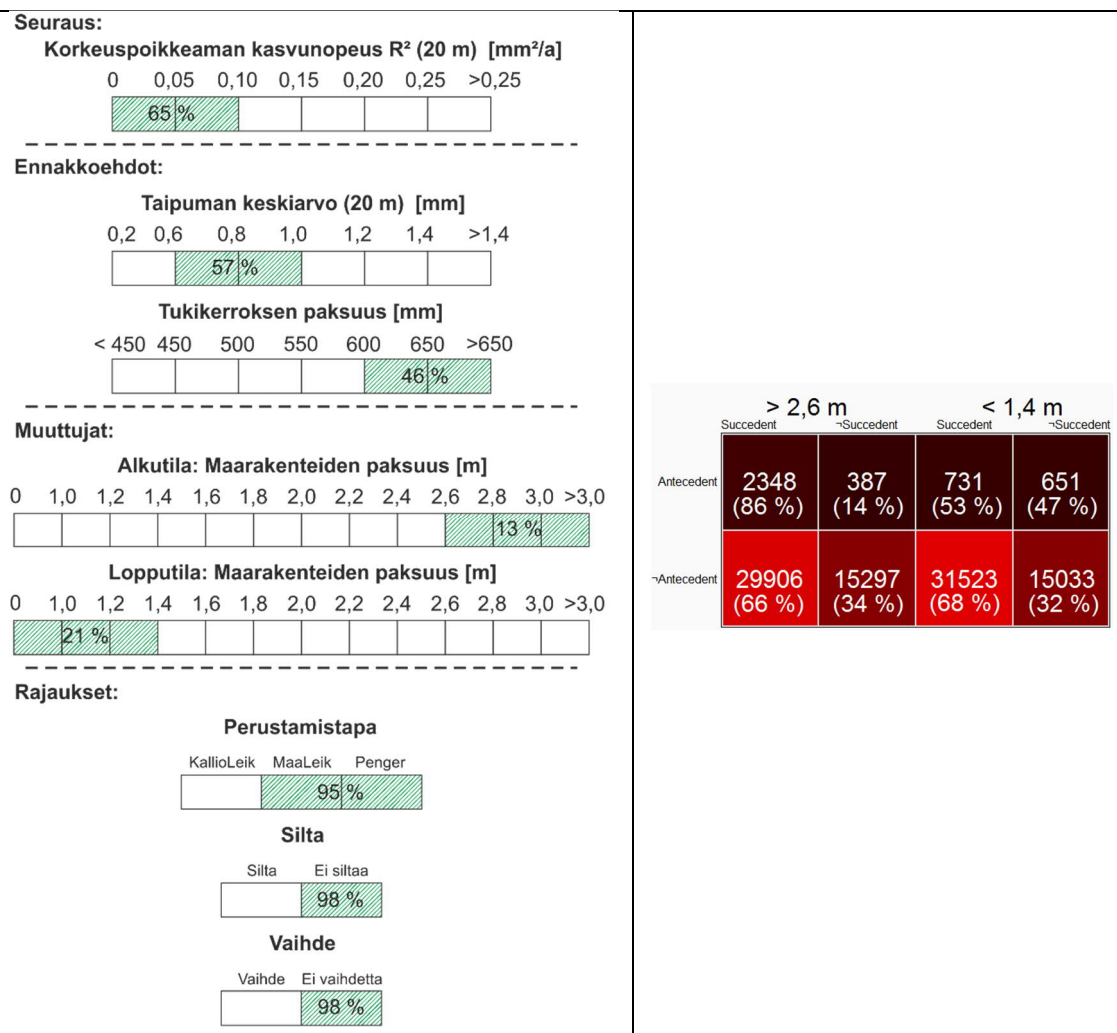
Hypoteesi 14: Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 54 %:lla 1,2–1,6 m rakenteiden paksuuksilla, kun vastaava luku on 14 % yli 2,6 m paksuisella rakenteella, kun taipuma on suurta ja rata on maaperustuksella. Suurta korkeuspoikkeaman kasvua on yli 20 %:lla kaikesta maalle perustetusta radasta.



Huomiot: Hypoteesi vahvistaa kuvaa siitä, että rakenteiden paksuuden kasvattaminen vähentää suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuutta. Kuitenkin tässä täytyy ottaa huomioon, että vaihteet ovat Kouvola–Kotka-rataosalla tyypillisesti ohuilla maarakenteilla ja ne saattavat vääristää tuloksia. Yli 2,6 m paksuisilla rakenteilla vaihteita on vain 76 rivillä, kun taas 1,2–1,6 metrin paksuisilla rakenteilla vaihteita on 262 rivillä. Seuraavaksi testattiinkin, säilyykö tämä vahva yhteys, kun datasta poistetaan vaihteet ja sillat.

Taulukko 68. Kvl–Kot hypoteesi 15 kysymykseen 3.

Hypoteesi 15: Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 86 %:lla yli 2,6 m paksuisilla rakenteilla, kun taas vastaava luku alle 1,4 m paksuisilla rakenteilla on 53 %, kun taipumat ovat vähäisiä ja tukikerros on paksu. Korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 67 %:lla kaikesta maalle perustetusta radasta, kun vaihteita tai siltoja ei huomioida.



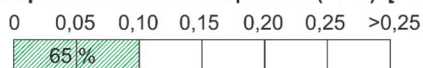
Huomiot: Hypoteesin 14 väittämä saatiin myös tällä loughinnalla esiin. Erittäin paksuilla rakenteilla on siis tyypillisesti pienempää korkeuspoikkeaman kasvua kuin ohuilla rakenteilla. Kuitenkin myös toisenlaisia tuloksia saatiin. Kun sillat poistetaan datasta, vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus suurenee. Toisin sanoen, silloilla ja vaihteilla on tyypillisesti suurta korkeuspoikkeaman kasvua.

Taulukko 69. Kvl–Kot hypoteesi 16 kysymykseen 3.

Hypoteesi 16: Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 74 %:lla alle 1,4 m paksuisista rakenteista, kun taas vastaava luku 1,8–2,4 m paksuisilla rakenteilla on 36 %, kun rakenteessa on routalevy, taipuman keskiarvo ja taipuman varianssi ovat vähäisiä. Korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 67 %:lla kaikesta maalle perustetusta radasta, kun vaihteita tai siltoja ei huomioida.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

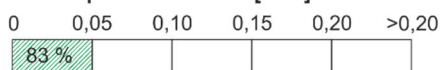


Ennakkoehdot:

Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]



Taipuman varianssi [mm²]



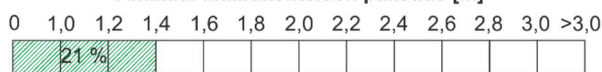
Routalevy

Kyllä Ei

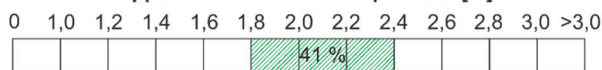


Muuttujat:

Alkutila: Maarakenteiden paksuus [m]



Lopputila: Maarakenteiden paksuus [m]



Rajaukset:

Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Silta

Silta Ei siltaa



Vaihde

Vaihde Ei vaihdetta



	< 1,4 m		1,8-2,4 m	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	1327 (74 %)	470 (26 %)	478 (36 %)	834 (64 %)
~Antecedent	30927 (67 %)	15214 (33 %)	31776 (68 %)	14850 (32 %)

Huomiot: Hypoteesi 16 antaa vahvaa indikaatiota siitä, että ohuet rakenteet suoriutuvat hyvin, kun taipuma on suurta ja rakenteessa on routalevy, mutta samoilla ehdoilla noin 2 metrin paksuiset rakenteet eivät. Vastaavanlaisia hypoteeseja saatiin useita.

Taulukko 70. Kvl–Kot hypoteesi 17 kysymykseen 3.

Hypoteesi 17: 1,6–2,4 m paksuisella rakenteella korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti erittäin vähäistä, kun rakenteet ovat kuivat, pengerpaksuus on 0,5–1,0 m ja rakenteessa ei ole routalevyä.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

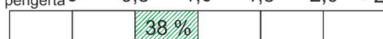
Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Pengerpaksuus [m]

Ei pengertä 0 0,5 1,0 1,5 2,0 >2,0



Routalevy

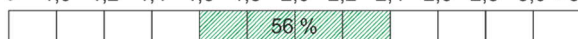
Kyllä Ei



Rajaukset:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Silta

Silta Ei siltaa



Vaihde

Vaihde Ei vaihdetta



	Succedent	~Succedent
Ant.	1512 (81 %)	358 (19 %)
~Ant.	17605 (58 %)	12793 (42 %)

Huomiot: Hypoteesit viittasivat siihen, että 1,6–2,4 metrin paksuisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä pientä.

Taulukko 71. Kvl–Kot hypoteesi 18 kysymykseen 3.

Hypoteesi 18: 1,6–2,4 m paksuisella rakenteella korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti suurta, kun ojat ovat syvät, rakenteessa on routalevy ja taipuman varianssi on tyypillistä suurempaa.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Ojasyvyys (oikea oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Taipuman varianssi [mm^2]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



Routalevy

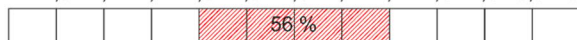
Kyllä Ei



Rajaukset:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Silta

Silta Ei siltaa



Vaihde

Vaihde Ei vaihdetta



	Succedent	~Succedent
Ant.	359 (74 %)	125 (26 %)
~Ant.	5262 (17 %)	26522 (83 %)

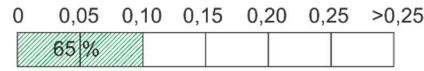
Huomiot: Hypoteesia 18 ei tue nyt yhtä paljon dataa kuin hypoteesissa 17, mutta edelleen tulokset ovat merkittävät.

Taulukko 72. Kvl–Kot hypoteesi 19 kysymykseen 3.

Hypoteesi 19: 1,6–2,4 m paksuisella maarakenteella vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 79 %, kun rakenteessa ei ole routalevyä ja 16 %, kun rakenteessa on routalevy, kun ojat ovat syviä ja tukikerros on alle 550 mm paksuinen.

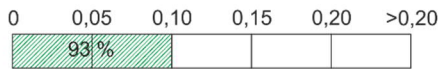
Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]

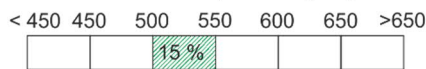


Ennakkoehdot:

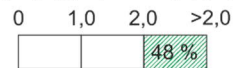
Taipuman varianssi [mm²]



Tukikerroksen paksuus [mm]



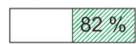
Ojasyvyys (oikea oja) [m]



Muuttujat:

Alkutila: Routalevy

Kyllä Ei



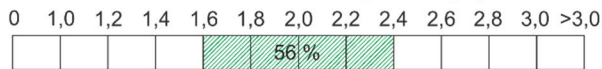
Lopputila: Routalevy

Kyllä Ei



Rajaukset:

Alkutila: Maarakenteiden paksuus [m]



Silta

Silta Ei siltaa



Vaihde

Vaihde Ei vaihdetta



	Ei routalevyä		Routalevy	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	1439 (79 %)	376 (21 %)	103 (16 %)	538 (84 %)
~Antecedent	20521 (67 %)	9932 (33 %)	21857 (69 %)	9770 (31 %)

Huomiot: On merkittävästi yleisempää, että 1,6–2,4 m paksuisilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä, kun rakenteessa ei ole routalevyä.

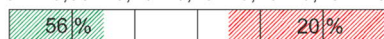
Taulukko 73. Kvl–Kot hypoteesi 20 kysymykseen 3.

Hypoteesi 20: 1,6–2,4 m paksuisella maarakenteella vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 72 %, kun rakenteessa ei ole routalevyä, kun ojat ovat syvät ja tukikerros on alle 550 mm paksuinen. Samoilla ehdoilla suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 69 %, kun rakenteessa on routalevy.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

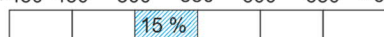
0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

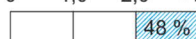
Tukikerroksen paksuus [mm]

< 450 450 500 550 600 650 >650



Ojasyvyys (oikea oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Muuttujat:

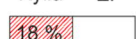
Alkutila: Routalevy

Kyllä Ei



Lopputila: Routalevy

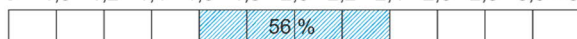
Kyllä Ei



Rajaukset:

Alkutila: Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Silta

Silta Ei siltaa



Vaihde

Vaihde Ei vaihdetta



	Ei routalevyä		Routalevy	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	1332 (72 %)	527 (28 %)	447 (69 %)	203 (31 %)
~Antecedent	17785 (58 %)	12624 (42 %)	5174 (16 %)	26444 (84 %)

Huomiot: 1,6–2,4 m paksuisessa rakenteessa pieni korkeuspoikkeaman kasvu on yhtä yleistä rakenteilla, joilla ei ole routalevyä, kuin suuri korkeuspoikkeaman kasvu on niillä rakenteilla, joilla on routalevy.

Taulukko 74. Kvl–Kot hypoteesi 21 kysymykseen 4.

Hypoteesi 21: Erittäin pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 75 % yli 650 mm paksuisella tukikerroksella ja 34 % 550–650 mm paksuisella tukikerroksella, kun rakenne on turpeelle rakennetulla penkereellä. Muualla rataosalla erittäin pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 41 %:lla rakenteista.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

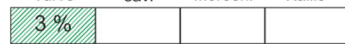
Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Pohjamaa

Turve Silttinen savi Moreeni Kallio



Muuttujat:

Alkutila: Tukikerroksen paksuus [mm]

< 450 450 500 550 600 650 >650



Lopputila: Tukikerroksen paksuus [mm]

< 450 450 500 550 600 650 >650



	> 650 mm		550-650 mm	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	504 (75 %)	168 (25 %)	285 (34 %)	559 (66 %)
~Antecedent	21241 (41 %)	30994 (59 %)	21460 (41 %)	30603 (59 %)

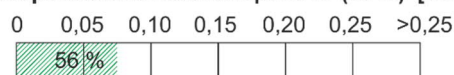
Huomiot: On keskiarvoista yleisempää, että korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin pientä turpeelle rakennetulla penkereellä, kun tukikerros on yli 650 mm paksuinen ja keskiarvoista harvinaisempaa, kun tukikerros on 550–650 mm paksuinen. Turpeelle perustettuja rakenteita on hyvin vähän, joten hypoteesin ennakkoehtoja ei toteuta kovinkaan suuri osa radasta.

Taulukko 75. Kvl–Kot hypoteesi 22 kysymykseen 4.

Hypoteesi 22: Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 90 % alle 450 mm paksuisella tukikerroksella ja 59 % 550–650 mm paksuisella tukikerroksella, kun rakenteen kosteudet ovat pieniä ja pohjamaana on silttistä savea. Muualla rataosalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 56 %:lla rakenteista.

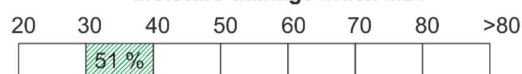
Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

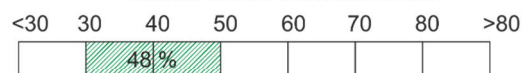


Ennakkoehdot:

Moisture damage index MDI



Tukikerroksen kosteusindeksi

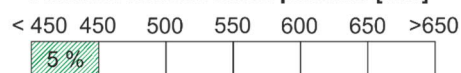


Pohjamaa

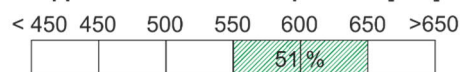


Muuttujat:

Alkutila: Tukikerroksen paksuus [mm]



Lopputila: Tukikerroksen paksuus [mm]

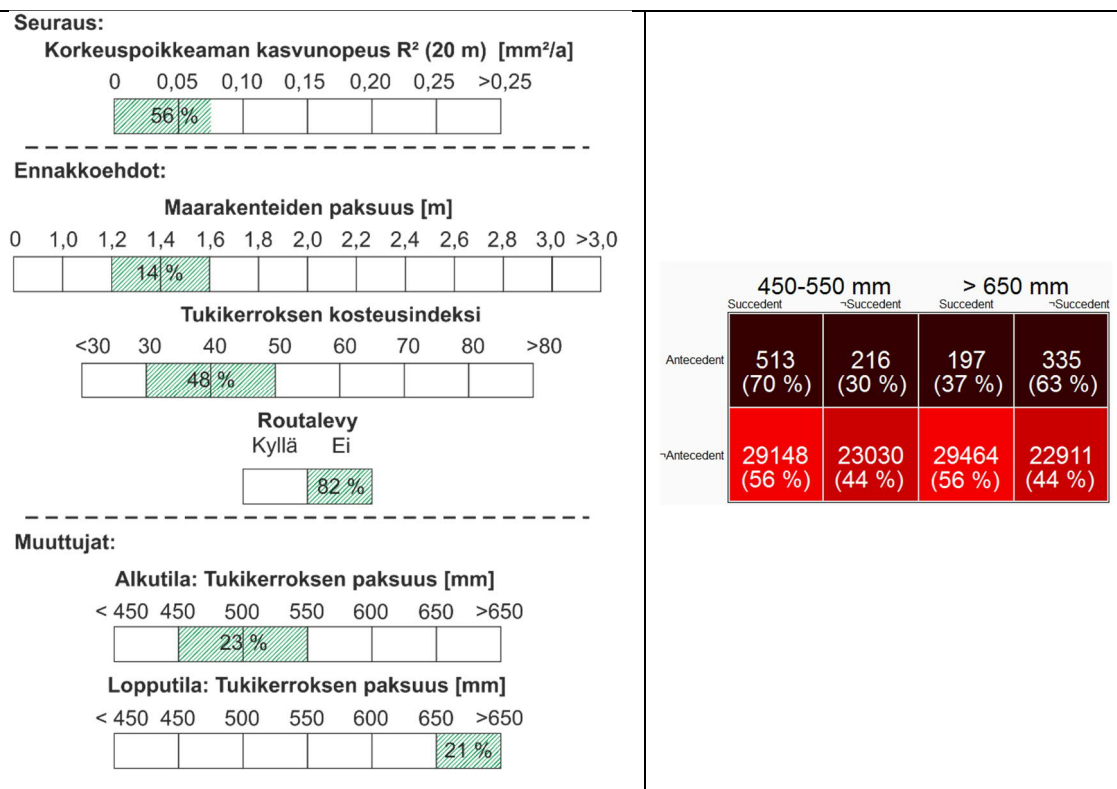


	< 450 mm		550-650 mm	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	540 (90 %)	62 (10 %)	2506 (59 %)	1746 (41 %)
~Antecedent	29121 (56 %)	23184 (44 %)	27155 (56 %)	21500 (44 %)

Huomiot: Ohuella tukikerroksella pieni korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin yleistä hypoteesin ennakkoehtojen toteutuessa. On hyvä huomata, että 550–650 mm paksuisilla rakenteillakin pieni korkeuspoikkeaman kasvu on myös keskiarvoista hieman yleisempää ennakkoehtojen mukaisella radalla.

Taulukko 76. Kvl–Kot hypoteesi 23 kysymykseen 4.

Hypoteesi 23: Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 70 % alle 450 mm paksuisella tukikerroksella ja 37 % yli 650 mm paksuisella tukikerroksella, kun rakenteet ovat ohuet (1,2–1,6 m), rakenteessa ei ole routalevyä ja tukikerroksen kosteus on vähäistä. Muualla rataosalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 56 %:lla rakenteista.



	450-550 mm		> 650 mm	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	513 (70 %)	216 (30 %)	197 (37 %)	335 (63 %)
~Antecedent	29148 (56 %)	23030 (44 %)	29464 (56 %)	22911 (44 %)

Huomiot: Ohuilla rakenteilla paksumpi tukikerros ei vaikuta lisäävän erittäin pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuutta.

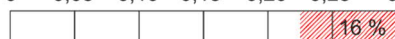
Taulukko 77. Kvl–Kot hypoteesi 24 kysymykseen 4.

Hypoteesi 24: Rakenteilla, joilla tukikerroksen paksuus on alle 450 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta 75 %:lla rakenteista, jotka ovat alle 1,6 m paksuisia ja penkereelle perustettuja, joissa ei ole routalevyä ja jotka eivät ole vaihdealueella. Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 26 %:lla rakenteista, joilla tukikerroksen paksuus on alle 450 mm.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

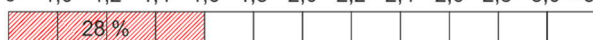
0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

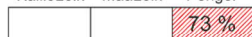
Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Routalevy

Kyllä Ei



Vaihde

Vaihde Ei vaihdetta



Rajaukset:

Tukikerroksen paksuus [mm]

< 450 450 500 550 600 650 >650



	Succedent	~Succedent
Ant.	403 (75 %)	133 (25 %)
~Ant.	214 (12 %)	1623 (88 %)

Huomiot: Ohuilla rakenteilla erittäin ohuella tukikerroksella on keskiarvoista vahvempi yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun. Hypoteesia tukeva data oli peräisin sillanpäädystä ja Kotkan sataman puupölkkyraiteelta. Näin ollen ei voida sanoa, että ohut tukikerros olisi ainakaan ainoa ongelma näissä kohteissa.

Taulukko 78. Kvl–Kot hypoteesi 25 kysymykseen 4.

Hypoteesi 25: Rakenteilla, joilla tukikerroksen paksuus on 450–650 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta 74 %:lla rakenteista, joilla koko rakenteen ja tukikerroksen kosteus ovat erittäin suurta, mutta rakenteessa ei ole routalevyä. Korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta 16 %:lla rakenteista, joilla tukikerroksen paksuus on 450–650 mm.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Tukikerroksen kosteusindeksi

<30 30 40 50 60 70 80 >80



Routalevy

Kyllä Ei



Rajaukset:

Tukikerroksen paksuus [mm]

< 450 450 500 550 600 650 >650

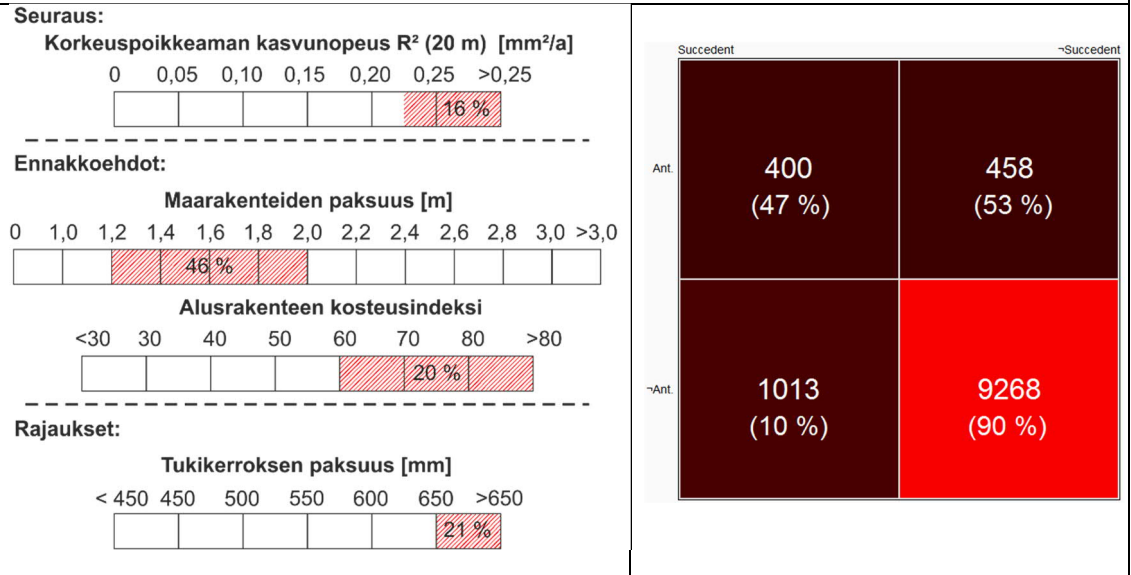


	Succedent	~Succedent
Ant.	527 (74 %)	186 (26 %)
~Ant.	5740 (15 %)	32901 (85 %)

Huomiot: Hypoteesien taustalla ollut data on peräisin pääasiassa vaihteilta, joten suuren korkeuspoikkeaman kasvun tai kosteuden ei voida johtuvan tukikerroksen paksuudesta.

Taulukko 79. Kvl–Kot hypoteesi 26 kysymykseen 4.

Hypoteesi 26: Rakenteilla, joilla tukikerroksen paksuus on yli 650 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on erittäin suurta 58 %:lla 1,2–2,0 m paksuisista rakenteista, joilla alusrakenteen kosteus on erittäin suurta. Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 13 %:lla rakenteista, joilla tukikerroksen paksuus on 650 mm.



Huomiot: Hypoteesien taustalla ollut data on peräisin pääasiassa vaihteilta, joten suuren korkeuspoikkeaman kasvun tai kosteuden ei voida johtuvan tukikerroksen paksuudesta.

Taulukko 80. Kvl–Kot hypoteesi 27 kysymykseen 4.

Hypoteesi 27: Korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 75 %:lla radasta, jonka tukikerroksen kosteus on erittäin suuri, kun taas alhaisemmalla kosteudella vastaava luku on 25 %, kun alusrakenteen kosteus on suuri ja taipumat ovat suuria.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

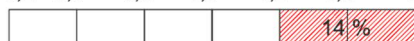
0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



Alusrakenteen kosteusindeksi

<30 30 40 50 60 70 80 >80



Muuttujat:

Alkutila: Tukikerroksen kosteusindeksi

<30 30 40 50 60 70 80 >80



Lopputila: Tukikerroksen kosteusindeksi

<30 30 40 50 60 70 80 >80

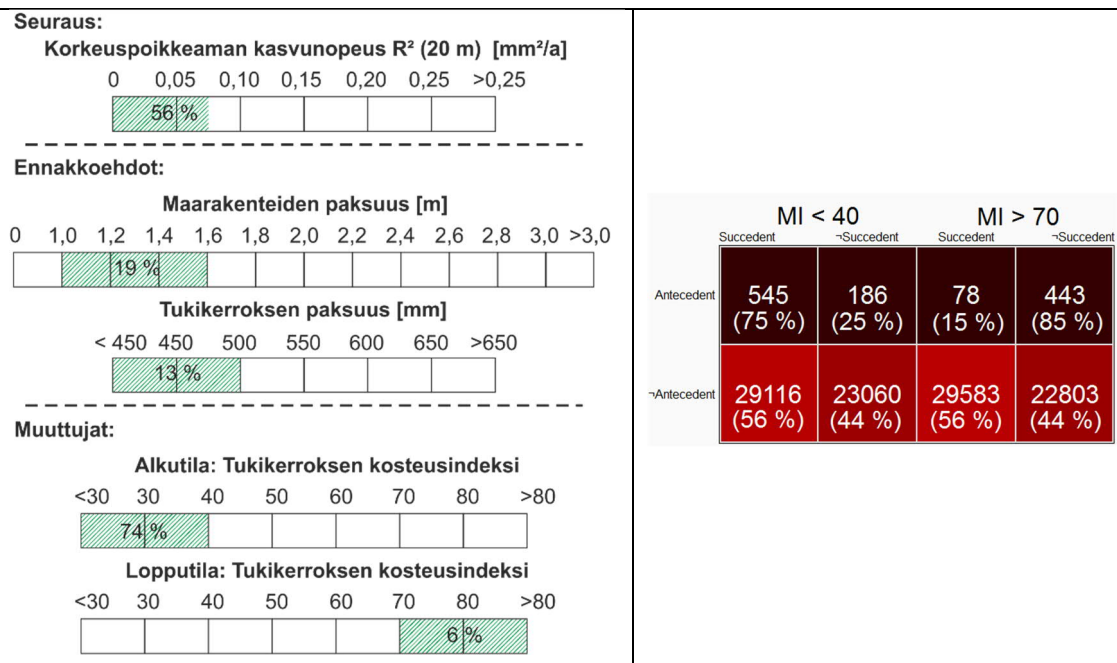


	MI > 70		MI = 30-50	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	737 (75 %)	241 (25 %)	217 (25 %)	663 (75 %)
~Antecedent	8685 (17 %)	43244 (83 %)	9205 (18 %)	42822 (82 %)

Huomiot: Vaikka alusrakenteen kosteus on suuri, jos tukikerros on kuiva, korkeuspoikkeaman kasvu ei ole pääasiassa suurta. Yleensä suuri taipuma on aiheuttanut suurta korkeuspoikkeaman kasvua, mutta kuivalla tukikerroksella sekään ei vaikuta suurimpien korkeuspoikkeaman kasvun luokkien yleisyyteen. Vastaavanlainen tulos saadaan toisinpäinkin hypoteesissa 28.

Taulukko 81. Kvl–Kot hypoteesi 28 kysymykseen 4.

Hypoteesi 28: Korkeuspoikkeaman kasvu on vähäistä 75 %:lla radasta, jonka tukikerroksen kosteus on vähäistä, kun taas erittäin suurella kosteudella vastaava luku on 15 %, kun maarakenteiden paksuus on 1,0–1,6 m ja tukikerros on alle 500 mm paksuinen.



Huomiot: Hypoteesien 27 ja 28 perusteella kuiva tukikerros johtaa vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun vaikeillakin rakenteilla. Kosteaa tukikerros viittaa suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

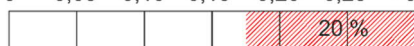
Taulukko 82. Kvl–Kot hypoteesi 29 kysymykseen 4.

Hypoteesi 29: Korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä suurta, kun tukikerroksen ja koko muun rakenteen kosteus on suurta ja rakenteessa ei ole routalevyä.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

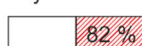
Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Routalevy

Kyllä Ei



Rajaukset:

Tukikerroksen kosteusindeksi

<30 30 40 50 60 70 80 >80



	Succedent	~Succedent
Ant.	1013 (81 %)	233 (19 %)
~Ant.	2642 (44 %)	3374 (56 %)

Huomiot: Hypoteesin data oli poikkeuksetta vaihteilta, siltojen päädyistä, alikuluilta ja rummuilta. Näissä tapauksissa ei voida sanoa, että tukikerroksen kosteus on ongelma näillä kohtaa, vaan tukikerroksen kosteus on seuraus muun rakenteen toimimattomuudesta. Toimimattomissa epäjatkuvuuskohtissa tukikerros tyypillisesti jauhautuu ja sen kosteus kasvaa. Vaihteen tapauksessa myös mittaustapa kasvattaa kosteuden arvoa.

Taulukko 83. Kvl–Kot hypoteesi 30 kysymykseen 5.

Hypoteesi 30: Vähäistä korkeuspoikkeaman kasvua on 86 %:lla rakenteista, joiden MDI-arvo on 20–40, kun vastaava luku on 38 % rakenteilla, joilla MDI-arvo on 50–80, kun rata on penkereellä ja rakenteessa ei ole routalevyä.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Perustamistapa



Routalevy

Kyllä Ei



Muuttujat:

Alkutila: Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Lopputila: Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80

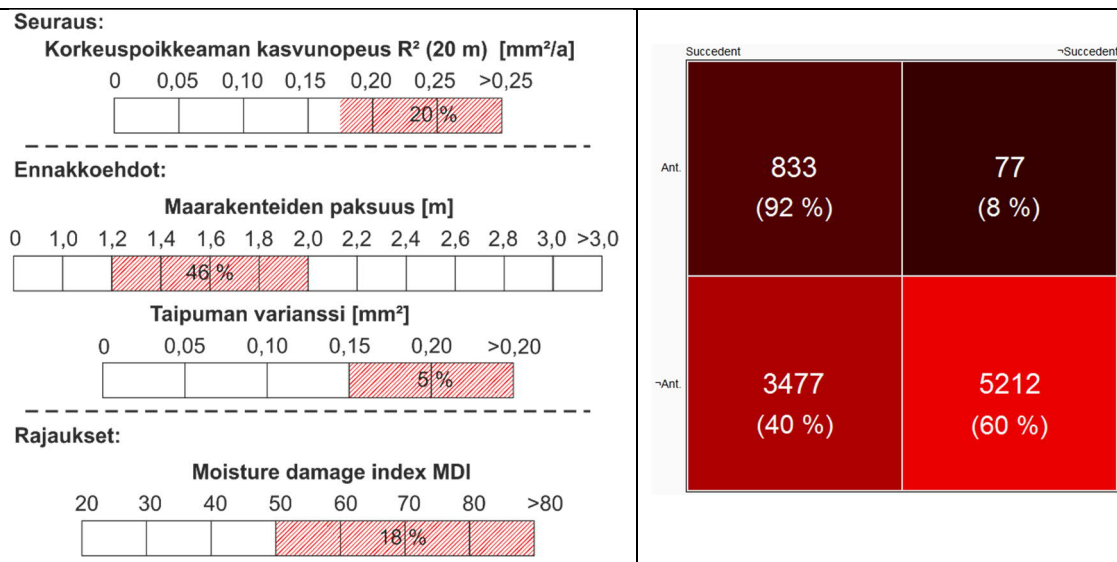


	MDI = 20-40		MDI = 50-80	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	20354 (86 %)	3196 (14 %)	834 (38 %)	1333 (62 %)
~Antecedent	19421 (66 %)	9936 (34 %)	38941 (77 %)	11799 (23 %)

Huomiot: Valtaosa alle 40 MDI-arvoista on juuri ennakkoehtojen mukaisella radalla, jonka korkeuspoikkeaman kasvu on keskiarvoista pienempää. Tämä on osoitusta siitä, että pienellä kosteudella on erittäin vahva yhteys pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun yleisellä tasolla. Suurelle kosteudelle taas onkin paljon keskiarvoista harvinaisempaa, että rakenteen korkeuspoikkeaman kasvu olisi keskiarvoista pienempää kyseisillä ennakkoehdoilla.

Taulukko 84. Kvl–Kot hypoteesi 31 kysymykseen 5.

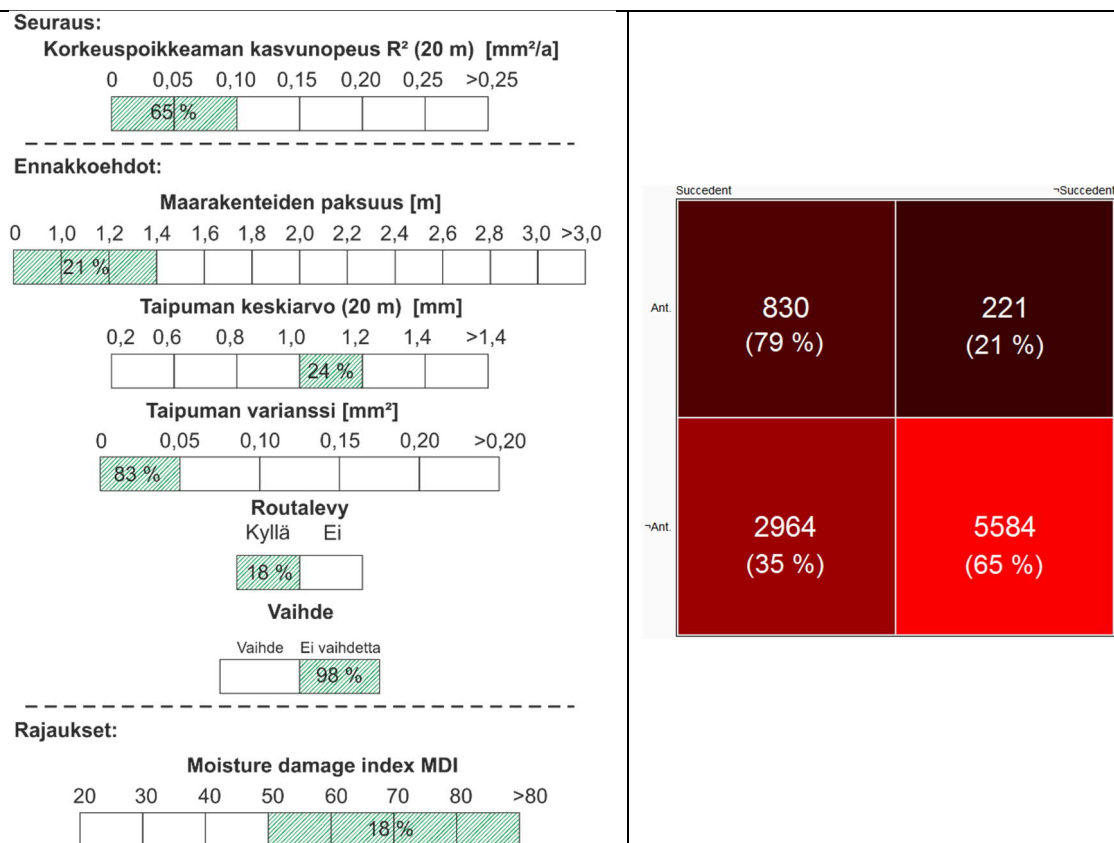
Hypoteesi 31: Kun tarkastellaan niitä rakenteita, joilla rakenteen MDI-arvo on yli 50, korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti suurta, kun maarakenteiden paksuus on 1,2–2,0 m ja taipuman varianssi on suurta.



Huomiot: Hypoteesin data on peräisin lähes poikkeuksetta vaihdealueilta, silloilta, alikuluilta ja rumpukohteista.

Taulukko 85. Kvl–Kot hypoteesi 32 kysymykseen 5.

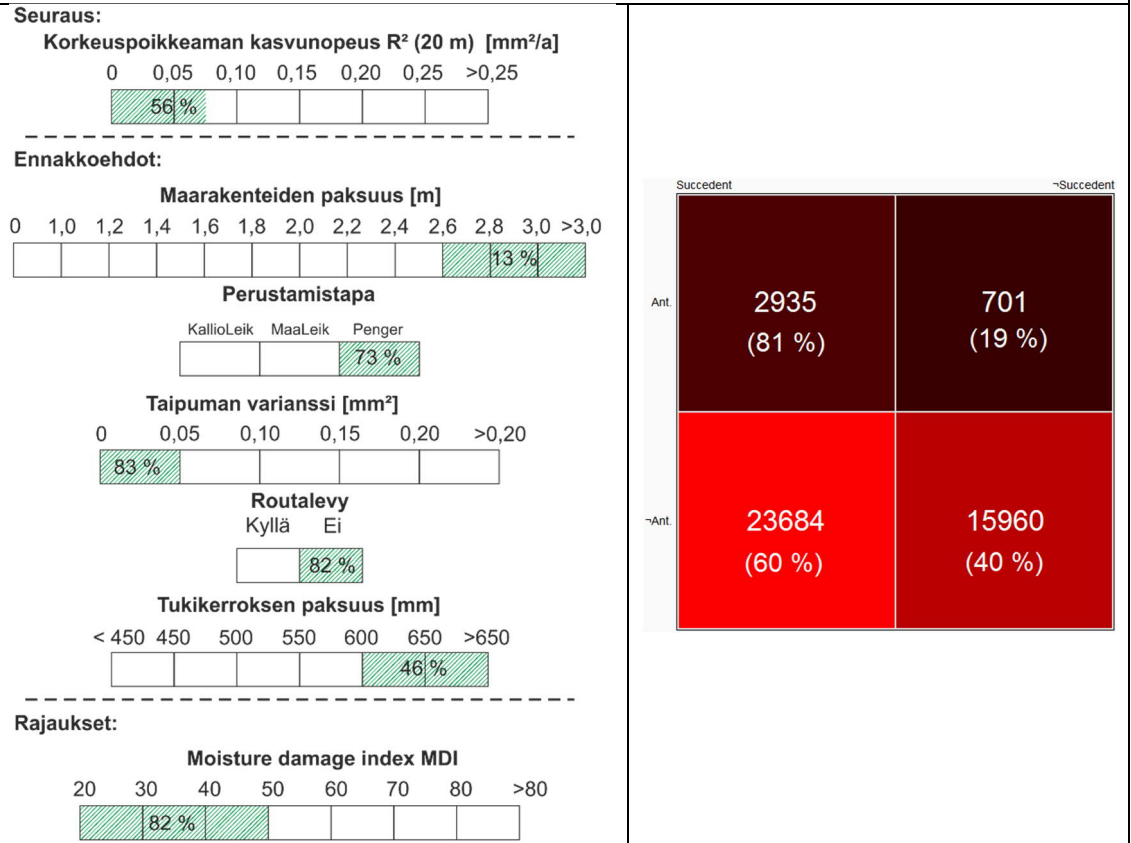
Hypoteesi 32: Kun tarkastellaan niitä rakenteita, joilla rakenteen MDI-arvo on yli 50, korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti pientä, kun maarakenteiden paksuus on alle 1,4 m, rakenteessa on routalevy, taipuma ja taipuman varianssi ovat pientä, eikä kohde sijaitse vaihdealueella.



Huomiot: Routalevy häiritsee maatutkausta ja kasvattaa rakenteen kosteuden arvoja, joten routalevyllä kosteuden arvoja ei voida pitää todellisina. Tästä syystä ei voida sanoa, että suurella rakennekosteudella olisi mitään vahvaa yhteyttä pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Tuloksesta on kuitenkin se hyöty, että se osoittaa, ettei routalevyllä ole aina ongelmia, vaan routalevyllä on saatu pidettyä erittäin ohuiden rakenteiden korkeuspoikkeaman kasvu pienenä.

Taulukko 86. Kvl–Kot hypoteesi 33 kysymykseen 5.

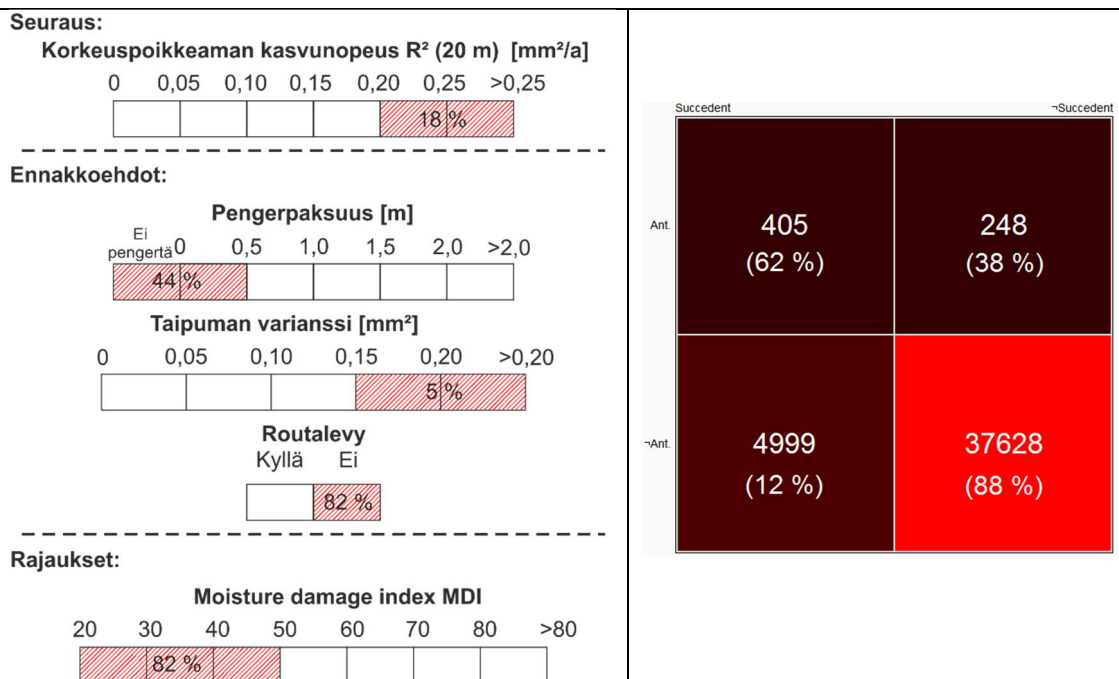
Hypoteesi 33: Kun tarkastellaan rataa, jossa MDI-arvo on alle 50, korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä pientä, kun penkereelle perustetun radan maarakenteiden paksuus on yli 2,6 m, tukikerros on yli 600 mm paksuinen, rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on pientä.



Huomiot: Kun MDI-arvo on alle 50, pientä alle 0,075 mm²/a korkeuspoikkeaman kasvua on yleisesti 62 %:lla rakenteista, kun koko datasta vastaava luku on 56 %. Eli kun MDI on alle 50, lähtökohtaisesti korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisesti pientä. Hypoteesin ennakkoehtojen mukaisella radalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 81 %:lla rakenteista.

Taulukko 87. Kvl–Kot hypoteesi 34 kysymykseen 5.

Hypoteesi 34: Kun tarkastellaan rataa, jossa MDI-arvo on alle 50, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 62 % radasta, kun pengerpaksuus on alle 0,5 m, rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on suurta.



Huomioit: Hypoteesin tulokset eivät kuitenkaan ole kovin vahvat ja kun dataa tarkastellaan tarkemmin, huomataan, että data on jälleen peräisin pääasiassa sillanpäädystä, rummuilta ja Kotkan sataman puuratapölkkyraiteelta. Yksi pieni kohde nousee esiin, jossa ei ole datan mukaan epäjatkuvuuskohtaa, mutta korkeuspoikkeaman kasvu on silti suurta pienellä rakennekosteudella. Kilometrivilillä 211+627–211+643 on noin 10 metriä sellaista rataa, jossa rakennekosteus on pieni ja korkeuspoikkeaman kasvu suuri.

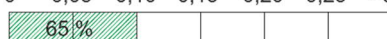
Taulukko 88. Kvl–Kot hypoteesi 35 kysymykseen 6.

Hypoteesi 35: Pienen korkeuspoikkeaman osuus on 76 %, kun taipuman keskiarvo on alle 1 mm ja 26 %, kun se on yli 1,4 mm, sellaisella radalla, jossa maarakenteiden paksuus on 1,4–2,0 m, alusrakenteen paksuus on 0,6–1,0 m, penkereen paksuus on alle 0,5 m, ojat ovat syviä, eikä kyseessä ole vaihdealue. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 65 %:lla rakenteista.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



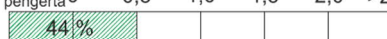
Alusrakenteen paksuus [m]

Ei AlRak 0 0,4 0,6 0,8 1,0 >1,0



Pengerpaksuus [m]

Ei pengertä 0 0,5 1,0 1,5 2,0 >2,0



Ojasyvyys (oikea oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Vaihde

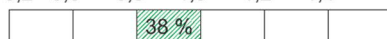
Vaihde Ei vaihdetta



Muuttujat:

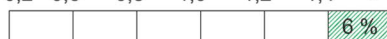
Alkutila: Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



Alkutila: Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



	0,8-1,0 mm		>1,4 mm	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	1105 (76 %)	343 (24 %)	269 (26 %)	783 (74 %)
~Antecedent	33183 (64 %)	18276 (36 %)	34019 (66 %)	17836 (34 %)

Huomiot: Keskiarvoista pienemmän ja erittäin suuren taipuman välillä nähdään merkittävä ero pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuuksissa.

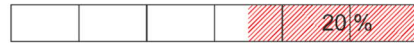
Taulukko 89. Kvl–Kot hypoteesi 36 kysymykseen 6.

Hypoteesi 36: Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 70 %, kun taipuman keskiarvo yli 1,4 mm ja 18 %, kun se on alle 1,0 mm, sellaisella radalla, jossa penkereen paksuus on alle 0,5 m ja kohde ei sijaitse vaihdealueella tai sillalla. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 20 %:lla rakenteista.

Seuraus:

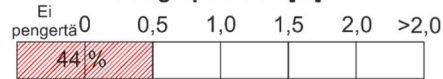
Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Pengerpaksuus [m]



Silta



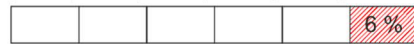
Vaihde



Muuttujat:

Alkutila: Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



Lopputila: Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



	>1,4 mm		0,6-1,0 mm	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	1005 (70 %)	427 (30 %)	2060 (18 %)	9221 (82 %)
~Antecedent	9693 (19 %)	41782 (81 %)	8638 (21 %)	32988 (79 %)

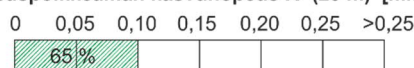
Huomiot: Hypoteesin mukaan on varsin yleistä, että rakenteella, jossa pengeri on ohut ja taipumat suuria, korkeuspoikkeama kasvaa nopeasti.

Taulukko 90. Kvl–Kot hypoteesi 37 kysymykseen 6.

Hypoteesi 37: Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 86 %, kun taipuman keskiarvo on alle 1 mm, ja 32 %, kun se on yli 1 mm, sellaisella penkereelle perustetulla radalla, jossa maarakenteiden paksuus on 2,0–2,6 m, alusrakenteen paksuus on yli 1,0 m, pohjamaa on silttistä savea ja kohde ei sijaitse vaihdealueella tai sillalla. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 65 %:lla rakenteista.

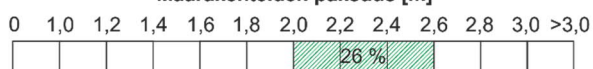
Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

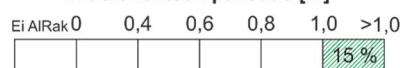


Ennakkoehdot:

Maarakenteiden paksuus [m]



Alusrakenteen paksuus [m]



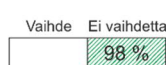
Perustamistapa



Pohjamaa

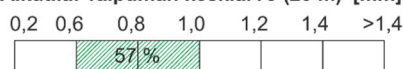


Vaihde

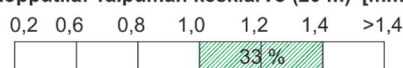


Muuttujat:

Alkutila: Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

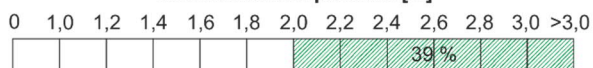


Lopputila: Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]



Rajaukset:

Maarakenteiden paksuus [m]



	< 1,0 mm		> 1,0 mm	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	618 (86 %)	102 (14 %)	288 (32 %)	622 (68 %)
~Antecedent	14261 (71 %)	5815 (29 %)	14591 (73 %)	5295 (27 %)

Huomiot: Paksuillakin rakenteilla pieni taipuma viittaa vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun ja suuri taipuma suureen korkeuspoikkeaman kasvuun.

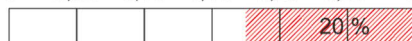
Taulukko 91. Kvl–Kot hypoteesi 38 kysymykseen 6.

Hypoteesi 38: Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on yli 1 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 90 % radasta, kun pengerpaksuus on alle 1,0 m, rakenne on kostea ja taipuman varianssi on suurta. Koko rataosalla suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 20 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, vastaava luku on 29 %.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Pengerpaksuus [m]

Ei pengertä 0 0,5 1,0 1,5 2,0 >2,0



Taipuman varianssi [mm^2]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Rajoitukset:

Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



	Succedent	~Succedent
Ant.	1072 (90 %)	117 (10 %)
~Ant.	4859 (26 %)	14066 (74 %)

Huomiot: Rakenteilla, joilla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, suuri korkeuspoikkeaman kasvu on selvästi yleisempää (29 %) kuin keskiarvoisesti koko rataosalla (20 %).

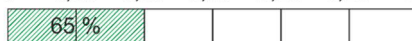
Taulukko 92. Kvl–Kot hypoteesi 39 kysymykseen 6.

Hypoteesi 39: Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on yli 1 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 83 % radasta, kun tukikerroksen paksuus on 500-600 mm, rakenne on kuiva, ojat syvät, rakenteessa ei ole routalevyä ja kohde ei ole sillalla. Koko rataosalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 65 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, vastaava luku on 54 %.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



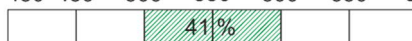
Ojasyvyys (vasen oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Tukikerroksen paksuus [mm]

< 450 450 500 550 600 650 >650



Routalevy

Kyllä Ei



Vaihde

Vaihde Ei vaihdetta



Rajaukset:

Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



	Succedent	~Succedent
Ant.	1034 (83 %)	205 (17 %)
~Ant.	9898 (52 %)	8977 (48 %)

Huomiot: Rakenteilla, joilla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu on selvästi harvinaisempaa (54 %) kuin keskiarvoisesti koko rataosalla (65 %).

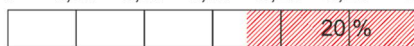
Taulukko 93. Kvl–Kot hypoteesi 40 kysymykseen 6.

Hypoteesi 40: Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on alle 1 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 48 % radasta, kun rakenne on kostea ja rakenteessa ei ole routalevyä. Koko rataosalla suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 20 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, vastaava luku on 15 %.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Routalevy

Kyllä Ei



Rajoitukset:

Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4

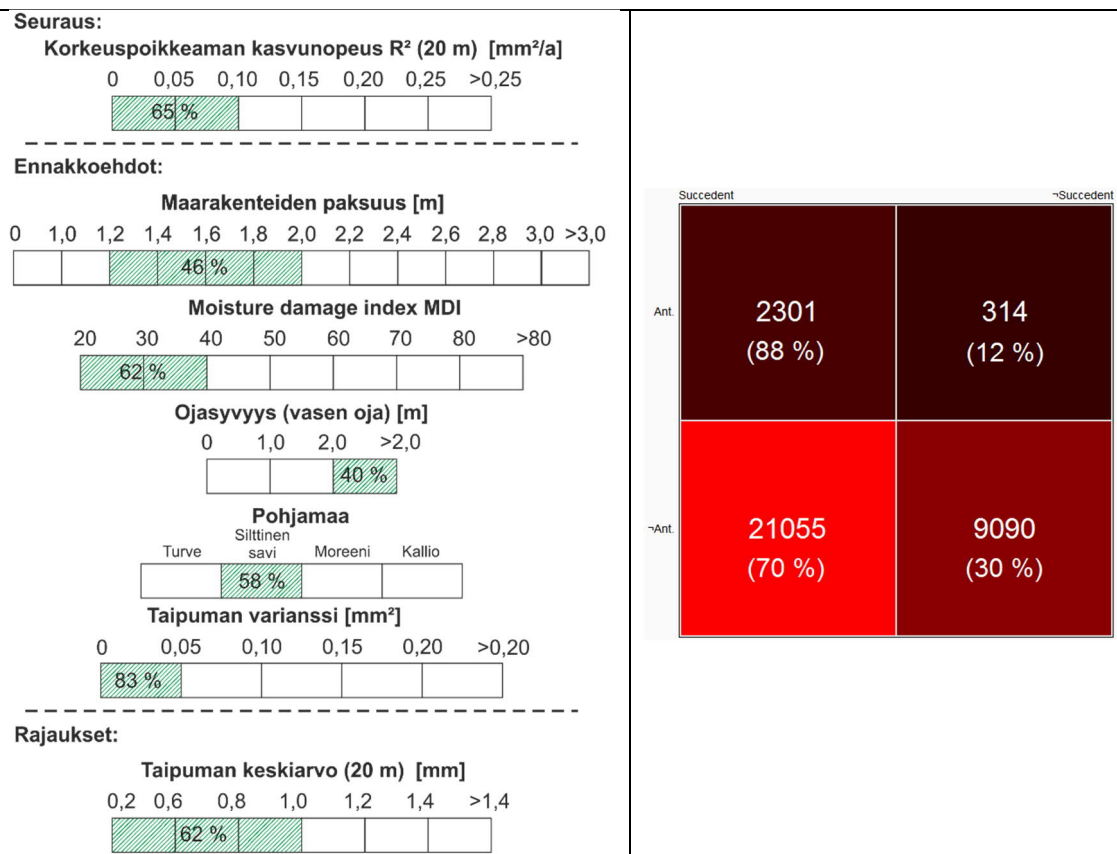


	Succedent	~Succedent
Ant.	877 (48 %)	936 (52 %)
~Ant.	3880 (13 %)	27067 (87 %)

Huomiot: Rakenteilla, joilla taipuman keskiarvo on alle 1 mm, suuri korkeuspoikkeaman kasvu on selvästi harvinaisempaa (15 %) kuin keskiarvoisesti koko rataosalla (20 %).

Taulukko 94. Kvl–Kot hypoteesi 41 kysymykseen 6.

Hypoteesi 41: Kun tarkastellaan rataa, jossa taipuman keskiarvo on alle 1 mm, korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 88 % radasta, kun maarakenteiden paksuus on 1,2–2,0 m, rakenteet ovat kuivat, ojat ovat syvät, taipuman varianssi on vähäistä ja pohjamaana on silttistä savea. Koko rataosalla pientä korkeuspoikkeaman kasvua on 65 %:lla rakenteista. Radalla, jolla taipuman keskiarvo on yli 1 mm, vastaava luku on 71 %.



Huomiot: Rakenteilla, joilla taipuman keskiarvo on alle 1 mm, vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu on selvästi yleisempää (71 %) kuin keskiarvoisesti koko rataosalla (65 %).

Taulukko 95. Kvl–Kot hypoteesi 42 kysymykseen 6.

Hypoteesi 42: Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 81 %, kun taipuman varianssi on suurta, ja 7 %, kun se on pientä, kun rakenne on penkereelle perustetulla radalla, jossa ei ole routalevyä ja kohde ei ole sillalla. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 18 %:lla rakenteista.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Silta

Silta Ei siltaa



Routalevy

Kyllä Ei



Muuttujat:

Alkutila: Taipuman varianssi [mm^2]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



Alkutila: Taipuman varianssi [mm^2]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



	$> 0,2 \text{ mm}^2$		$< 0,05 \text{ mm}^2$	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	1091 (81 %)	253 (19 %)	1968 (7 %)	24701 (93 %)
~Antecedent	8331 (16 %)	43232 (84 %)	7454 (28 %)	18784 (72 %)

Huomiot: Pienellä taipuman varianssilla on erittäin vähäinen yhteys suureen korkeuspoikkeaman kasvuun, kun taas suurella taipuman varianssilla taas on erittäin vahva yhteys.

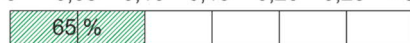
Taulukko 96. Kvl–Kot hypoteesi 43 kysymykseen 6.

Hypoteesi 43: Pienen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 78 %, kun taipuman varianssi on pientä, ja 12 %, kun se on suurta, kun rakenne on penkereelle perustetulla radalla, jossa ei ole routalevyä ja kohde ei ole sillalla. Koko rataosalla korkeuspoikkeaman kasvu on pientä 65 %:lla rakenteista.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm^2/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



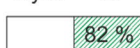
Silta

Silta Ei siltaa



Routalevy

Kyllä Ei



Muuttujat:

Alkutila: Taipuman varianssi [mm^2]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



Alkutila: Taipuman varianssi [mm^2]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20

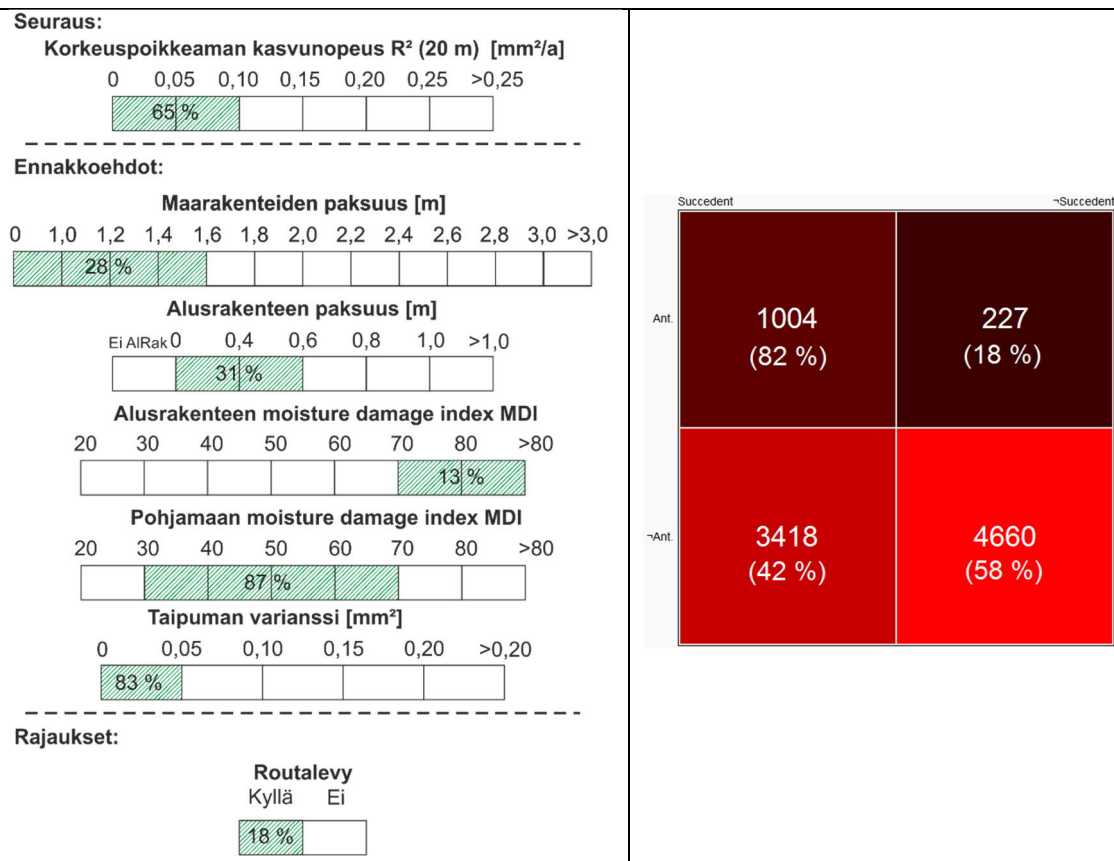


	< 0,05 mm^2		> 0,2 mm^2	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	20706 (78 %)	5963 (22 %)	159 (12 %)	1185 (88 %)
~Antecedent	13582 (52 %)	12656 (48 %)	34129 (66 %)	17434 (34 %)

Huomiot: Pienellä taipuman varianssilla on erittäin vahva yhteys vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun. Suurella taipuman varianssilla vastaava yhteys on erittäin heikko.

Taulukko 97. Kvl–Kot hypoteesi 44 kysymykseen 7.

Hypoteesi 44: Kun rakenteessa on routalevy, korkeuspoikkeaman kasvu on yleensä vähäistä, kun maarakenteiden paksuus on alle 1,6 m, alusrakenteen paksuus on alle 0,6 m, taipuman varianssi on vähäistä ja pohjamaan sekä alusrakenteen kosteus on suurta.



Huomiot: Ohuilla rakenteilla routalevy tekee tehtävänsä ja valtaosa routalevykohteista johtaa pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun. Kuitenkaan kokonaisuutena routalevykohteet eivät johda yhtä usein pieneen korkeuspoikkeaman kasvuun (48 %) kuin rataosalla kaikki rakenteet keskiarvoisesti (65 %).

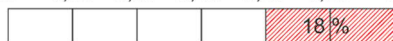
Taulukko 98. Kvl–Kot hypoteesi 45 kysymykseen 7.

Hypoteesi 45: Kun rakenteessa on routalevy, korkeuspoikkeaman kasvu on suurta 51 %:lla rakenteista, joilla maarakenteiden paksuus on 1,4–2,4 m, ojat ovat syviä ja taipuman varianssi on suurta. Koko rataosalla suurta korkeuspoikkeaman kasvua on 18 %:lla rakenteista.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



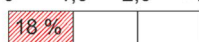
Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



Ojasyvyys (oikea oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Muuttujat:

Routalevy

Kyllä Ei



	Succedent	~Succedent
Ant.	1049 (51 %)	1015 (49 %)
~Ant.	1727 (24 %)	5518 (76 %)

Huomiot: Muutenkin routalevyllä suuri korkeuspoikkeaman kasvu on selvästi yleisempää (30 %) kuin koko rataosalla keskiarvoisesti (18 %). Etenkin paksuilla rakenteilla korkeuspoikkeaman kasvu on usein suurta, kun rakenteessa on routalevy.

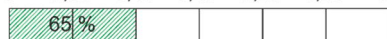
Taulukko 99. Kvl–Kot hypoteesi 46 kysymykseen 8.

Hypoteesi 46: Vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 82 % maaleikkauksella ja 19 % penkereellä, kun maarakenteiden paksuus on alle 1,8 m, alusrakenne on paksuudeltaan 0,4–1,0 m, ojat ovat matalia ja pohjamaana on moreenia.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

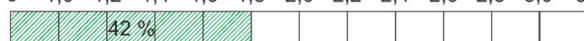
0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Alusrakenteen paksuus [m]

Ei AlRak 0 0,4 0,6 0,8 1,0 >1,0



Ojasyvyys (vasen oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Pohjamaa

Turve Silttinen savi Moreeni Kallio



Muuttujat:

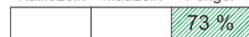
Alkutila: Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Lopputila: Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger

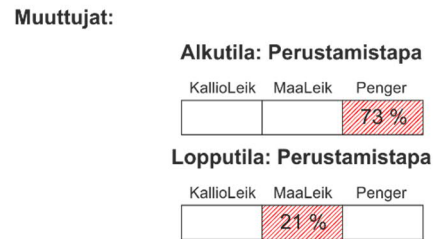
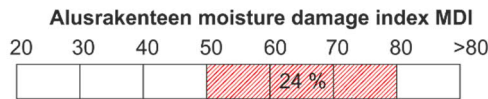
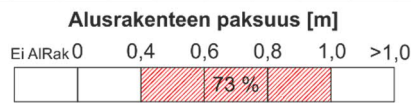
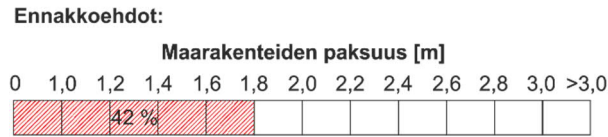
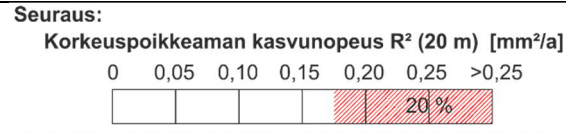


	Maaleikkaus		Penger	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	508 (82 %)	108 (18 %)	121 (19 %)	512 (81 %)
~Antecedent	33780 (65 %)	18511 (35 %)	34167 (65 %)	18107 (35 %)

Huomiot: Ohuet rakenteet suoriutuvat hyvin maaleikkauksella, mutta eivät penkereellä.

Taulukko 100. Kvl–Kot hypoteesi 47 kysymykseen 8.

Hypoteesi 47: Suuren korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 74 % penkereellä ja 17 % maaleikkauksella, kun maarakenteet ovat paksuudeltaan alle 1,8 m, alusrakenne on kosteaa ja paksuudeltaan 0,4–1,0 m ja pohjamaana on moreenia.



	Penger		Maaleikkaus	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	539 (74 %)	186 (26 %)	96 (17 %)	462 (83 %)
~Antecedent	10159 (19 %)	42023 (81 %)	10602 (20 %)	41747 (80 %)

Huomiot: Suuri korkeuspoikkeaman kasvu ohuilla rakenteilla on paljon yleisempää penkereillä kuin maaleikkauksella.

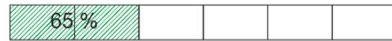
Taulukko 101. Kvl–Kot hypoteesi 48 kysymykseen 8.

Hypoteesi 48: Vähäisen korkeuspoikkeaman kasvun osuus on 79 % maaleikkauksella ja 45 % kalliroleikkauksella, kun maarakenteet ovat paksuudeltaan alle 1,6 m, tukikerros on paksuudeltaan 450–550 mm, alusrakenne paksuudeltaan alle 0,6 m ja taipuman varianssi on pientä.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R^2 (20 m) [mm²/a]

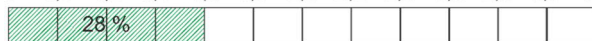
0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Alusrakenteen paksuus [m]

Ei AlRak 0 0,4 0,6 0,8 1,0 >1,0



Taipuman varianssi [mm²]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



Tukikerroksen paksuus [mm]

< 450 450 500 550 600 650 >650



Muuttujat:

Alkutila: Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Lopputila: Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



	Maaleikkaus		Kalliroleikkaus	
	Succedent	~Succedent	Succedent	~Succedent
Antecedent	620 (79 %)	161 (21 %)	262 (45 %)	322 (55 %)
~Antecedent	33668 (65 %)	18458 (35 %)	34026 (65 %)	18297 (35 %)

Huomiot: Pieni korkeuspoikkeaman kasvu on tyypillisempää maaleikkauksella kuin kalliroleikkauksella.

Taulukko 102. Kvl–Kot hypoteesi 49 kysymykseen 8.

Hypoteesi 49: Kallioleikkauksella suureen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 37 % sellaisista rakenteista, joiden alusrakenne on paksuudeltaan alle 0,6 m, koko rakenteen ja tukikerroksen kosteus on koholla ja ojat ovat matalat.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Alusrakenteen paksuus [m]

Ei AIRak 0 0,4 0,6 0,8 1,0 >1,0



Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Tukikerroksen moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Ojasyvyys (oikea oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Ojasyvyys (vasen oja) [m]

0 1,0 2,0 >2,0



Rajaukset:

Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



	Succedent	~Succedent
Ant.	314 (37 %)	539 (63 %)
~Ant.	346 (17 %)	1658 (83 %)

Huomiot: Hypoteesia tukeva data oli peräisin Kotkan liikennepaikalta.

Taulukko 103. Kvl–Kot hypoteesi 50 kysymykseen 8.

Hypoteesi 50: Alle 1,8 m paksuisilla penkereillä vähäiseen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 84 % sellaisista rakenteista, joiden paksuus on 1,4–1,8 m, alusrakenteen paksuus alle 0,6 m, rakenne on kuiva eikä siinä ole routalevyä ja taipuman keskiarvo on pieni.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



Alusrakenteen paksuus [m]

Ei AlRak 0 0,4 0,6 0,8 1,0 >1,0



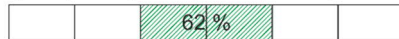
Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Taipuman keskiarvo (20 m) [mm]

0,2 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 >1,4



Routalevy

Kyllä Ei



Rajaukset:

Alkutila: Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0



	Succedent	~Succedent
Ant.	1005 (84 %)	185 (16 %)
~Ant.	5774 (52 %)	5352 (48 %)

Huomiot: Ohuella penkereellä vähäinen korkeuspoikkeaman kasvu voi olla yleistä, mikäli rakenteet ovat kuivat.

Taulukko 104. Kvl–Kot hypoteesi 51 kysymykseen 8.

Hypoteesi 51: Alle 1,8 m paksuisilla penkereillä suureen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 95 % sellaisista rakenteista, joilla rakenteen ja tukikerroksen kosteus on suurta, rakenteessa ei ole routalevyä ja taipuman varianssi on suurta.

Seuraus:

Korkeuspoikkeaman kasvunopeus R² (20 m) [mm²/a]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 >0,25



Ennakkoehdot:

Moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Tukikerroksen moisture damage index MDI

20 30 40 50 60 70 80 >80



Taipuman varianssi [mm²]

0 0,05 0,10 0,15 0,20 >0,20



Routalevy

Kyllä Ei



Rajaukset:

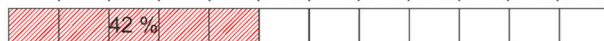
Perustamistapa

KallioLeik MaaLeik Penger



Maarakenteiden paksuus [m]

0 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8 3,0 >3,0

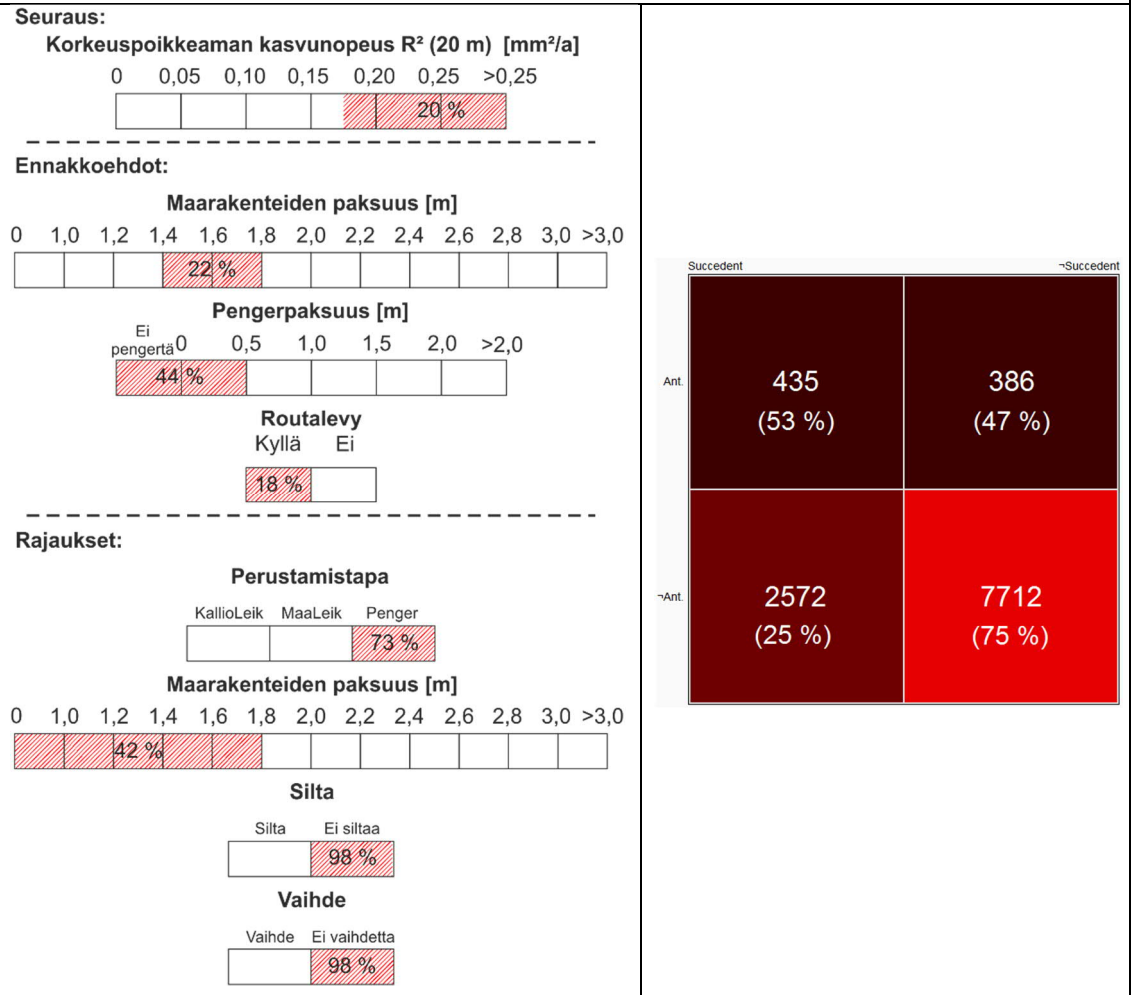


	Succedent	~Succedent
Ant.	609 (95 %)	30 (5 %)
~Ant.	3207 (27 %)	8470 (73 %)

Huomiot: Hypoteesin data on peräisin ainoastaan vaihteilta, alikulun päältä sekä Kotkan sataman puuratapölkkyraiteelta. Rakennepaksuudella tai perustamistavalla ei voida pitää olevan suurta merkitystä tässä tuloksessa.

Taulukko 105. Kvl–Kot hypoteesi 52 kysymykseen 8.

Hypoteesi 52: Alle 1,8 m paksuisilla penkereillä suureen korkeuspoikkeaman kasvuun johtaa 53 % sellaisista rakenteista, joiden maarakenteiden paksuus on 1,4–1,8 m, pengerpaksuus on alle 0,5 m ja rakenteessa on routalevy.



Huomiot: Hypoteesin data on peräisin routalevyjaksojen päädyistä sekä aiemmin louhinnassa selvinneiltä ongelmakohteilta. Datasta ei selviä, miksi näillä ongelmakohteilla korkeuspoikkeaman kasvu on suurta.