TUNI Luottamuksellinen - Confidential (3Y)

Tampereen yliopisto

Ilaf Rashid

KUIVATUKSEN VAIKUTUS TIEN KUNTOTILAAN

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: Kalle Vaismaa ja Pauli Kolisoja
Marraskuu 2026

TIIVISTELMÄ

Ilaf Rashid: Kuivatuksen vaikutus tien kuntotilaan
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2026

Kuivatuksella pyritään ehkäisemään ja minimoimaan hulevesien aiheuttamia haittoja tierakenteessa. Tehokkaan kuivatuksen avulla hallitaan suuria ja epätasaisia routanousuja, ehkäistään pysyvien muodonmuutosten kehittymistä sekä vähennetään eroosiovaurioita. Lisäksi kuivatuksella pyritään ylläpitämään tien päällysteen hyvä kunto sekä varmistamaan ajomukavuus ja liikenneturvallisuus. Viime vuosina kuivatuksen merkitys on kasvanut entisestään ilmastonmuutoksen ja kasvavien sademäärien seurauksena.

Kuivatuksen kunnossapitoa pyritään tehostamaan kehittämällä uusia digitaalisia ratkaisuja. Vuosina 2020–2023 toteutetussa KUNDI-hankkeessa hyödynnettiin laserkeilausta ja maatutkaluotausta ojien parantamisen 3D-koneohjausmallien laadinnassa. Maatutkamittauksilla määritettiin päällysrakenteen alapinta ja laserkeilausmittauksilla ojien geometria sekä pohjan sijainti. Kuivatusparannuksen tavoitteena oli sijoittaa kunnostettujen ojien pohjat 20–30 cm päällysrakenteen alapinnan alapuolelle, minkä pohjalta laadittiin tavoitemalli. Tavoitemallin perusteella toteutettiin kaivutyö. Toimenpiteen jälkeen toteutuman onnistumista arvioitiin laadunvarmistusmittauksilla, ja todettiin, että toteuma vastasi suunnitelmia suhteellisen hyvin.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin tehdyn kuivatusparannuksen vaikutuksia tien kuntotilan kehitykseen tarkastelemalla PTM-aineistosta laserkeilauksella määritetyn tien urasyvyyden ja urakasvunopeuden, pituussuuntaista epätasaisuutta kuvaavan IRI-arvon ja vauriosummalaskennoista päällystevaurioiden kehitystä. Lisäksi tarkasteltiin TSD- ja PPL-mittauksista tierakenteen taipumaindeksejä SCI_{200}, BCI ja D_0 sekä maatutka-aineistosta tierakenteen kosteustilaa kuvaavien MDI-arvojen kehitystä. Lisäksi laserkeilausaineistosta analysoitiin, miten vuonna 2026 havaitut ojien geometria ja ojan pohjan syvyydet ovat muuttuneet verrattuna vuosien 2022–2023 laadunvarmistusmittauksiin. Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää tunnusluku, joka kuvaa parhaiten kunnostettujen ojien eli kuivatusparannusten vaikutusta tien kuntotilaan.

Tutkimustuloksissa havaittiin, että kunnostettujen ojien pohjien syvyydet olivat suurimmaksi osaksi säilyneet hyvin. Kohdissa, joissa ojan pohjan syvyys oli madaltunut noin 20 cm tai enemmän, syynä oli se, että liian jyrkät ulkoluiskat olivat sortuneet ja luiskamateriaalit olivat valuneet ojan pohjaan. Mäkisillä tieosuuksilla ojan pohjien madaltuminen vaikutti liittyvän myös maa-aineksen kulkeutumiseen rinteiltä ojiin. Parhaiten kuivatusparannuksen vaikutusta kuvaavaksi tunnusluvuksi osoittautui urakasvunopeus, jonka arvoissa oli havaittavissa selkeää laskua toimenpiteen jälkeisellä tarkastelujaksolla. Myös päällystevaurioiden kehittyminen oli hidastunut.

Tutkimuksessa tarkasteltiin urasyvyyksien, urakasvunopeuksien sekä taipumaindeksien SCI_{200} ja BCI välisiä riippuvuuksia. Taipumaindeksien arvojen kasvu oli puolestaan selvimmin havaittavissa hienorakeisilla pohjamailla. Tierakenteen kosteuden muutoksia tarkasteltaessa havaittiin, että rakenteen alaosan MDI-arvot olivat korkeita niillä tieosuuksilla, joilla ojan pohja sijaitsi päällysrakenteen alapintaa korkeammalla. Toinen tierakenteen kosteuden lisääntymiseen vaikuttava tekijä oli rumpujen korkeusasema. Joillakin tieosuuksilla rummut sijaitsivat noin 10 cm ojan pohjan yläpuolella, mikä heikensi kuivatuksen toimivuutta.

Avainsanat: maantiet, kuivatus, ojien kunnossapito, laserkeilaus, maatutkaluotaus, KUNDI-hanke

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Ilaf Rashid: The Impact of drainage on road conditions
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
November 2026

Drainage is intended to prevent and minimize the adverse effects of stormwater on road structures. Effective drainage helps control excessive and uneven frost heave, prevents the development of permanent deformation, and reduces the risk of erosion damage. Additionally, proper drainage is essential for maintaining good pavement conditions and to ensure driving comfortably and traffic safety. In recent years, the importance of drainage has increased further due to climate change and rising precipitation levels.

The efficiency of drainage maintenance can be improved through the development of new digital solutions. In the KUNDI project, which was carried out between 2020 and 2023, LiDAR and GPR surveys were utilized in the preparation of 3D machine control models for ditch rehabilitation. GPR measurements were used to determine the bottom of the pavement structure, while laser scanning surveys were used to define ditch geometry and ditch invert elevations. The objective of the work put into drainage improvement was to position the rehabilitated ditch bottoms 20-30 cm below the bottom of the pavement structure, based on which a target model was prepared. The excavation work was then carried out according to the target model. Following the rehabilitation works, the success of the implementation was evaluated through quality assurance measurements, which indicated that the completed works corresponded relatively well to the design.

This research investigated the effects of implemented drainage improvement measures on the development of road conditions. The analysis included rut depth, rutting rate, and longitudinal roughness IRI derived from PTM data, as well as pavement distress development based on pavement condition surveys. Furthermore, pavement structural response indicators SCI_{200}, BCI, and D_0 obtained from TSD and PPL measurements. These were examined with the development of pavement moisture conditions represented by MDI values derived from GPR data. Moreover, laser scanning data was used to analyze changes in ditch geometry and ditch bottom elevations in 2026, which was compared with the quality assurance measurements conducted in 2022-2023. The objective of the research was to identify which indicator best describes the impact of rehabilitated ditches, that is, drainage improvements, on road condition.

The results indicated that the rehabilitated ditch bottom elevations had shown only minor changes over time. At locations where the ditch bottom had risen by approximately 20 cm or more, the primary reason was the collapse of overly steep backslopes, causing slope material to accumulate in the ditch bottom. On uphill sections of road, the reduction in ditch depth also appeared to be associated with the transport of soil material from adjacent slopes into the ditches. Among the analyzed indicators, the rutting rate proved to be the most effective measure for describing the impact of drainage improvements, showing a clear decrease during the post-treatment monitoring period. The progression of pavement distress was also found to have slowed.

The study examined relationships between rut depth, rutting rate, and the pavement deflection indices SCI_{200} and BCI. Increases in the deflection indices were most pronounced on fine-grained subgrade soils. Analysis of pavement moisture conditions showed that high MDI values in the lower part of the pavement structure were associated with road sections where the ditch bottom was located above the bottom of the pavement structure. Another factor contributing to increased moisture content within the pavement structure was the elevation of culverts. On some road sections, culverts were located approximately 10 cm above the ditch bottom, which impaired drainage performance.

Keywords: roads, drainage, ditch maintenance, LiDAR, GPR, KUNDI project

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot:

Microsoft 365 Copilot (GPT-5 chat -malli)
Google Gemini (Gemini 3 -malliperhe)
Elsevier Scopus AI

Käyttötarkoitus ja osiot, joissa tekoälyä on käytetty:

Microsoft 365 Copilot: Tekoälyä on käytetty tekstin kieliasun tarkistamiseen, kirjoitusvirheiden korjaamiseen, lauserakenteiden parantamiseen ja kuvatekstien muokkaamiseen. Tiivistelmän englanninkielisen version laatimisessa on hyödynnetty myös tekoälyä.

Google Gemini: Tekoälyä on käytetty kuvien visualisointiin, kuvien laadun parantamiseen sekä kuvatekstien kääntämiseen alkuperäisestä kielestä suomeksi kuvissa 1, 6, 9, 12, 16 ja 17.

Scopus AI: Tekoälyä on käytetty kirjallisuushaussa.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen yliopiston tutkimuskeskus Terrassa. Työ toteutettiin osana Väyläviraston tilaamaa KUNDI-hankkeen seurantatutkimusta.

Haluan kiittää työn ohjaajia Kalle Vaismaata ja Pauli Kolisojaa asiantuntevasta ohjauksesta, tuesta ja kannustuksesta. Apua on ollut aina saatavilla silloin, kun sitä on tarvittu. Erityinen kiitos kuuluu myös Anne Hämäläiselle, joka on ollut tiiviisti mukana työn ideoinnissa ja toteutusprosessissa alusta alkaen.

Kiitän ohjausryhmän jäseniä Väylävirastosta, Katri Eskolaa ja Jarkko Piristä, sekä Roadscannersilta Anssi Hiekkalahtea arvokkaista kommenteista, kiinnostuksesta ja työn aikana käydyistä keskusteluista.

Lopuksi haluan osoittaa lämpimät kiitokseni perheelleni saamastani tuesta. Erityisesti haluan kiittää siskoani ja serkkuani heidän tuestaan, läsnäolostaan sekä kyvystään tarjota uusia näkökulmia silloin, kun niitä on eniten tarvittu.

Tampereella, 16.11.2026

Ilaf Rashid

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 8
1.1 Tutkimuksen tausta 8
1.2 Tutkimuksen tarve ja tutkimuskysymykset 9
1.3 Tutkimuksen toteutus 11
2. KUIVATUSPUUTTEISTA JOHTUVAT TEIDEN VAURIOT 13
2.1 Tien päällysrakenne 13
2.2 Päällysrakeenteen vaurioituminen 16
2.2.1 Urautuminen 16
2.2.2 Reikiintyminen 19
2.2.3 Veden kerääntyminen ja kosteuden lisääntyminen 21
2.2.4 Tierakenteen suunnittelun puutteet 22
2.3 Routanousuista aiheutuvat vauriot 24
2.4 Pohjamaan kantavuuden heikkeneminen 26
2.5 Tien kunnon kartoittaminen 27
2.5.1 Poikittaisen ja pituussuuntaisen epätasaisuuden mittaaminen 27
2.5.2 Päällystevaurioiden kartoittaminen 30
2.5.3 Täydentävät mittaukset ja niihin perustuva riskiluokitus 31
2.6 Vauriosumma ja vaurioitumisnopeus 34
3. TEIDEN KUIVATUKSEN KUNNOSSAPITO 37
3.1 Kunnossapitotarpeen arviointi 37
3.2 Kuivatuksen kunnossapitoimenpiteet 39
3.3 Kuivatuksen kunnossapidon haasteet 43
3.4 Digitaaliset ratkaisut 45
3.4.1 KUNDI-toimintamalli 45
3.4.2 Muut digitaaliset ratkaisut 50
4. HAVAINTOKOHTEET JA TUTKIMUKSEN TOTEUTUS 53
4.1 Pilottikohteiden esittely 53
4.2 Kuivatusparannuksen vaiheet 2020–2023 55
4.2.1 Suunnittelu 55
4.2.2 Toteutus 57
4.2.3 Laadunvarmistus 57
4.3 Seurantamittaukset 2024–2026 59
4.4 Aineiston analyysi 60
5. MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYYSI 64
5.1 Urasyvyys ja urakasvunopeus 64
5.2 Pituussuuntaiset epätasaisuudet 82
5.3 Päällystevauriot 88
5.4 Muutokset sivuojien syvyydessä ja luiskissa 95
5.5 Muutokset tierakenteen taipumaindekseissä 101

5.6 Muutokset tierakenteen kosteustilassa 110
6. JOHTOPÄÄTÖKSET 116
6.1 Tulosten yhteenveto 116
6.2 Tulosten luotettavuus 118
6.3 Jatkotutkimusaiheet 121
LÄHTEET 124
LIITE 1: VÄYLÄVIRASTON (34/2026) PÄÄLLYSTEIDEN KORJAUKSEN KUNTOLUOKITUS JA KUNTOMUUTTUJIEN RAJA-ARVOT 131
LIITE 2: VAURIOINVENTOINTILOMAKE 132
LIITE 3: TEIDEN 11295 JA 11321 TARKASTELUJAKSOJEN MDI-KUVAAJAT 133

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AB	Asfalttibetoni
BCI	*eng. Base Curvature Index*
BIM	Rakennustietomallinnus *(eng. Building Information Modeling)*
D_0	Tien pinnan taipuma kuormituslevyn alla
D_{200}	Tien pinnan taipuma etäisyydellä 200 mm
D_{900}	Tien pinnan taipuma etäisyydellä 900 mm
D_{1200}	Tien pinnan taipuma etäisyydellä 1200 mm
GIS	Paikkatietomallinnus *(eng. Geographic Information System)*
GPR	Maatutkaluotaus *(eng. Ground Penetrating Radar)*
HHt	Hieno hieta
HK	Homogenisuuskerroin
Hs	Hiesu
Ht	Hieta
IoT	*eng. Internet of Things*
IRI	*eng. International Roughness Index*
KUNDI	Kuivatuksen kunnossapidon digitaalisen hallinnan kehittäminen
KVL	Vuoden keskimääräinen vuorokausiliikenne (autoa/vrk)
LiDAR	Laserkeilaus *(eng. Light Detection and Ranging)*
LjSa	Liejuinen savi
MDI	*eng. Moisture Damage Index*
Mr	Moreeni
PAB	Pehmeä asfalttibetoni
PEHKO	Päällysteiden ennakoivan hoidon ja kunnostuksen ohjelmointiprojekti
PK	Päällysteen korjausluokitus
pl	Paalulukema
PTM	Palvelutasomittaus
PVK	Päällystevaurioiden kartoitus
RDSV	*eng. Road Doctor Survay Van*
RIDE	Tien epätasaisuutta kuvaavia tunnuslukuja, jotka yhdistävät ajomukavuuteen liittyvät kolme eri liikesuuntaa: pysty-, heilahdus- ja nyökkimisliikkeen
RL	Riskiluokka
ROADEX	Pohjoisten alueiden alempiluokkalaisten teiden ylläpidon yhteistyöverkosto
RWD	*eng. Rolling Weight Deflectometer*
Sa	Savi
SCI	*eng. Surface Curvature Index*
TSD	*eng. Traffic Speed Deflectometer*
VRS-GPS	*eng. Virtual Reference Station Global Positioning System*
VNOU	Vaurioitumisnopeus
VS	Vauriosumma
YHA	Ylläpidon hallintajärjestelmä
YP	Päällysteen ylläpitoluokitus
ε_r	Dielektrisyysarvo

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Ilmastonmuutoksen seurauksena sademäärät ovat lisääntyneet ja sää- sekä ympäristöolosuhteet muuttuneet epävakaammiksi, minkä takia tierakenteiden kuivatuksen tarve ja siihen kohdistuvat vaatimukset ovat kasvaneet. Puutteellisen kuivatuksen aiheuttamia ongelmia ovat muun muassa liikenneturvallisuuden ja pohjamaan kantavuuden heikkeneminen, eroosioherkkyyden lisääntyminen, routanousujen ja tierakenteen pysyvien muodonmuutosten kasvu (Roadex Network n.d). Näin ollen toimivien kuivausratkaisujen merkitys korostuu rakenteiden toimivuuden varmistamisessa sekä tienpidon elinkaarikustannusten ja päästöjen hallinnassa.

Kuivatuksen suunnittelu on osa tierakenteen suunnittelua ja sen tavoitteena on minimoida hulevesistä aiheutuvat haitat. Kuivatus voidaan jakaa kahteen toisiaan täydentävään osa-alueeseen: pinta- ja syväkuivatukseen. Pintakuivatus estää veden pääsyn tierakenteeseen, kun taas syväkuivatus poistaa rakenteeseen mahdollisesti kertyneen veden tehokkaasti. (Väylävirasto 2023b, s. 10)

Samalla tieosuudella voidaan käyttää useita kuivatusratkaisuja, jotka yhdessä luovat toimivan ja hallitun kuivatusjärjestelmän. Kuivatusjärjestelmän osien, kuten ojien, rumpujen, kaivojen, altaiden ja putkien, huolellinen suunnittelu ja mitoitus vaatii ratkaisujen yhteensovittamista (Väylävirasto 2019a, s. 10). Näiden osien lisäksi tierakenteen kuivatusta voidaan tehostaa esimerkiksi kasvattamalla suodatinkerroksen paksuutta sekä mitoittamalla tien pientareet ja sivukaltevuudet olosuhteisiin sopiviksi (Liikennevirasto 2018, s. 43; Väylävirasto 2023b, s. 38–39).

Kuivatuksen onnistuminen vaatii huolellisen suunnittelun ja mitoituksen lisäksi jatkuvaa kunnossapitoa, jonka vuoksi teiden kuivatusrakenteiden kuntoa tarkkaillaan jatkuvasti (Väylävirasto 2019a, s. 11). Kuivatuksen kunnossapidon hallinta onkin keskeinen tekijä tieverkon toimivuuden ja pitkäikäisyyden varmistamisessa. Tehokas kuivatus ylläpitää rakenteiden kuormituskestävyyttä ja vähentää vaurioitumisriskiä, minkä vuoksi sen suunnitteluun ja ylläpitoon kohdistuu jatkuvaa kehittämistarvetta.

Vuosina 2020–2023 Väylävirasto rahoitti hankkeen *Kuivatuksen kunnossapidon digitaalisen hallinnan kehittäminen* (KUNDI), joka oli Tampereen yliopiston, Roadscanners Oy:n ja Arkance Systems Finland Oy:n yhdessä toteuttama tutkimus- ja kehitysprojekti. KUNDI-hankkeen tavoitteena oli kehittää digitaalisia menetelmiä, joiden avulla kuivatuk-

sen kuntoa voidaan arvioida sekä tukea suunnittelua, toteutusta ja laadunvalvontaa yhtenäisen toimintamallin puitteissa (Heilala et al. 2023, s. 3). Hankkeen pilottikohteina toimivat Uudellamaalla sijaitsevat maantiet 11295, 11297 ja 11321 (Heilala et al. 2023, s. 21).

KUNDI-hankkeen pilottikohteet on valittu Päällysteiden ennakoivan hoidon ja kunnostuksen -ohjelmointiprojektin (PEHKO) Hyvinkään tienhoitoalueen teiden joukosta (Heilala et al. 2023, s. 13). Roadscannersin henkilöstö teki pilottikohteilla laserkeilauksen ja maatutkauksen, joiden avulla selvitettiin tien ja ojien pintamuodot sekä tien rakennekerrospaksuudet ja arvioitiin niiden kosteustilaa. Kerätyn aineiston pohjalta Arkance Systems Finland laati pintamallin, josta luotiin 3D koneohjausmalli sivuojien kaivamista varten. Mallin avulla ojat kaivettiin siten, että ojan pohjan korkeusasema sekä etu- ja takaluiskien kaltevuudet vastasivat suunniteltuja arvoja. (Heilala et al. 2023, s. 21–31) Tässä työssä analysoidaan KUNDI-hankkeen seurantatutkimuksen mittaustuloksia.

1.2 Tutkimuksen tarve ja tutkimuskysymykset

Tien kuivatuksen puutteiden todentamiseen sekä jatkuvaan kunnossapitoon liittyvät haasteet eivät ole nousseet esille vain Suomessa vaan tutkimuksia ja kehitysprojekteja aiheeseen liittyen tehdään ympäri maailmaa. Tien kuivatusjärjestelmien kehittämisessä hyödynnetään nykyään useita digitaalisia ja käytännönläheisiä menetelmiä, ja niitä on myös tutkittu kansainvälisesti. Esimerkiksi Montai et al. (2020) tarkastelevat kuivatuksen toimivuutta erityisesti pintakuivatuksen näkökulmasta hyödyntämällä digitaalista kuvankäsittelyä, kun taas Cepa et al. (2024), Sreekanthaswamy et al. (2025) ja Selvakumar (2026) laajentavat näkökulmaa esittämällä kuivatuksen moniulotteista mallinnusta ja tiedonkäsittelyä esimerkiksi paikkatieto- (GIS) ja rakennustietomallinnukseen (BIM) perustuvien ratkaisujen avulla.

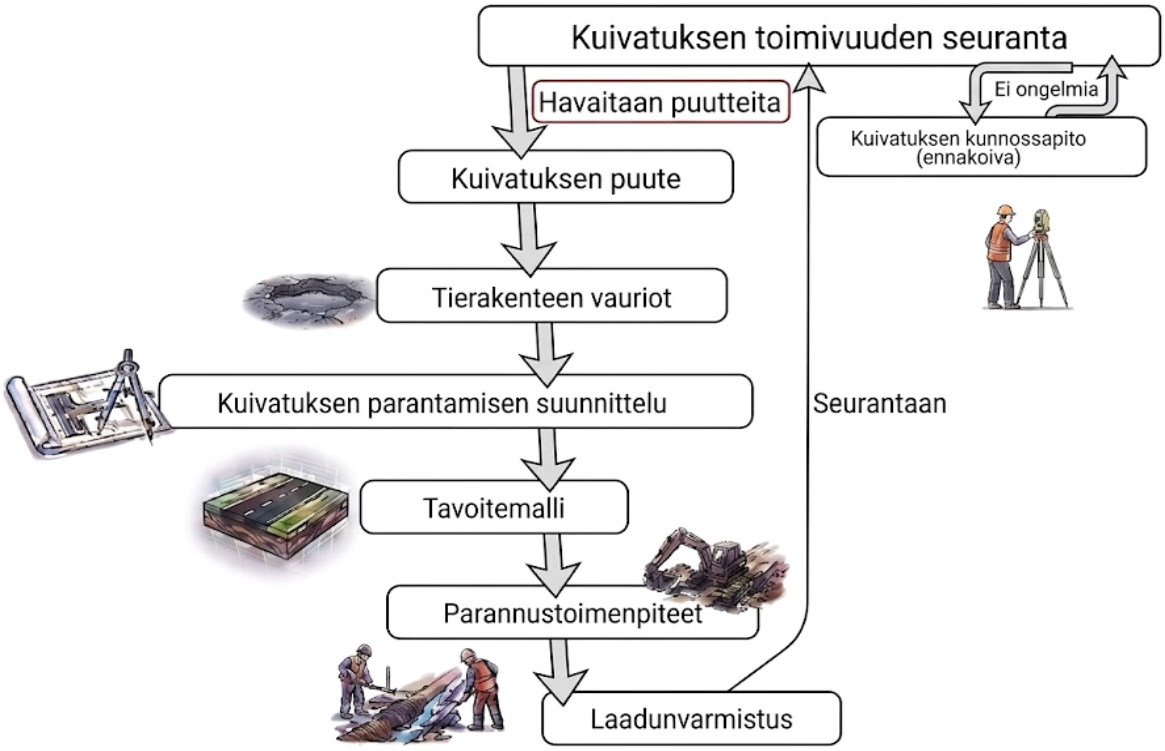
Yhteistä näille ratkaisuille on se, että ne edustavat uusia digitaalisia lähestymistapoja. Menetelmät keskittyvät kuivatuksen tarkasteluun muun muassa mittaamisen, mallintamisen, rakenteellisten ratkaisujen sekä kokonaisvaltaisen suunnittelun ja resilienssin näkökulmista. Kehittyviä tutkimusalueita taas ovat reaaliaikainen integraatio, ylläpitovaihe sekä menetelmien toimivuus pitkällä aikavälillä.

Kuivatuksen digitaalista kehityssuuntaa vievät pidemmälle KUNDI-hankkeen kaltaiset uudet käytännön ratkaisut. KUNDI-hankkeessa pilottikohteille laadittiin laserkeilaus- ja maatutkausaineiston pohjalta digitaaliset pintamallit, joiden perusteella muodostettiin koneohjausmalli (Heilala et al. 2023, s. 24–26). Vaikka kuivatussuunnitelmat laadittiin kaikille pilottikohteille, sivuojien kaivutyöt toteutettiin vuonna 2022 vain maantiellä 11321 ja

maantiellä 11295 (Heilala et al. 2023, s. 29). Laadunvarmistukseen liittyvä laserkeilaus tehtiin maantiellä 11321 ja osin maantiellä 11295 syksyllä 2022 ennen lumen tuloa (Heilala et al. 2023, s. 29). Tien 11295 laadunvarmistusmittauksia ei voitu toteuttaa kokonaisuudessaan syksyllä 2022, koska ojien kaivutyö oli vielä tällöin kesken, minkä vuoksi laadunvarmistusmittauksia täydennettiin kesällä 2023 PEHKO-projektin kuntomittausten yhteydessä.

Kaivutyön jälkeen työn toteutumista arvioitiin laserkeilaamalla tieosuudet uudelleen ja vertaamalla toteumaa pintamalliin. Lisäksi kaivutyön jälkeen haastateltiin eri toimijoita, kuten Väyläviraston, Uudenmaan ELY-keskuksen, pääurakoitsijan ja aliurakoitsijan edustajat. Haastattelujen tarkoitus oli arvioida kuivatuksen kunnossapidon digitaalisen hallinnan onnistumista sekä hyötyjä ja haasteita KUNDI-hankkeessa. (Heilala et al. 2023, s. 32–33)

KUNDI-toimintamallin kuivatuksen kunnossapitoprosessi on lähtenyt liikkeelle siitä, että maantiellä on havaittu kuivatuksen puute (kuva 1). Parannustoimenpiteenä kaivutyöt on toteutettu laadittujen koneohjausmallien perusteella, ja kuivatuksen toimivuus on varmistettu laadunvarmistuksella. Lopuksi on siirrytty kuivatuksen seurantaan sekä ennakoivaan kunnossapitoon.



Kuva 1. KUNDI-toimintamallin mukainen kuivatuksen kunnossapitoprosessi. (Ilaf Rashid)

KUNDI-hankkeen yhteydessä kehitetyn toimintamallin pitkän aikavälin hyötyjä voidaan selvittää seurantatutkimuksen perusteella. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan KUNDI-hankkeessa toteutetun kuivatusparannuksen, ojituksen, vaikutuksia päällystettyjen teiden rakenteelliseen kuntoon, vaurioitumiseen ja urautumiskehitykseen. Työssä tarkastellaan myös tavoitemallin toimivuutta ja käyttökelpoisuutta kuivatuksen kunnossapidossa. Työn päätutkimuskysymys on:

- Mikä on toimivan kuivatuksen vaikutus tien kuntotilaan?

Pääkysymykseen haetaan vastaus kolmen alakysymyksen avulla:

1. Millaisia kuivatustilanteen muutoksia pilottikohteissa on tapahtunut kuluneiden neljän vuoden aikana?
2. Miten kuivatuksen puute näkyy tierakenteessa ja mitä vaurioita tästä aiheutuu?
3. Miten kuivatuksen kunnossapito on vaikuttanut tierakenteen kuntoon pilottikohteissa?

1.3 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus toteutetaan osana TARKKA-hanketta. Seurantatutkimuksessa hyödynnettävä aineisto saadaan Roadscannersilta, ja se koostuu laserkeilaus- ja maatutka-aineistoista sekä ura-, epätasaisuus- ja taipumamittauksista. Tutkimus toteutetaan määrällisenä monitapaustutkimuksena, jossa pilottikohteiden päällysteen kuntoa ja sen kehittymistä analysoidaan vaurioanalyysin sekä ennen–jälkeen-tilanteiden vertailuna tehtävän poikkileikkaus-, urakasvu- ja rakenteellisen analyysin avulla. Lisäksi tutkimustulosten arvioinnissa hyödynnetään laadullista tulkintamenettelyä, sillä tarkoituksena on ymmärtää ja selittää havaittuja ilmiöitä pilottikohteiden rakenteellisesta ja kuivatusolosuhteisiin liittyvästä näkökulmasta.

Päällysteen vaurioinventointi tehdään eri vuosien videoaineistojen perusteella. Inventoitavien teiden vauriot luokitellaan vauriotyypeittäin sekä vaurioiden sijainnit paikannetaan. Vaurioiden esiintymistä verrataan muihin aineistoihin, kuten urautumiseen, rakenteellisiin ominaisuuksiin ja kuivatusratkaisuihin mahdollisten yhteyksien tunnistamiseksi. Vaurioinventoinnissa eri vauriotyypit tunnistetaan, ja niiden perusteella lasketaan vaurio-summa.

Ennen–jälkeen-tarkastelulla voidaan arvioida kuivatustoimenpiteiden vaikutuksia eri aikajänteillä. Kohteiden tilaa tarkastellaan vertaamalla ennen toimenpidettä, toimenpiteen jälkeen ja vuonna 2026 kerättyjen aineistojen perusteella. Näin voidaan arvioida sekä

rakenteen toimivuuteen ja vaurioitumiseen kohdistuvia lyhyen että pitkän aikavälin vaikutuksia. Lisäksi tarkastelussa keskitytään urasyvyyden ja urautumisnopeuden kehityksen analysointiin. Tutkimuksessa hyödynnetään myös poikkileikkausanalyysiä, jossa tarkastellaan sivuojien syvyyttä, luiskien muutoksia, tien reuna-alueiden painumia sekä muita poikkileikkauksen geometrisia muutoksia.

Maatutka-, kantavuus- ja maaperäkartta-aineistoa hyödyntämällä voidaan ymmärtää tierakenteen käyttäytymistä paremmin. Vertailuja tehdään kunnostettujen ja kunnostamattomien tieosuuksien välillä. Vertailun avulla pyritään tunnistamaan, millaisissa olosuhteissa kuivatusparnnus vaikuttaa tehokkaimmin tien rakenteelliseen toimintaan.

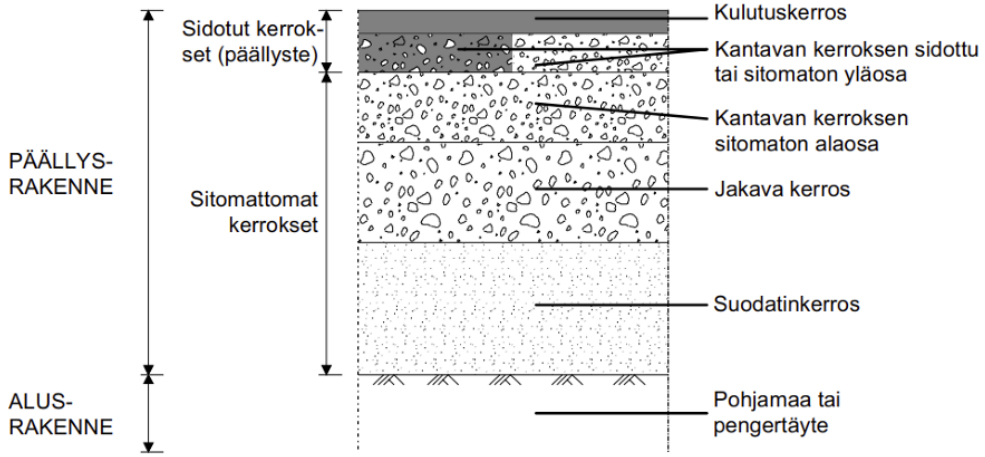
Mittaustulosten esittämiseen ja mallinnukseen käytetään Road Doctor Designer -tietokoneohjelmistoa. Tämä mahdollistaa mittausaineistojen tehokkaan hyödyntämisen ja tukee kuivatuksen kunnossapidon suunnittelua ja arviointia KUNDI-hankkeen tavoitteiden mukaisesti. Maanteiden 11295, 11297 ja 11321 kuivatuksen tilaa havainnollistetaan myös työn yhteydessä tehtävien maastokäyntien avulla. Muita tutkimuksessa hyödynnettäviä aineistoja ovat PEHKO-projektin yhteydessä tehdyt ylläpidon hallintajärjestelmän -kuntotietokartoitukset sekä kohteiden pohjamaata kuvaavat maaperäkartat.

2. KUIVATUSPUUTTEISTA JOHTUVAT TEIDEN VAURIOT

Kuivatus vaikuttaa teiden kuntoon, vaurioitumiseen ja kunnon kehittymiseen ajan kuluessa. Tie alkaa vaurioitua usein siitä, mistä rakenteeseen pääsee vettä. Kun tierakenteessa kosteus lisääntyy, sen kuormituskestävyys heikkenee. Tämän seurauksena pysyvien muodonmuutosten, kuten urautumisen, halkeamien, reunan painumien ja luiskan sortumien, riski kasvaa.

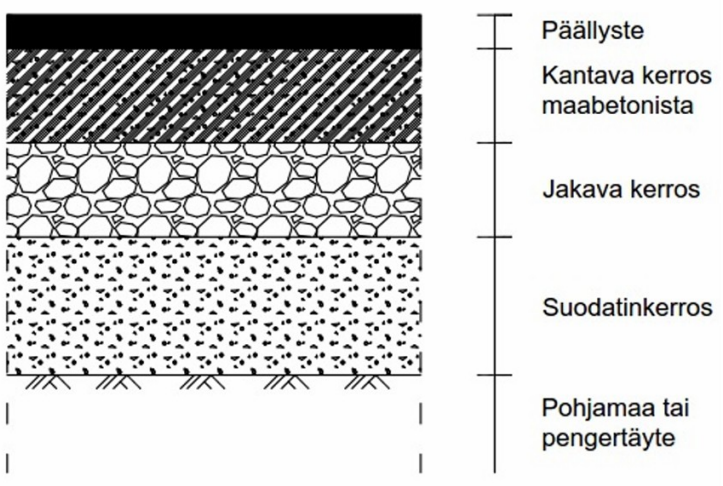
2.1 Tien päällysrakenne

Ymmärtääkseen puutteellisen kuivatuksen vaikutukset tien vaurioitumiskehitykseen on oleellista tunnistaa vauriotyyppi. Näin voidaan selvittää ongelman aiheuttaja ja siihen soveltuva korjaustoimenpide. Vauriot voivat muodostua joko tien päällysrakenteeseen tai alusrakenteeseen. Teiden ja katujen päällysrakennetyyppejä ovat joustavat, puolijäykät ja jäykät päällysrakenteet. Joustavia päällysrakenteita ovat ”perinteinen” rakenne, louherakenne, erilaisia sivutuotemateriaaleja hyödyntävät ratkaisut sekä syväasfalttirakenne. Kuvassa 2 on esitetty joustava päällysrakenne, jossa ylimpänä ovat bitumilla sidotut kerrokset ja niiden alapuolella sitomattomat rakennekerrokset.



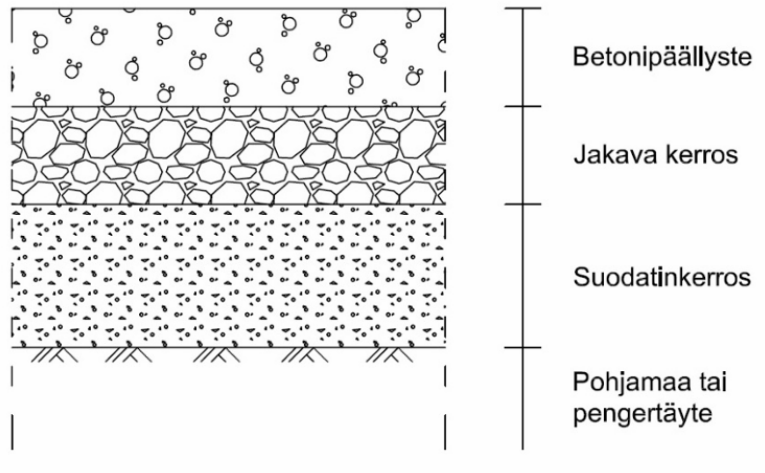
Kuva 2. Tavanomainen joustava päällysrakenne. (Belt et al. 2002, s.11)

Puolijäykkä päällysrakenne poikkeaa joustavasta päällysrakenteesta siten, että tämän ainakin yksi kerros esimerkiksi kantava kerros on sidottu hydraulisella sideaineella useimmiten sementillä (kuva 3). Sementillä sidottu rakennekerros on niin sanottua maabetonia. (Ehrola 1996, s. 147) Suomen maanteillä puolijäykkää päällysrakennemallia ei juurikaan ole käytetty.



Kuva 3. Puolijäykkä päällysrakenne. (Ehrola 1996, s. 147)

Jäykkien päällysrakenteiden kohdalla ei ole erillistä päällys- ja kantavaa kerrosta, vaan päällysrakenteen ylimpänä kerroksena on betonipäällyste (kuva 4). Jäykkä päällysrakenne ei sovellu kohteisiin, joissa pohjamaa on sekalaatuista. Siihen syntyy herkästi epätasaisuuksia esimerkiksi epätasaisten painumien ja routimisilmiöiden seurauksena (Lätti 2016, s. 31). Suomessa testattiin 1900-luvulla betonipäällysteisiä teitä (Tielaitos 1993a, s. 12). Niiden toimivuutta seurattaessa havaittiin, että betonipäällyste ei kestänyt nastarenkaiden aiheuttamaa voimakasta kulutusta (Lätti 2016, s. 31; Tielaitos 1993a, s. 36). Betonipäällysteiden heikon soveltuvuuden Suomen olosuhteisiin sekä nastarenkaiden aiheuttaman kulumisen vuoksi olemassa olleet betonipäällysteiset tiet päällystettiin myöhemmin asfaltilla (Lätti 2016, s. 31).



Kuva 4. Jäykkä päällysrakenne. (Ehrola 1996, s. 148)

Parhaiten nastarengaskulutukseen ja tien tavoiteominaisuuksiin soveltuva päällysrakennetyyppi on tavanomainen joustava päällysrakennemalli. Tämän vuoksi kyseinen rakenneratkaisu on Suomessa yleisimmin käytetty päällysrakennetyyppi. Taulukossa 1 on koottuna päällysrakennekerrosten tehtävät.

Taulukko 1. Tavanomaisen päällysrakenteen rakennekerrosten tehtävät (Belt et al. 2002, s.11–12).

Päällysrakenne		***Tehtävä***
Sidotut kerrokset	Kulutuskerros	On vettä läpäisemätön ja estää veden pääsyä tierakenteeseen. Takaa, että on turvallista, miellyttävää ja taloudellista ajaa. Ottaa vastaan vetorasituksia ja jakaa kuormitusta laajemmalle alueelle.
	Kantavan kerroksen sidottu tai sitomaton yläosa	Muodostaa jakavan kerroksen kanssa jäykän rakenteen. Sidottu yläosa ottaa vastaan vetorasituksia ja jakaa kuormitusta laajemmalle alueelle
Sitomattomat kerrokset	Kantavan kerroksen alaosa	Jakaa liikennekuormaa, jolloin alusrakenteeseen kohdistuva rasitus on pienempi.
	Jakava kerros	Toimii kantavan kerroksen tavoin. Auttaa kuivattamaan kantavaa kerrosta.
	Suodatinkerros	Käytetään aina, kun alusrakennemateriaali on routivaa. Estää päällysrakenteen ja alusrakenteen materiaalien sekoittumista keskenään. Estää veden kapillaarisen nousun.

Bitumi toimii sidottujen kerrosten sideaineena, jolloin rakennusmateriaalina näissä kerroksissa on asfaltti. Käytettävän asfaltin tyyppi riippuu tien maantieteellisestä sijainnista sekä liikenteen määrästä ja laadusta. Perinteisen päällysrakenteen sitomattomien kerrosten kohdalla käytetään esimerkiksi suodatinkerroksessa hiekkaa, jakavassa kerroksessa soraa tai kalliomursketta ja kantavassa kerroksessa sora- tai kalliomursketta. Näiden sitomattomien kerrosten materiaalien soveltuvuus arvioidaan InfraRYL:n rakeisuusvaatimuksista. (Liikennevirasto 2018, s. 46–49)

Kulutuskerroksen tyypillisiä sidottuja päällysrakennemateriaaleja ovat vilkasliikenteisillä teillä esimerkiksi asfalttibetoni (AB) ja vähäliikenteisillä teillä pehmeä asfalttibetoni (PAB) (Liikennevirasto, 2018, s. 61). Pehmeä asfalttibetoni (PAB) voidaan luokitella käytetyn sideaineen perusteella pehmeällä bitumilla valmistettavaan PAB-B:hen ja viskositeettiluokitellulla pehmeällä tiebitumilla valmistettavaan PAB-V:hen (PANK ry 2017). Asfalttibetoni on rakenteeltaan jäykin päällystetyyppi, kun taas pehmeät asfalttibetonit ovat joustavampia. PAB-B:n jäykkyyttä kuvaava E-moduuli on noin 1 650 MPa ja PAB-V:n noin 1 400 MPa (Liikennevirasto 2018, s. 61).

Päällysteiden kunto luokitellaan Väyläviraston (2026b) mukaan viiteen luokaan: erittäin hyvä (KL5), hyvä (KL4), tyydyttävä (KL3), huono (KL2) ja erittäin huono (KL1). Päällysteeseen voi muodostua erilaisia vaurioita (taulukko 2), joista kuivatuksen kunnossapidon kannalta merkittävimpiä ovat hulevesien aiheuttamat vauriot. Kuivatuksen toimivuuden vaikutuksia päällystevaurioiden kehittymiseen käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.2.

Taulukko 2. Päällystetyn tiestön vauriot (Belt et al. 2002, s.39).

Päätyyppi	***Alatyyppi***
Halkeama	Poikkihalkeama
	Pituushalkeama
	Vinohalkeama
	Saumahalkeama
	Verkkohalkeama
Epätasaisuus	Pituussuuntainen epätasaisuus
	Poikkisuuntainen epätasaisuus
Hajoamisvaurio	Purkauma
	Reikä

2.2 Päällysrakeenteen vaurioituminen

2.2.1 Urautuminen

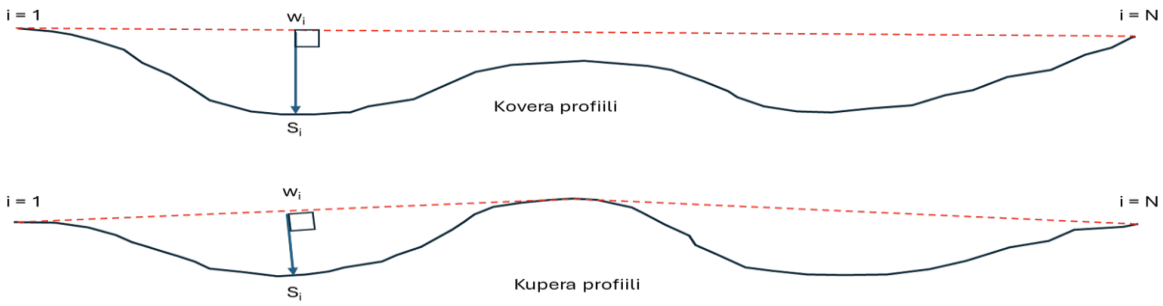
Poikittainen epätasaisuus näkyy tien pinnalla usein kahtena urana ajoneuvojen pyörien tavanomaisten kulku-urien kohdalla (Lampinen 1993, s. 9). Keskiharjanne kuvaa urien välisen harjanteen korkeutta suhteessa urien pohjien kautta määritettyyn suoraan (Lampinen 1993, s. 37). Uramaksimi puolestaan määräytyy vasemman tai oikean uran maksimiarvon perusteella. Määritystapa riippuu siitä, onko uraprofiili kovera vai kupera (kuva 5). Uramaksimi lasketaan kaavalla (1)

$$\mathrm{URA}_{\max} = \mathrm{maks}(\mathrm{w_i} - \mathrm{s_i}), \mathrm{kun\ i} = 1 - \mathrm{N}, \quad (1)$$

missä w_i on kuvitellun langan korkeus kohdassa i,

s_i poikkiprofiilipiste kohdassa i ja

N poikkisuuntaisten mittauspisteiden lukumäärä (Virtala et al. 2026, s. 24).



Kuva 5. Maksimiuran määrittämien. (Virtala et al. 2026, s. 25)

Urakasvunopeus voidaan määrittää eri mittausvuosien uramaksimien perusteella kaavalla (2)

$$\mathrm{U_{kasvunopeus}} = \frac{U_{max,2} - U_{max,1}}{t_2 - t_2}, \quad (2)$$

missä

$U_{kasvunopeus}$ = urakasvunopeus [mm/vuosi]

$U_{max,1}$ = alkuhetken maksmiura [mm]

$U_{max,2}$ = loppuhetken maksmiura [mm]

t_1 = aika alkuhetkellä [vuosi]

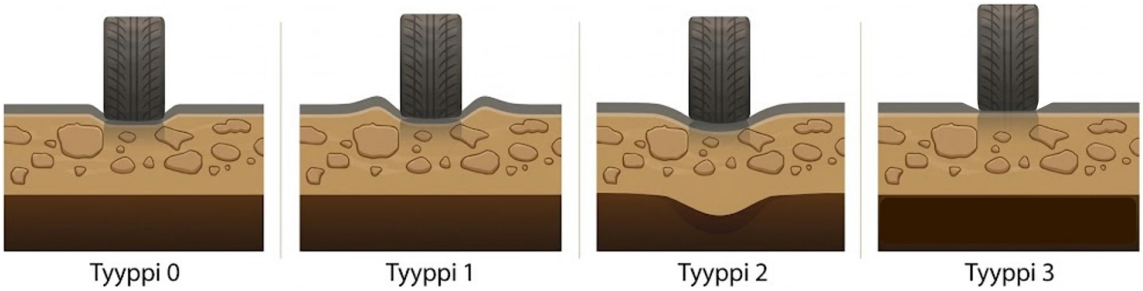
t_2 = aika loppuhetkellä [vuosi].

Tien urasyvyyksien ja urakasvunopeuksien seurannalla voidaan ylläpitää ajomukavuutta ja liikenneturvallisuutta sekä hallita tien pinnan epätasaisuuksia. Lisäksi urautuminen heikentää kuivatuksen tehokkuutta, sillä uriin kerääntyvä vesi voi haitata liikennettä ja kulkeutua päällysteen halkeamien sekä muiden vaurioiden kautta alempiin päällysrakennekerroksiin (Dawson & Kolisoja 2006, s. 7). Urautumisen eri lajit ja syyt ovat jaoteltuna taulukossa 3.

Taulukko 3. Urautumislajit ja aiheuttajat. (Lampinen 1993, s. 80)

Urautumislaji	***Aiheuttaja***
1. Nastarengaskulutus	Nastarengasliikenne
2. Rakennekerrosten tiivistyminen	Raskas liikenne
3. Plastinen deformaatio	Raskas liikenne
4. Alku-urautuminen	Työvirhe (levitys, jyräys, liikenne ja vanhat urat)

Urautumisesta johtuvat muodonmuutokset voivat ilmetä eri muodoissa. Dawson ja Kolisoja (2006) luokittelevat nämä muodonmuutokset ROADEX III -projektissa neljään eri tyyppiin: 0, 1, 2 ja 3 (kuva 6). Tyypin 0 urautuminen johtuu vedellä kyllästymättömien päällysrakenne- ja pohjamaamateriaalien tiivistymisestä kuormituksen vaikutuksesta. Tien rakentamisen jälkeinen tyypin 0 tiivistyminen on normaalia ja odotettavissa, sekä itsestään hidastuvaa. Tiivistyminen lisää materiaalien jäykkyyttä, jolloin kuorma pääsee jakautumaan paremmin. Tämän seurauksena alusrakenteeseen kohdistuva rasitus vähenee, mikä jälleen minimoi myös urautumisen määrää ja riskiä kyseisellä tasolla.



Kuva 6. Uratyyppien muodonmuutokset. (Muokattu lähteestä Roadex Network n.d.)

Urautumiseen vaikuttavat routa ja kosteus, joiden yhteisvaikutus aiheuttaa routanousua sekä sulamiskaudella päällysrakenteen ja pohjamaan kantavuuden heikkenemistä. Tämä korostuu erityisesti silloin, kun rakennekerroksiin on kertynyt vettä puutteellisen kuivatuksen seurauksena. Roudan sulamiskaudella tyypin 0 urakehitys jatkuu tierakenteen kerrosten tiivistyessä. Löyhtyneiden rakennekerrosten leikkausmuodonmuutokset sekä alusrakenteen vaihtelu lisäävät urautumista ja tien pituussuuntaista vaihtelua. (Dawson & Kolisoja 2006, s. 8)

Tyypin 1 urautumisessa sidotun kerroksen alapinnan läheisyydessä voi syntyä paikallisia leikkausmuodonmuutoksia, jos materiaalin leikkauslujuus ei ole riittävä. Tällöin plastinen muodonmuutos aiheuttaa kohouman ajouran viereen. Hyvässä tapauksessa tyypin 1 urautumisessa alusrakenteen pinnassa ei tapahdu lainkaan muodonmuutoksia. (Dawson & Kolisoja 2006, s. 9–10)

Tyypin 2 urautuminen syntyy, kun muodonmuutokset tapahtuvat alusrakenteessa. Päällysrakenne painuu alusrakenteen mukana, mutta rakennekerrosten paksuudet säilyvät ennallaan. Maamassan siirtyminen aiheuttaa pintaan leveän uran, jonka reunoille muodostuu vähäistä kohoumaa. Ääritapauksessa päällysteeseen muodostuneita uria on paikattu toistuvasti, mutta alusrakenteen urautuminen on jatkunut. Tällöin alusrakenne voi puristua ylöspäin ajourien välistä ja reuna-alueilta, jolloin myös kiviaines seuraa tätä muodonmuutosta. (Dawson & Kolisoja 2006, s.11)

Tyypin 3 urautumista havaitaan pääasiassa pohjoisilla alueilla, joissa päällysteen urautuminen johtuu nastarengaskulutuksesta (Dawson & Kolisoja 2006, s. 11). Tämän tyypin urautuminen ei aiheuta ongelmia vähäliikenteisillä teillä. Kuitenkin kun keskimääräinen vuorokausiliikenne (KVL) ylittää 3 000 ajoneuvoa vuorokaudessa, tyypin 3 urautuminen voi kuluttaa päällystettä merkittävästi, minkä vuoksi urasyvyyttä ja urakasvunopeutta tulee seurata vakavampien vaurioiden välttämiseksi (Dawson & Kolisoja 2006, s. 11; Roadex Network n.d). Märkä tienpinta lisää nastarengaskulutusta (Lampinen 1993, s. 81).

Tyyppien 0, 1 ja 2 urautumien on tyypillistä alueilla, joissa esiintyy routaa. Roudan sulaessa heikon rakennekerroksen kantavuus heikkenee rakennekerroksen löyhtymisen ja kosteuspitoisuuden kasvun seurauksena. Siksi esimerkiksi tyypin 2 urautuminen havaitaan usein vain keväällä, jolloin urautuminen on voimasta. Urautuminen on käytännössä seurausta eri urautumismekanismien yhteisvaikutuksesta. (Dawson & Kolisoja 2006, 11–12)

2.2.2 Reikiintyminen

Päällysteeseen muodostuu reikiä monesta eri syystä. Reikien syntymisen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa päällysteen ikä ja materiaalin laatu, liikenteen määrä ja laatu, jäätymis-sulamissyklit, kuivatus sekä kunnossapito. Päällysteen vauriotyypeistä reiät haittaavat liikennettä eniten (Väylävirasto 2019b, s. 14).

Reiät syntyvät päällysteen avoimiin ja saumakohtiin, kun päällysteen purkautuvasta pinnasta irtoaa kiviainesta (Belt et al. 2022, s. 59; Väylävirasto 2024). Kun sideaineen esimerkiksi bitumin ja kiviaineksen välinen sidos katkeaa, syntyy purkaumia (Belt et al. 2022, s. 59). Reiät voivat olla luonteeltaan loivareunaisia, teräväreunaisia, matalia ja syviä. Liikenneturvallisuutta vaarantavat etenkin ajourien kohdalla olevat syvät ja teräväreunaiset reiät. (Väylävirasto 2019b, s.14) Päällysteen pinnan purkautumisen syy-seuraussuhteet ovat esitettynä taulukossa 4.

Taulukko 4. Purkautumisen syy-seuraussuhteet (Väylävirasto 2019b, s. 14).

Syy	***Seuraus***
Päällysteen lajittuminen	Aiheuttaa pinnan avoimuutta
Liian pieni sideainepitoisuus ja märkä alusta sekä puutteellinen liimaus	Heikentää materiaalien välistä tartuntaa
Liian alhainen levitys- ja tiivistyslämpötila	Heikentää massan tiivistymistä
Liian ohut päällyste suhteessa maksimiraekokoon	Heikko rakenne
Sideaineen ja kiviaineksen huono tartunta	Sidos ei kestä rasitusta
Harvat saumat	Lisää heikkoja kohtia
Massan huono jäätymis-sulamiskestävyys	Rakenne vaurioituu
Tierakenteen puutteellinen kuivatus	Vesi vaurioittaa rakennetta
Sitomattoman kantavan kerroksen rakeisuuslajittumat	Epätasainen tuki päällysteelle
Päällystäminen sateella	Heikentää laatua

Purkaumat ovat yksi reikiintymisen esiasteista ja niin ovat myös halkeamat. Purkaumia kehittyy nopeasti esimerkiksi verkkohalkeamien kohdalla (Väylävirasto 2019b, s. 15). Halkeamat ovat yleisin asfalttipäällysteissä esiintyvä vauriotyyppi. Ne syntyvät materiaalin väsyessä toistuvan kuormituksen seurauksena sekä muiden tekijöiden vaikutuksesta. Halkeamat lyhentävät tien käyttöikää (Leonovich et al. 2014). Muita halkeamien yleisiä syitä ovat alusrakenteen epätasaisista painumista aiheutuvat pystysuuntaiset siirtymät sekä lämpötilavaihteluiden, liikennekuormituksen ja rakentamisen aikaisten virheiden aiheuttamat vaakasuuntaiset muodonmuutokset. (Leonovich et al. 2014; Väylävirasto 2024). Kuvassa 7 havaitaan maantien 11297 päällysteessä purkaumia, kulumista, halkeamia ja vanhoja paikkauksia.



Kuva 7. Päällysteen kulumat, purkaumat ja paikkaukset eräällä maantien 11297 tiejaksolla. (Ilaf Rashid 5.6.2026)

Ilman lämpötilan vaihtelut aiheuttavat lämpöjännityksiä, jotka johtavat halkeamien syntymiseen. Auringon säteily nopeuttaa asfalttipäällysteen vanhenemista bitumin koostumuksen muuttuessa. Lämpöhalkeamat alkavat päällysteen pinnasta ja etenevät alaspäin. Lisäksi halkeamat voivat muuttua nopeasti rei'iksi, kun vaurioitunut asfaltti altistuu kosteudelle ja jäätymis-sulamissyklit kiihdyttävät vaurion etenemistä veden laajenemisen seurauksena (Väylävirasto 2024). Väsymishalkeamat syntyvät päällysteen alapinnassa vetojännitysten vaikutuksesta ajoneuvokuormituksen aiheuttaman taipumisen seurauksena. Heijastushalkeamat puolestaan saavat alkunsa alemmissa asfalttikerroksissa olevista vanhoista halkeamista ja etenevät kohti päällysteen pintaa. (Leonovich et al. 2014)

Suuret akselikuormat lisäävät raskaasti liikennöidyillä teillä päällysteen halkeilua ja materiaalin irtoamista (Wang et al. 2025). Urien reunoille syntyvät mikrohalkeamat voivat talven aikana kasvaa entisestään (Ahmad & Khawaja 2018). Ajoneuvojen jarrutus voi aiheuttaa päällystekerroksen siirtymistä suhteessa alla oleviin rakennekerroksiin, miksi erityisesti korkeissa lämpötiloissa ja jarrutuspaikoissa päällysteeseen voi muodostua akselikuormien seurauksena poikittaisia aaltoilevia muodonmuutoksia (Wang et al. 2025).

Roadex Networkin (n.d.) mukaan päällystemateriaalien laatu vaikuttaa merkittävästi reikien muodostumiseen. Kestävät asfaltit sietävät paremmin liikenteen aiheuttamaa rasitusta, kun taas heikkolaatuiset materiaalit kuluvat ja rapautuvat nopeammin. Päällysteen vaurioituminen voi johtua bitumisten kerrosten rapautumisesta, joka liittyy usein kosteuden vaikutuksiin. Rapautumista esiintyy erityisesti tilanteissa, joissa päällysteen laatu on heikko ja vettä pääsee rakenteeseen tai kun sidottujen kerrosten alla olevien sitomattomien kerrosten kuivatus toimii puutteellisesti. Tällöin voi syntyä niin sanottu strippingilmiö, jossa bitumin ja kiviaineksen välinen tartunta heikkenee. Kun päällysteen alapuolella on runsaasti vettä, raskaan liikenteen kuormitus voi aiheuttaa rakenteeseen voimakkaita hydraulisia paineiskuja, jotka rikkovat materiaalien välisiä sidoksia. Jos päällyste

on lisäksi hyvin huokoinen, vesi voi alkaa liikkua rakenteessa pumppautumalla. Yksi keino parantaa päällysteen kestävyyttä on geosynteettien käyttö. (Marienfeld 2013; Neelkamal & Raja 2017).

Kunnossapidolla on tärkeä rooli reikiintymisen ehkäisyssä. Ennalta ehkäisevillä toimenpiteillä voidaan estää veden tunkeutumista rakenteeseen ja hidastaa vaurioiden kehitystä (Mallick & El-Korch 2017). Reikiintyminen aiheuttaa huomattavia kustannuksia sekä tienpitäjille että tienkäyttäjille. Mitä pidemmälle vauriokehitys pääsee, sitä korkeammaksi korjaus- ja kunnossapitokustannukset kasvavat. Huonossa kunnossa oleva tienpinta kuluttaa myös renkaita ja heikentää ajomukavuutta. (Butrinov et al. 2024; Vu et al. 2017)

2.2.3 Veden kerääntyminen ja kosteuden lisääntyminen

Tien pinnalla seisova sade- tai sulamisvesi on merkki kuivatuksen puutteellisesta toimivuudesta. Kosteus pääsee siirtymään päällystevaurioiden kautta alempiin rakennekerroksiin esimerkiksi kantavaan kerrokseen ja pidemmälle pohjamaahan asti. Rakennekerroksissa oleva ylimääräinen vesi heikentää näiden kerrosten kuormituskestävyysominaisuuksia, kuten lujuutta ja jäykkyyttä, sekä lyhentää tien käyttöikää. Lisäksi tien pinnalla seisova vesi edesauttaa tien vauriokehitystä. (Ghasia et al. 2019; Karthic et al. 2025)

Vesi voi siirtyä myös päällysteen läpi molekulaarisen diffuusion seurauksena. Sidottujen kerrosten vedenläpäisevyyteen vaikuttaa muun muassa huokosten koko eli tyhjätila sekä niiden jakautuminen. Asfaltti voi olla vettä läpäisevä, mikäli tyhjätila on enemmän kuin 7–8 %. Ilmahuokosten määrän kasvu lisää päällysteen vedenläpäisevyyttä. Näin voi käydä, jos päällystemassan koostumus on huono tai tämän levitys ja tiivistys on puutteellinen. Ilmahuokoset voivat tällöin täyttyä vedellä, jonka jäätymisestä aiheutuva tilavuuden kasvu lisää tyhjätilaa entisestään. Ilmiön seurauksena sidotut kerrokset altistuvat vaurioille ja niiden kautta vesi pääsee suotautumaan tierakenteeseen. Suotautumiseen vaikuttaa vedenläpäisevyyden, vaurioiden määrän ja koon lisäksi sateen rankkuus ja kesto. (Roadex Network n.d)

Vesi voi myös aiheuttaa advektion avulla tapahtuvaa kulkeutumista. Tässä asfaltin bitumista ja hienoaineksesta koostuva mastiksi kulkeutuu veden mukana päällysteen makrohuokosrakenteessa. Pitkällä aikavälillä tämä voi heikentää päällysteen rakennetta ja vähentää sen kestävyyttä. (Roadex Network n.d)

Aho ja Saarenketo (2006, s. 20) toteavat, että rakenteen sisäiset kuivatusongelmat johtuvat usein siitä, että rakennekerroksiin jää vettä sitovia materiaaleja tai vanhoja rakenteita, jotka estävät veden poistumisen. Tällöin muodostuu kosteusloukku, jossa vesi jää

rakennekerrosten väliin. Liikennekuormitus kasvattaa vedenpainetta rakenteessa, mikä nopeuttaa päällysteen halkeilua ja urautumista. Ongelma korostuu erityisesti silloin, kun uuden päällysteen alle jää vanhoja vettä läpäisemättömiä kerroksia. Kosteusloukkujen ehkäisemiseksi vanhojen rakenteiden kunto tulee selvittää ennen päällystämistä. Tarvittaessa kosteat ja heikkolaatuiset rakennekerrokset poistetaan tai jyrsitään sekoitettavaksi uusiin rakennekerroksiin. Samalla rakenteeseen on järjestettävä toimiva vedenpoisto, jotta kosteutta ei pääse kertymään kerrosten väliin.

Myös kallioalueilla tien routaongelmat johtuvat usein veden kertymisestä rakenteisiin. Kallio estää veden luonnollisen kulkeutumisen maaperässä, jolloin kosteutta jää tien rakennekerroksiin ja kallion painanteisiin. Talvella rakenteisiin kertynyt vesi jäätyy ja aiheuttaa routanousua sekä rakenteen epätasaista käyttäytymistä. Ongelmaa voidaan vähentää esimerkiksi salaojituksella ja syväkuivatuksella sekä poistamalla vettä keräämiä kallion painanteita. (Aho & Saarenketo 2006, s.19–20)

Lisäksi tien poikkikaltevuuden optimointi ja riittävän viemäröintikapasiteetin varmistaminen ovat keskeisiä keinoja veden kertymisen ehkäisemisessä (Sukur et al. 2023). Säännöllinen kunnossapito, kuten viemärien, rumpujen ja ojien puhdistus sekä kunnon tarkastaminen, on välttämätöntä kuivatusjärjestelmän toimivuuden ylläpitämiseksi ja tien rakenteen pitkäaikaisen kestävyyden varmistamiseksi (Väylävirasto 2026a). Toimiva kuivatus vähentää kosteuden kertymistä rakennekerroksiin ja ehkäisee siten veden aiheuttamia vaurioita.

2.2.4 Tierakenteen suunnittelun puutteet

Tierakenteen vauriot voivat johtua huonosti toimivista kuivatusratkaisuista ja -rakenteista. Tiealueen kuivatusongelmat voivat johtua siitä, että maaston ominaisuuksia, pohjaveden käyttäytymistä tai rakenteen vedenpoistoa ei ole huomioitu riittävän hyvin suunnitteluvaiheessa. Ongelmia aiheutuu kuitenkin myös kuivatuksen kunnossapidon puutteista. Yleisiä ongelmia ovat reunapainumat, jotka johtuvat liian ohuista rakennekerroksista, liian jyrkistä luiskista tai riittämättömästä tien leveydestä. Tällaisissa tapauksissa tien reunat eivät kestä niihin kohdistuvaa kuormitusta, minkä seurauksena rakenteeseen syntyy pysyviä muodonmuutoksia. (Väylävirasto 2024)

Erityisesti alavassa maastossa ongelmien taustalla on se, että topografia ei mahdollista veden luontaista poistumista tiealueelta. Lisäksi pohjaveden pinta voi sijaita hyvin lähellä tierakennetta, jolloin rakenteeseen siirtyy jatkuvasti kosteutta. Tasaisessa maastossa veden johtaminen pois tien läheisyydestä on vaikeaa, minkä vuoksi rakenteen kosteuspitoisuus kasvaa ja kantavuus heikkenee. Alavassa sekä tasaisessa maastossa rakenne voidaan nostaa ympäröivää maastoa korkeammalle karkeilla ja hyvin vettä läpäisevillä

materiaaleilla. Lisäksi vettä voidaan johtaa pois imeytys- ja kuivatusojien avulla. Tarvittaessa rakenteeseen voidaan rakentaa pitkiä salaojia tai syväkuivatusjärjestelmiä, joilla pohjaveden pintaa lasketaan riittävästi rakenteen alapuolelle. (Aho & Saarenketo 2006, s. 18–19)

Leikkausalueilla kuivatusongelmia aiheuttaa usein korkea pohjaveden pinta sekä puutteellinen sivuojitus. Pohjavesi voi nousta leikkauksen puoleiselle kaistalle, jos tie sijoittuu liian lähelle pohjaveden pintaa tai jos sivuojat eivät toimi suunnitellulla tavalla. Tukkeutuneet tai riittämättömät ojat estävät veden tehokkaan poistumisen, jolloin vettä kertyy rakenteeseen. Tämä aiheuttaa merkittäviä kantavuusongelmia erityisesti kevätsulamisen aikana. Leikkausalueiden ongelmia voidaan vähentää puhdistamalla ja syventämällä ojia sekä varmistamalla, että veden kulkureitit pysyvät avoimina. Tarvittaessa pohjaveden pintaa alennetaan kuivatusrakenteilla ja tierakennetta vahvistetaan erityisesti leikkauksen puolelta. (Aho & Saarenketo 2006, s. 17–18)

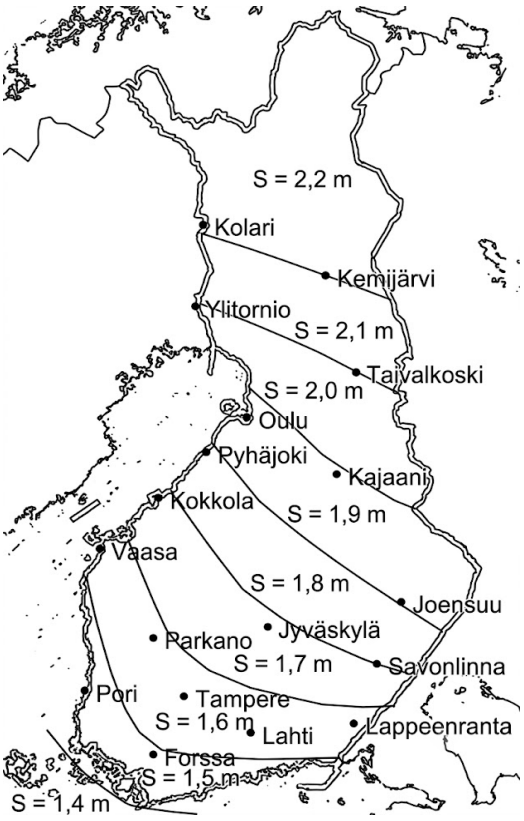
Leikkausluiskien eroosio puolestaan johtuu yleensä liian jyrkistä luiskista, korkeasta pohjaveden pinnasta tai runsaasta veden virtauksesta. Jos luiskan materiaali on eroosioherkkää, sade- ja sulamisvedet kuluttavat sitä vähitellen. Tämä voi heikentää kuivatusjärjestelmän toimintaa ja lisätä maa-aineksen kulkeutumista ojiin. Eroosio-ongelmia voidaan ehkäistä loiventamalla luiskia, rakentamalla niskaojia sekä suojaamalla luiskapinnat kasvillisuudella, karkealla kivimateriaalilla tai suodatinkankailla. Näillä ratkaisuilla veden virtaus saadaan hallintaan ja maa-aineksen kulkeutuminen estetään. (Aho & Saarenketo 2006, s. 13–15)

Kuivatuksen toimivuuteen vaikuttavat myös maanteihin liittyvät yksityistiet ja maatalousliittymät. Huonokuntoinen tai puutteellisesti rakennettu liittymä voi heikentää teiden kuntoa ja kulkukelpoisuutta sekä vaikeuttaa veden poisjohtumista. Kuivatuksen kannalta edullisinta on, että liittyvä tie sijaitsee päätietä alempana. (Väylävirasto 2026a)

Tierumpujen puutteellinen rakenne tai huono kunto voi johtaa niiden murtumiseen ja rappeutumiseen. Tällöin veden virtaus muuttuu hallitsemattomaksi, mikä voi aiheuttaa eroosiota rummun ympäristössä sekä nostaa pohjaveden pintaa. Äärimmäisessä tapauksessa tierakenne voi sortua rankkasateen seurauksena. Tierumpujen yleisiä ongelmia ovat painaumat, vedentuloaukon tukkeutuminen, routanousut, liian pieni rumpukoko sekä rummun tai sen sisääntuloaukon virheellinen asennus. (Aho & Saarenketo 2006, s. 13–14)

2.3 Routanousuista aiheutuvat vauriot

Routaantumisella tarkoitetaan maassa olevan veden jäätymistä (Vesi.fi n.d). Routimisessa taas jäätyvään maahan imeytyy kapillaarisesti lisävettä alemmista maakerroksista ja pohjavedestä, jolloin routavyöhykkeeseen muodostuu jäälinssejä tai yhtenäisiä jääkerroksia. Nämä aiheuttavat merkittävän osan routanoususta. (Tie- ja maarakennustekniikan laitos 1979, s. 1) Tierakenteen mitoittava roudansyvyys (S) määritetään kuvan 8 esittämien aluekohtaisten syvyyksien perusteella. Se kuvaa roudan tunkeutumissyvyyttä mitoitustalven pakkasolosuhteissa (Liikennevirasto 2018, s. 26).



Kuva 8. Mitoittava roudansyvyys. (Liikennevirasto 2018, s. 26)

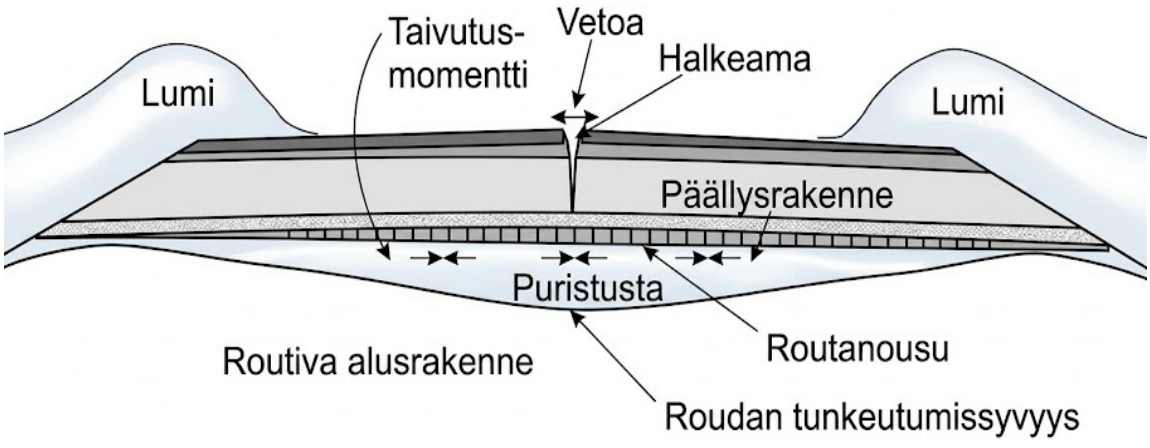
Routanousulla tarkoitetaan routimisen aiheuttamaa tien pinnan kohoamista (Tie- ja maarakennustekniikan laitos 1979, s. 3). Tien eri rakennekerrokset ja alusrakenteen erilaiset routimisominaisuudet reagoivat eri tavoin routimiseen, minkä seurauksena routanousut ovat epätasaisia sekä tierakenteissa että tien pinnassa. Liikennevirasto (2018, s. 18–19) jakaa pohjamaata kahteen laatuluokkaan: tasalaatuinen pohjamaa ja sekalaatuinen pohjamaa. Pohjamaan laatuluokka on yksi merkittävimmistä routanousuun vaikuttavista tekijöistä (taulukko 5). Tasalaatuisella pohjalla routanousu on yleensä melko tasaista, koska pohjamaan ominaisuudet ja routimisherkkyys eivät vaihtele merkittävästi tiejakson eri osissa.

Taulukko 5. Tien routanousuun vaikuttavat tekijät (Liikennevirasto 2018, s. 29).

Routanousuun vaikuttavat tekijät	
Tien vaatimusluokka	Liikennemäärä
	Ajonopeus
	Rakenteen tyyppi
	Muut rakenteet: putket, kaapelit jne.
Pohjamaan laatu	Tasalaatuinen pohjamaa
	Sekalaatuinen pohjamaa
Tierakenteen vaurioherkkyys	Louherakenne
	Lämpöeriste
	Hauras stabilointi

Pysyviä vaurioita muodostuu, kun routanousujen aiheuttama vetorasitus ylittää rakenteen vetolujuuden (Väylävirasto 2023a, s. 5) Tällöin epätasainen routanousu rikkoo tien rakennekerroksia esimerkiksi sidottuja päällystekerroksia ja muodostuu erilaisia halkeamia (Belt et al. 2002, s. 39–40). Halkeamat ulottuvat aina syvälle tierakenteeseen (Belt et al. 2002, s. 54). Muodostuneet halkeamat useimmiten joko pituushalkeamia tai ajokaistahalkeamia (Belt et al. 2002, s. 52).

Tien pituussuuntaiset routahalkeamat syntyvät yleensä tien poikkileikkauksen eri osien epätasaisesta routimisesta. Tämä johtuu siitä, että talven aikana aurauksen seurauksena tien reunoille ja sivuojiin kertyy lunta, joka toimii eristävänä kerroksena. Tämän vuoksi routa ulottuu tien reuna-alueilla matalammalle kuin ajoradan keskiosassa, mikä aiheuttaa erisuuruisia routanousuja ja voi johtaa pituussuuntaisten halkeamien esimerkiksi pituussaumahalkeaman syntymiseen (kuva 9). (Belt et al. 2002, s. 52)



Kuva 9. Pituussuuntaisen routahalkeaman syntyminen tien keskialueelle. (Muokattu lähteestä Belt et al. 2002, s.52)

Belt et al. (2002, s. 51–54) toteavat, että suuret routanousut voivat aiheuttaa pituushalkeamia erityisesti kapeilla teillä riippumatta pohjamaan laadusta. Suuren routanousun ohella myös epätasaiset jäätymis-sulamissyklit aiheuttavat halkeamia ja deformaatiota. Suuret routanousut ja pysyvät muodonmuutokset esiintyvät usein samoilla tieosuuksilla. Tästä syystä tien pituussuuntaiset epätasaisuudet sijaitsevat yleensä samoissa kohdissa riippumatta siitä, tarkastellaanko tietä talvella vai kesällä. Korkeat tien pituussuuntaista epätasaisuutta kuvaavien tunnuslukujen arvot voivat viitata ohueen ja rakentamattomaan päällysrakenteeseen, joka on altis epätasaisille routanousuille ja, jonka kantavuus sekä kuormituskestävyys ovat usein riittämättömiä. Sekalaatuisen pohjamaan routanousu on aina epätasaista ja tämän suurin sallittu routanousu on pienempi verrattuna tasalaatuiseen pohjamaahan (Liikennevirasto 2018, s. 29–30). Syynä tähän on esimerkiksi se, että lohkareisessa maastossa epätasaisuudet muuttuvat jyrkemmiksi ja voivat säilyä pitkään tai voimistua vuosi vuodelta (Liikennevirasto 2018, s. 19).

2.4 Pohjamaan kantavuuden heikkeneminen

Liikenneviraston (2018) mukaan väylärakenteiden keskeisimpiä mitoittavia tekijöitä ovat kuormituskestävyys, routakestävyys ja pohjamaan geotekninen kantavuus. Puutteellinen kuivatus heikentää näiden kaikkien tekijöiden toimivuutta, ja vaikutukset ilmenevät selkeästi jokaisella osa-alueella. Routivaan pohjamaahan ja sitomattomiin tien rakennekerroksiin muodostuneet jäälinssit heikentävät sulaessaan tien kantavuutta ja lisäävät sen vesipitoisuutta (Aho & Saarenketo 2006, s. 12). Ohutpäällysteisen (<150 mm) tien rakenteellisessa toiminnassa keskeisessä asemassa ovat sitomattomiin rakennekerroksiin ja pohjamaan yläosaan mobilisoituvat muodonmuutokset (Saarenketo & Männistö 2024, s. 25; Dawson & Kolisoja 2004, s. 14). Koska ohut päällyste jakaa liikennekuormituksesta aiheutuvia jännityksiä vain rajallisesti, rakenteen kantavuus riippuu merkittävästi kantavan kerroksen, jakavan kerroksen ja pohjamaan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista (Belt et al. 2006, s. 14).

Pohjamaan mekaanisilla ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus erityisesti alusrakenteeseen syntyviin muodonmuutoksiin. Pehmeillä ja vedellä kyllästyneillä pohjamailla alusrakenteeseen voi mobilisoitua kantavaa kerrosta suurempia muodonmuutoksia, mikä kasvattaa rakenteen deformaatioriskiä. Lisäksi raskaat ajoneuvoyhdistelmät, kuten 3-akselitelit, voivat aiheuttaa kantavaan kerrokseen yksittäisakseleita suurempia kuormitusvaikutuksia, mikä edelleen lisää vaurioitumisriskiä erityisesti heikon kuivatusolosuhteiden vallitessa. (Isometsä 2024, s. 137–138)

Sekä pohjamaan pehmeneminen että kantavuuden heikkeneminen ovat usein seurausta puutteellisesta kuivatuksesta, minkä vaikutukset näkyvät painumina, urautumisena ja

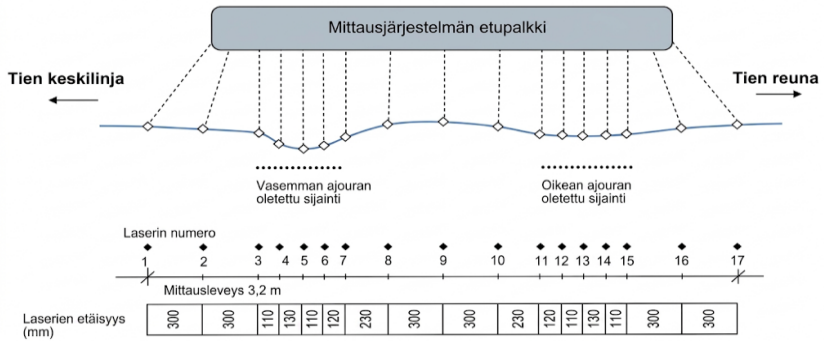
halkeamina (Belt et al. 2002, s. 22; Dawson & Kolisoja 2004, s. 11). Bussman ja West Coast Road Masters Oy (2026) ovat tutkineet, voidaanko maasto-olosuhteiden perusteella ennustaa sekä kantavuuden vuodenaikaisvaihtelua että sitä, kuinka tehokkaasti ojitus tasaa tätä vaihtelua. Kantavuuden heikkeneminen liittyy pohjamaan kosteuteen, joka taas riippuu roudan jäätymis-sulamissyklistä sekä tierakenteen ja pohjamaan kiviaineksen rakeisuusjakaumasta.

Kiviaineksen hienoainespitoisuuden kasvu korostaa materiaalin kosteusherkkyyttä. Tierakenteen sidotut ja sitomattomat kerrokset mitoitetaan InfraRYL:n ja Liikenneviraston (2018) ohjeiden mukaisesti, joten niiden raekokojakaumat ovat yleensä tasalaatuisempia kuin pohjamaassa. Pohjamaaolosuhteiden sekä roudan ja kuivatuksen aiheuttaman kantavuuden vaihtelun tarkastelu auttaa selvittämään kantavuuden vuodenaikaisvaihteluiden eroja (Bussman & West Coast Road Masters Oy 2026, s. 10). Tien kantavuuden tiedetään olevan varsin heikko roudan sulaessa keväällä. Tien kokonaiskantavuus muodostuu pohjamaan kantavuuden ja tierakenteen jäykkyyden yhteisvaikutuksesta (Bussman & West Coast Road Masters Oy 2026, s. 31). Kun tien kantavuus sekä pohjamaan ominaisuudet tunnetaan, voidaan siis arvioida tierakenteen lujuutta ja toimintakykyä.

2.5 Tien kunnon kartoittaminen

2.5.1 Poikittaisen ja pituussuuntaisen epätasaisuuden mittaaminen

Palvelutasomittauksilla (PTM) selvitetään päällystettyjen teiden pinnan tasaisuutta ja muotoa. Mittaukset tehdään ajoneuvoilla, jotka ovat varustettuja lasermittauslaitteistolla. Käyttämällä laserkeilaustekniikkaa mallinnetaan tien pituus- ja poikkiprofiilit. Profiilit voidaan mitata joko pistelasereilla (kuva 10) tai laserskannauksella, jossa tiheä mittauspisteaineisto mahdollistaa tien pinnan muotoa tarkasti kuvaavan 3D-pistepilven muodostamisen. (Roadex Network n.d) Laserkeilauksesta on kerrottu yksityiskohtaisemmin kappaleessa 3.4.1.



Kuva 10. Pistelasermittauslaitteiston ja tiestön poikkileikkausprofiilin periaatekuva. (Tiehallinto, 2007, s. 14)

Poikkiprofiili on aiemmin mitattu 3,2 metriä leveänä. Kapeilla teillä mittauksissa on voitu käyttää myös 2,6 metriä leveää profiilia. (Virtala et al., 2019, s. 15) Mittaukset suoritetaan erikseen kummaltakin ajokaistalta, jolloin tieosuuden poikkiprofiileja voidaan tarkastella ajosuunnittain (suunta 1 ja suunta 2).

Profiilien pohjalta voidaan laskea esimerkiksi urasyvyydet, tien pituussuuntaista tasaisuutta kuvaava IRI *(eng. International Roughness Index)*, sivukaltevuudet sekä harjannekorkeudet (Väylävirasto 2022, s. 13–14). PTM-aineiston tarkastelussa suositellaan käytettäväksi 10 tai 20 metrin keskiarvoja, sillä 100 metrin keskiarvo on liian karkea luotettavan analyysin tekemiseen (Roadex Network n.d.). On havaittu, että 100 metrin keskiarvo voi peittää alleen urautumisen paikallista vaihtelua, jolloin lyhyet mutta voimakkaasti urautuneet kohdat eivät välttämättä erotu aineistosta. Tämän seurauksena rakenteellisista ongelmista johtuvien yksittäisten vauriokohtien tunnistaminen vaikeutuu. Urautumisen syiden tarkastelussa ja rakenteellisten ongelmien paikantamisessa suositellaankin siksi juuri 10 metrin tarkastelutasoa 100 metrin keskiarvoistetun aineiston sijaan. (Liikka 2026, s. 138)

Väyläviraston (2026b, s.32) uudessa toimintalinjassa urasyvyyksien kuntoluokitus perustuu skanneritekniikalla ja dynaamisella mittausleveydellä mitattuihin urasyvyysarvoihin. Menetelmä poikkeaa aiemmin käytetystä mittaustavasta, minkä vuoksi uudella menetelmällä määritetyt urasyvyydet ja niihin perustuvat raja-arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia vanhalla menetelmällä tuotettujen tulosten kanssa. Toimintalinjassa IRI-epätasaisuustunnusluvun tilalle on otettu käyttöön RIDE-tunnusluku. RIDE kuvaa tien pituussuuntaista epätasaisuutta yhdistämällä ajomukavuuteen vaikuttavat ajoneuvon kolme liikekomponenttia: pystyliikkeen, heilahdusliikkeen ja nyökkimisliikkeen (Väylävirasto 2026b, s. 9). Uuden toimintalinjan mukaiset päällysteen kuntomuuttujien raja-arvot ja määräytymisperiaatteet ovat esitetty liitteessä 1.

Mikäli palvelutasomittaukset on tehty vanhalla mittausmenetelmällä, kuntoluokittelussa tulee käyttää Väyläviraston (2022) mukaisia raja-arvoja liitteen 1 mukaisten raja-arvojen (Väyläviraston 2026b) sijaan. Näin varmistetaan, että mittaustulokset ja niitä vastaavat kuntoluokat perustuvat samaan mittausperiaatteeseen. Tässä työssä käytetyistä menetelmistä kerrotaan tarkemmin kappaleissa 4.4, 5.1 ja 5.2.

Ura- ja IRI-tunnuslukuihin perustuva tien kuntoluokitus määräytyy KVL:n ja nopeusrajoituksen perusteella. Urasyvyys (mm) on yksi tärkeimmistä tien kuntoa kuvaavista mittareista. Väyläviraston (2022) toimilinjan mukaan urasyvyys mitataan molemmista ajourista. Analyysissä käytetään usein maksimiurasyvyyttä, koska se kuvaa parhaiten

tien urautumisen vakavuutta. Taulukossa 6 on esitettynä urasyvyyden raja-arvoihin perustuvat kuntoluokat.

Taulukko 6. Urasyvyyden raja-arvot eri kuntoluokille. (Väylävirasto 2022, s. 108)

KVL (ajon./vrk)	Nopeus (km/h)	Kuntoluokka urasyvyyden (mm) perusteella				
		KL 5	KL 4	KL 3	KL 2	KL1
350 – 1 500	≤ 60	≤ 7	7,1–13	13,1–18	18,1–22	> 22
	60–80	≤ 7	7,1–12	12,1–16	16,1–21	> 21
	100	≤ 7	7,1–11	11,1–15	15,1–20	> 20
1 500 – 6 000	≤ 60	≤ 6	6,1–12	12,1–17	17,1–21	> 21
	60–80	≤ 6	6,1–11	11,1–15	15,1–20	> 20
	100	≤ 6	6,1–10	10,1–14	14,1–19	> 19
	120	≤ 6	6,1–9	9,1–14	14,1–18	> 18
> 6 000	≤ 60	≤ 5	5,1–11	11,1–17	17,1–20	> 20
	60–80	≤ 5	5,1–10	10,1–15	15,1–19	> 19
	100	≤ 5	5,1 – 9	9,1–14	14,1–18	> 18
	120	≤ 5	5,1 – 8	8,1–13	13,1–17	> 17

IRI-arvot (mm/m) korreloivat tien kuntotilan kanssa, minkä vuoksi niitä voidaan käyttää tien pinnan kunnon ja yleisen palvelutason arvioinnissa (Tiehallinto 2007, s. 20). IRI-arvon kasvaessa tien pituussuuntainen epätasaisuus lisääntyy (taulukko 7). Epätasaisuuden tulkinta on kuitenkin yleensä vaikeampaa kuin urasyvyyden, koska sen muutoksiin vaikuttavat useat eri tekijät.

Taulukko 7. Tasaisuuden raja-arvot eri kuntoluokille. (Väylävirasto 2022, s. 109)

KVL (ajon./vrk)	Nopeus (km/h)	Kuntoluokka tasaisuuden (IRI mm/m) perusteella				
		KL 5	KL 4	KL 3	KL 2	KL1
< 350	≤ 60	≤ 1,8	1,8–3,4	3,4–5,4	5,4–6,6	> 6,6
	60–80	≤ 1,6	1,6–2,8	2,8–4,6	4,6–5,8	> 5,8
	100	≤ 1,4	1,4–2,6	2,6–4,0	4,0–4,8	> 4,8
350 – 1 500	≤ 60	≤ 1,6	1,6–3,0	3,0–4,6	4,6 – 5,8	> 5,8
	60–80	≤ 1,4	1,4–2,4	2,4–3,8	3,8–5,0	> 5,0
	100	≤ 1,2	1,2–2,2	2,2–3,2	3,2–4,4	> 4,4
1 501 – 6 000	≤ 60	≤ 1,4	1,4–2,6	2,6 – 4,0	4,0 – 5,0	> 5,0
	60–80	≤ 1,2	1,2–2,2	2,2–3,2	3,2–4,2	> 4,2
	100	≤ 1,0	1,0 – 1,8	1,8–2,6	2,6 – 3,6	> 3,6
> 6 000	≤ 60	≤ 1,2	1,2–2,4	2,4–3,6	3,6–4,6	> 4,6
	60–80	≤ 1,2	1,2–2,0	2,0–2,8	2,8–3,8	> 3,8
	100	≤ 1,0	1,0–1,6	1,6–2,2	2,2–3,2	> 3,2
	120	≤ 1,0	1,0–1,4	1,4–1,8	1,8–2,8	> 2,8

Tien urakehitystä voidaan arvioida profilometridatan perusteella kahdella eri tavalla riippuen siitä, kuinka pitkältä ajalta mittaustietoa on saatavilla. Jos profilometridataa on useiden vuosien ajalta, urasyvyyden keskimääräinen vuosittainen kasvu voidaan määrittää aiempien vuosien mittausten avulla lineaarisen regressiomallin avulla. Tämä trendimalli on yleisemmin käytetty urautumisnopeuden määrittämisessä Väyläviraston tietojärjestelmissä. Urasyvyyden kasvua pidetään normaalina, kun urakasvunopeus on alle 0,8–1,0 mm vuodessa liikennemäärän ollessa alle 5000 ajoneuvoa vuorokaudessa ja alle 1,4 mm vuodessa suuremmilla liikennemäärillä. Jos urasyvyys kasvaa yli 2 mm vuodessa, urautuminen voidaan tulkita merkittäväksi ongelmaksi. Mikäli profilometridataa on käytettävissä vain yhdeltä vuodelta, urautumisnopeus voidaan arvioida lineaarisesti viimeisimmän mittaustuloksen, päällystysvuoden ja oletetun 2 mm alku-uran perusteella. (Roadex Network n.d)

2.5.2 Päällystevaurioiden kartoittaminen

Päällystevaurioista tehdään inventointi yleensä noin kolmen vuoden välein. Inventointi suoritetaan ajoneuvosta arvioimalla silmämääräisesti päällysteen vaurioita ja niiden vakavuutta tieosuudella. Havaintojen perusteella tiejaksolle määritetään joko korjaustarve tai merkataan muodossa ”ei korjaustarvetta”. (Väylävirasto 2022, s. 14)

Päällystevauriokartoituksessa (PVK) voidaan hyödyntää vaihtoehtoisesti kuntomittausten videodataa. Videomateriaali täydentää mittausaineistoa tarjoamalla visuaalisen näkymän tien kunnosta ja sen ympäristöstä. Yhdistämällä videodata muihin mittaustuloksiin voidaan poikkeavat kohdat tunnistaa ja analysoida tarkemmin.

Päällystevauriokartoituksessa tunnistetaan erilaisia päällystevaurioita, kuten halkeamia, purkaumia, reikiä, painumia ja paikkauksia (Väylävirasto 2022, s. 14). Päällysteen kuntoluokka määräytyy vaurioiden määrän perusteella (m/100 m), ja raja-arvot vaihtelevat tien liikennemäärän sekä nopeusrajoituksen mukaan (taulukko 8). Kuntoluokan heikkeneminen vastaa suurempaa päällystevaurioiden määrää.

Taulukko 8. Päällystevaurioiden (m/100 m) raja-arvot eri kuntoluokille. (Väylävirasto 2022, s. 109)

KVL (ajon./vrk)	Nopeus (km/h)	Kuntoluokka päällystevaurioiden (m/100 m) perusteella				
		KL 5	KL 4	KL 3	KL 2	KL1
< 350	≤ 60	0	1–45	46–80	81–90	91–100
	60–80	0	1–45	46–80	81–90	91–100
	100	0	1–45	46–80	81–90	91–100
350 – 1 500	≤ 60	0	1–45	46–80	81–90	91–100
	60–80	0	1–35	36–65	66–80	81–100
	100	0	1–35	36–65	66–80	81–100
1 500 – 6 000	≤ 60	0	1–35	36–65	66–80	81–100
	60–80	0	1–35	36–65	66–80	81–100
	100	0	1–35	36–65	66–80	81–100
	120	0	1–25	26–50	51–70	71–100
> 6 000	≤ 60	0	1–25	26–50	51–70	71–100
	60–80	0	1–25	26–50	51–70	71–100
	100	0	1–25	26–50	51–70	71–100
	120	0	1–25	26–50	51–70	71–100

Väyläviraston (2022) päällystevaurioiden kuntoluokitukselle vaihtoehtoisena vauriokartoitusmenetelmänä voidaan käyttää Tielaitoksen (1994) vauriosummamenetelmää. Menetelmä poikkeaa Väyläviraston (2022) käytännöstä siten, että vaurioiden määrä ja vakavuus määritetään niiden pinta-alan perusteella. Lisäksi tarkastelussa käytettävä tunnusluku muodostuu vaurioiden yhteenlasketusta vaikutuksesta eikä yksinomaan vaurioiden osuuksista.

Taulukon 8 mukaisessa Väyläviraston luokituksessa tien enimmäisvaurioarvo on 100. Sen sijaan Tielaitoksen (1994) vauriosummamenetelmässä vauriosumman arvo voi teoriassa olla huomattavasti suurempi, sillä se riippuu tarkasteltavan tiejakson vaurioituneesta pinta-alasta. Esimerkiksi 100 metriä pitkällä tieosuudella vauriosumman teoreettinen enimmäisarvo on tien leveys kerrottuna sadalla. Vauriosumman laskentaperiaatteet ja menetelmän tarkempi kuvaus esitetään kappaleessa 2.6.

2.5.3 Täydentävät mittaukset ja niihin perustuva riskiluokitus

Muita päällystetyillä teillä tarvittaessa tehtäviä kunto- ja rakennemittauksia ovat laserkeilaus, maatutkamittaukset sekä taipumamittaukset (Väylävirasto 2022, s. 15–18). Laserkeilaus on keskeinen tien geometrian mittausmenetelmä, jolla tuotetaan tarkkaa kolmiulotteista pistepilviaineistoa tien pinnasta ja sen ympäristöstä. Aineiston avulla voidaan määrittää esimerkiksi ojanpohjan syvyys, tien poikkileikkausgeometria, urasyvyys sekä rakenteiden muodonmuutoksia. Poikkileikkausten avulla voidaan havaita muun muassa riittämättömän syvät ojat, sortuneet luiskat, painuneet tien reunat sekä ojiin valunut maa-aines. Menetelmän käyttöä rajoittaa erityisesti kasvillisuus, minkä vuoksi mittaukset tehdään yleensä keväällä ennen kasvukauden alkamista. (Roadex Network n.d)

Maatutkamittauksilla tutkitaan tien rakenteen sähköisiä ominaisuuksia. Menetelmän avulla voidaan arvioida rakenteen kosteutta, rakennekerrosten ja päällysteen paksuutta. Kosteusprofiilien avulla voidaan tunnistaa rakenteen kosteammat kohdat, jotka saattavat viitata puutteelliseen kuivatuskykyyn ja kohonneeseen vaurioriskiin. (Roadex Network n.d; Väylävirasto 2022) Kappaleessa 3.4.1 esitellään tarkemmin kuivatuksen kunnossapidossa käytettävien laserkeilauksen ja maatutkaluotauksen toimintaperiaatteet.

Taipumamittauksilla voidaan arvioida tien rakenteellista kuntoa. Perinteisesti mittauksia tehdään pudotuspainolaitteella (PPL), jolla mitataan pistekohtaisesti kuormituksen aiheuttamia taipumia (Väylävirasto 2022, s.15). Mittaustulosten perusteella voidaan arvioida rakenteellista toimintaa ja sen vaihtelua tieosuuden pituussuunnassa sekä paikantaa mahdollisia heikkoja rakennekerroksia. Taipumamittausten avulla määritetään myös rakenteen kuntoa kuvaavat tunnusluvut SCI *(eng. Surface Curvature Index)* ja BCI (eng. *Base Curvature Index)* (Väylävirasto 2022, s.15). Taipumamittaukset tehdään kesällä, jotta tulokset kuvaavat mahdollisimman hyvin rakenteen todellista kantavuutta, sillä talvella jäätynyt rakenne voi antaa todellista parempia mittaustuloksia. (Saarenketo & Männistö 2024, s. 24–45)

SCI_{200} (µm) lasketaan kuormituksen alla mitatun taipuman (D_0) ja 200 mm etäisyydellä kuormituskeskuksesta mitatun taipuman (D_{200}) erotuksena (Spoof & Petäjä 2000, s. 12). Tunnusluku kuvaa, miten rengaskuorma jakautuu päällysteeseen ja kantavan kerrokseen, sekä auttaa tunnistamaan tyypin 1 urautumista. Korkea SCI viittaa päällysrakenteen yläosan heikkoon kuntoon. (Saarenketo & Männistö 2024, s. 24–45) Suomessa ohutpäällysteisten teiden tarkasteluissa käytetään SCI_{200} -indeksiä. SCI_{300}-tunnuslukua (µm) käytetään paksuilla päällysterakenteilla etenkin muualla maailmassa.

BCI_{900} (µm) lasketaan 900 mm etäisyydellä kuormituskeskuksesta mitatun taipuman (D_{900}) ja 1200 mm etäisyydellä kuormituskeskuksesta mitatun taipuman (D_{1200}) erotuk-

sena (Spoof & Petäjä 2000, s. 12). BCI osoittaa, kuinka tehokkaasti päällysrakenne siirtää ja jakaa kuormitusta heikon alusrakenteen varassa. Parametrilla voidaan arvioida tyypin 2 urautumista. Korkea BCI-arvo viittaa pohjamaan heikkoon kantavuuteen ja voi olla merkki pumppautumisongelmasta. (Saarenketo & Männistö 2024, s. 24; Herronen et al. 2022, s. 102)

Mikäli sekä SCI- että BCI-arvot ovat korkeita, voidaan rakenteen tulkita olevan erityisen vaurioherkkä (Saarenketo & Männistö 2024, s. 48–50). Lisäksi yli 60 µm BCI-arvot viittaavat liikennekuormituksen kannalta ongelmallisiin kohtiin. Tällöin syynä on yleensä kuivatuksen heikentynyt toimivuus tai raskaan liikenteen aiheuttama päällysrakenteen väsyminen. (Saarenketo & Männistö 2024, s. 26–27)

Nykyisin taipumatietoa voidaan kerätä myös TSD (eng. *Traffic Speed Deflectometer)* - ja *(eng. Rolling Weight Deflectometee)* -laitteistoilla. Näiden menetelmien etuna on, että mittaukset voidaan suorittaa liikennevirran nopeudella ilman merkittävää haittaa muulle liikenteelle. Toisin kuin perinteinen pudotuspainolaite, joka tuottaa pistemäisiä mittaustuloksia, TSD- ja RWD-laitteistot tuottavat jatkuvaa tietoa tierakenteen kuormitusvasteesta koko tiejakson matkalta, jolloin heikkoja kohtia voidaan kohdentaa paremmin. (Väylävirasto 2022, s. 17)

Saarenkedon ja Männistön (2024) PEHKO-projektissa käyttämä riskianalyysiluokitus (RL) perustuu osittain taipumaindeksiarvoihin. Riskianalyysissä tiet jaetaan niiden kunnon perusteella eri riskiluokkiin. Tien kunnon luokittelu taulukossa 9 esitettyjen parametrien perusteella helpottaa elinkaari- ja riskianalyysejä sekä tukee kunnossapitotarpeiden arviointia. Taulukossa 9 on myös esitetty eri riskiluokkien tyypilliset tunnuspiirteet.

Taulukko 9. Riskianalyysiluokitus (Saarenketo & Männistö 2024, s. 48–50).

Riskiluokka	*Kuvaus*	*Tyypilliset tunnusmerkit*
0	Ei ole odotettavissa kunnostustarpeita seuraavan 5 vuoden aikana.	-
1	Vahva ja kuormitusta kestävä tiejakso.	Päällysteessä ei merkittäviä vaurioita. Urat syviä, mutta urautuminen johtuu pääosin nastarengaskulumisesta. Urautumisnopeus keskimääräinen tai parempi. Päällysteen paksuus > 150 mm ja rakenne homogeeninen.
2	Hyvä tiejakso, mutta kasvava riski rakenteellisiin ongelmiin.	Kuormitus- tai routakestävyyspuutteiden ensimerkkejä. Pieni mutta kasvava määrä kuormitusvaurioita. Urasyvyyden homogeenisuuskerroin 1,3–1,5.
3	Tyydyttävä tiejakso, jossa paikallisia rakenteellisia puutteita.	Paikoin kuormitus- ja/tai routakestävyyspuutteita. Urautuminen liikennemäärään nähden mediaania heikompaa. Kelirikko-, routa- ja kuivatusongelmia. BCI 40–60 ja/tai SCI_{200} > 250. Urasyvyyden homogeenisuuskerroin 1,3–1,5.
4	Heikko tiejakso, jossa selviä rakenteellisia puutteita.	Selviä kuormitus- ja/tai routakestävyysongelmia. Nopeaa urautumista ja vaurioitumista vaikeina talvina. SCI_{200} > 300 ja/tai BCI 60–80. Urasyvyyden homogeenisuuskerroin 1,5–1,7.
5	Erittäin heikko tai epätasainen tiejakso.	Nopea vuosittainen urautuminen ja vaurioituminen. Urautumisnopeus > 2,5 mm/v. SCI_{200} > 350, BCI > 80. Urasyvyyden homogeenisuuskerroin > 1,7. Routaheittoja, suuria sivukaltevuusvaihteluita (RBCSV > 1 %).

Urasyvyyden homogeenisuuskerroin (HK) kuvaa urautumisen tasaisuutta tiejaksolla. Se lasketaan 500 metrin pituiselle tiejaksolle urasyvyyksien jakaumasta jakamalla urasyvyyden 90 %:n prosenttipiste mediaaniarvolla. Toisin sanoen kerroin ilmaisee, kuinka paljon tiejakson voimakkaimmin urautuneet kohdat poikkeavat tiejakson tyypillisestä urasyvyydestä. Mitä pienempi homogeenisuuskerroin on, sitä tasaisemmin urautuminen jakautuu tiejaksolla. Päällysteiden kustannustehokkaassa omaisuudenhallinnassa tavoitteena on, että homogeenisuuskerroin jää alle arvon 1,3. Tällöin tiejaksoa voidaan pitää urasyvyyksien osalta riittävän homogeenisena. Jos kerroin ylittää arvon 1,3, urautuminen on keskittynyt paikallisiin ongelmakohtiin, jolloin kohteelle suositellaan tarkempaa diagnostiikkaa ja täsmäkorjaussuunnitelman laatimista. Korjaustoimenpiteenä voi olla esimerkiksi kuivatuspuutteiden korjaaminen. (Saarenketo & Männistö 2024, s. 52)

Myös Liikka (2026) on käyttänyt tutkimuksessaan taipumaindeksien raja-arvoihin perustuvaa luokittelua (taulukko 10), mikä poikkeaa joiltakin osin Saarenkedon ja Männistön (taulukko 9) luokituksesta. Liikan luokituksessa SCI_{200}-arvojen sijaan käytetään SCI_{300}-arvoja. Suomessa SCI-arvoista SCI_{200}-arvot ovat yleisemmin käytössä. Lisäksi Saarenkedon ja Männistön (2024) PEHKO-projektissa TSD-mittauksista määritetyille SCI_{200}- ja BCI-indekseille on ollut käytössä kolmen kuntoluokan sijaan viisi luokkaa. PEHKO-projektissa käytetyt ja Liikan esittämät raja-arvot ovat pääpiirteissään samankaltaisia, vaikka luokkien määrä poikkeaa toisistaan. Koska taipumaindeksien luokittelulle ei ole vakiintunutta standardia, Liikan kolmiportaisen luokituksen voidaan katsoa antavan riittävän suuntaa antavan kuvan esimerkiksi tarkasteltaessa kunnostettujen ojien vaikutusta taipumaindeksiarvoihin.

Taulukko 10. Taipumaindeksien luokittelu (Liikka 2026, s. 41).

Luokittelu	***SCI_{300}***	***BCI***	***D_0***
(1) Hyvä tai kohtalainen	< 250	< 40	< 600
(2) Ongelmallinen tai huono	250–400	40–80	600–900
(3) Erittäin huono	> 400	> 80	> 900

Saarenketo ja Männistö (2024) jakavat BCI-arvot luokkiin erinomainen, hyvä, kohtalainen, välttävä ja huono. Liikan (2026) luokituksessa hyvä ja kohtalainen on yhdistetty samaan luokkaan, samoin välttävä ja huono. Lisäksi luokitukseen on lisätty erittäin huono -luokka. Erittäin huonon luokan käyttöä voidaan pitää perusteltuna, sillä yli 60 µm BCI-arvoja esiintyy alemmalla tieverkolla melko yleisesti. Luokitusta voidaan edelleen tarkentaa asettamalla erittäin huonon luokan raja-arvoksi yli 80 µm BCI-arvot.

2.6 Vauriosumma ja vaurioitumisnopeus

Päällysteen kuntoa voidaan tarkastella vauriosummalla (VS), joka kuvaa numeerisesti vaurioituneen päällysteen m^2/100 metrin tiejaksolla. Vauriosummaan sisältyvät erilaiset päällystevauriot, kuten halkeamat, reiät, purkaumat ja reunapainumat. Koska eri viotyypit vaikuttavat tien kuntoon eri tavoin, niille on määritetty painokertoimet, joiden avulla vauriot voidaan yhdistää yhdeksi tunnusluvuksi. Vauriosumma lasketaan Tielaitoksen (1994b, s. 11) määrittämän kaavan (2) mukaisesti

$$VS = 0{,}1 \cdot 5 \cdot (V_{pak}) + 0{,}5 \cdot 5 \cdot \left(V_{\frac{poik}{k}}\right) + 1 \cdot 5 \cdot \left(V_{\frac{poi}{l}}\right) + 0{,}5 \cdot \left(V_{\frac{pit}{k}}\right) + 1 \cdot \left(V_{\frac{pit}{l}}\right) + 0{,}1 \cdot \left(V_{\frac{sau}{k}}\right) + 0{,}5 \cdot \left(V_{\frac{sau}{l}}\right) + 1 \cdot (V_{ver}) + 1 \cdot (V_{rei}) + 1 \cdot (V_{pur}), \quad (2)$$

missä

V_{pak} = pakkaskatko [kpl]

$V_{poi/k}$ = poikkihalkeama, kapea [kpl]

$V_{poi/l}$ = poikkihalkeama, leveä [kpl]

$V_{pit/k}$ = pituushalkeama, kapea [m]

$V_{pit/l}$ = pituushalkeama, leveä [m]

$V_{sau/k}$ = saumahalkeama, kapea [m]

$V_{sau/l}$ = saumahalkeama, leveä [m]

V_{ver} = verkkohalkeama [m^2]

V_{rei} = reikä [m^2]

V_{pur} = purkauma [m^2].

Kaavassa (2) kolmen ensimmäisen termin kerroin 5 tarkoitta halkeamien keskipituutta. Vaikka paikkauksia on ennen laskettu vauriosummaan mukaan, nykyään niitä ei huomioida laskennoissa. Leveällä halkeamalla tarkoitetaan pituus-, poikki- tai saumahalkeamaa, joka on avoin, yli kaksi senttimetriä leveä halkeama (Tielaitos 1994a, s. 26). Vauriosumma pyöristetään kokonaisluvuiksi (Tiehallinto 2009, s. 15). (Spoof et al. 2000, s. 15; Tielaitos 1994a, s. 16)

Purkaumaksi luokitellaan vaurio, jossa päällysteestä on irronnut karkeaa kiviainesta. Pelkkää lajittumista tai pinnan kulumista ei kuitenkaan vielä katsota purkaumaksi. Purkaumat inventoidaan pinta-alan perusteella neliömetreinä. Inventointiohjeen mukaan alle yhden neliömetrin laajuiset purkaumat merkitään yhden neliömetrin suuruisiksi. Vastaa-

vasti, jos noin yhden neliömetrin alueella esiintyy useita pieniä purkaumia, niiden yhteisvaikutus kirjataan yhden neliömetrin purkaumana. Pitkiä ja yhtenäisiä ajourissa esiintyviä purkaumanauhoja ei yleensä inventoida erillisinä purkaumina, vaan huomio kiinnitetään päällysteen kuntoon nähden selvästi poikkeaviin ja heikentyneisiin kohtiin. Käytännössä purkauma kirjataan silloin, kun asfaltin pinta on alkanut murentua ja kiviainesta on irronnut päällysteestä. Esimerkiksi 0,3 neliömetrin laajuinen purkauma inventoidaan yhden neliömetrin suuruisena vauriona. (Tielaitos 1994a, s. 32–34)

Kahden inventoijan laatimat vaurioarviot voivat erota toisistaan inventoijan näkemyksen ja inventointihetkellä vallinneiden sääolosuhteiden vuoksi. Vaikka vauriosumma antaa laskennallisen arvion päällysteen kunnosta, se ei kerro vaurion sijainnista, josta voi päätellä esimerkiksi vaurioitumisen todennäköinen syy ja siihen vaikuttavat kuormitus- tai rakenneolosuhteet. (Tiehallinto 2005b, s. 22) Vauriosumma voi kuitenkin antaa hyvän arvion varsinkin kuivatuksen tilasta ja tehokkuudesta, kun vauriokehitystä seurataan tietyin vuosien välein ja vauriosumalaskentoja on saatavilla useammasta vuodesta kuin vaan yhdestä.

Vaikka vauriosumma kuvaa päällysteessä havaittujen vaurioiden määrää ja vakavuutta, se ei kerro riittävästi myöskään tien rakenteellisesta kestävyydestä. Tien kuntoa ja kestävyyttä arvioidaan paremmin vaurioitumisnopeuden avulla, jossa vauriosumma suhteutetaan päällysteen ikään. Vaurioitumisnopeus (VNOP) lasketaan kaavalla (3)

$$\mathrm{VNOP} = \frac{\mathrm{VS}}{\mathrm{IKÄ}^{1,4}}, \tag{3}$$

missä on VS vauriosumma ja IKÄ päällysteen ikä mittaushetkellä. Luotettavan vaurioitumisnopeuden määrittämiseksi päällysteen iän tulisi olla vähintään neljä vuotta, mielellään kuusi vuotta. Vaurioitumisnopeutta ei suositella laskettavaksi kahden inventointikerran vauriosummien erotuksesta, sillä inventointien epävarmuudet voivat tällöin korostua ja vääristää tuloksia. (Tiehallinto 2005b, s. 21)

Vaurioitumisnopeuden perusteella pystytään määrittämään ovatko tiejaksot hitaasti vai nopeasti vaurioituvia. Luokittelussa otetaan huomioon päällystetyyppi, sillä eri päällysteillä on erilaiset ominaisuudet ja vaurioitumiskäyttäytyminen. Tiejakson vaurioituminen katsotaan nopeaksi, kun vaurioitumisnopeus ylittää seuraavat raja-arvot (Tiehallinto 2005b, s. 21):

- AB: > 4 $m^2/v^{1,4}$
- PAB-B: > 5 $m^2/v^{1,4}$
- PAB-V: > 6 $m^2/v^{1,4}$.

Nopeasti vaurioituvat tieosuudet ovat kunnossapidon kannalta erityisen haastavia, sillä ne vaurioituvat usein nopeasti myös uudelleenpäällystyksen jälkeen. Tällaisilla kohteilla pelkkä päällysteen uusiminen ei välttämättä riitä, vaan vaurioitumisen perimmäiset syyt, kuten puutteellinen kuivatus, heikko kantavuus tai routaongelmat, on tunnistettava ja korjattava pitkäaikaisen vaikutuksen saavuttamiseksi. (Tiehallinto 2005b, s. 21)

Koska KUNDI-hankkeen pilottikohteet ovat osa myös PEHKO-projektia, pilottikohteista on saatavilla videoaineistoja useammalta vuodelta. Vauriotyyppien kehitystä voidaan tarkastella vertaamalla laskettua vauriosummaa ja vaurioitumisnopeutta noin neljä vuotta ennen toimenpiteitä, toimenpiteiden toteutusvuonna sekä noin neljä vuotta niiden jälkeen. Tämän tyyppinen vaurioanalyysi mahdollistaa kuivatuksen kunnossapitotoimenpiteiden vaikutusten tarkan arvioinnin päällysteen kunnon ja eri vauriotyyppien kehittymisen näkökulmasta. Pilottikohteiden vaurioanalyysin yksityiskohdat ja tulokset ovat esitettynä kappaleessa 5.3.

3. TEIDEN KUIVATUKSEN KUNNOSSAPITO

Hartikaisen (1981, s. 83–99) mukaan kuivatuksen kunnossapito voidaan jakaa hoitoon, kunnostukseen ja rakenteelliseen parantamiseen. Kuivatuksen hoidolla tarkoitetaan pieniä toimia, jotka ovat suoraan maastoon toteutettavia esimerkiksi reunapalteiden poistaminen. Kunnostusta vaativissa kohteissa parannetaan kuluneita ja toimivuudeltaan heikentyneitä kuivatusrakenteita. Korjaustoimenpiteet edellyttävät ennakkosuunnittelua. Rakenteen parantaminen kuivatuksen osalta tarkoittaa vedenhallinnan toimivuuden kehittämistä osana tien kokonaisrakennetta. Pelkkä olemassa olevien kuivatusrakenteiden kunnossapito ei aina riitä, jolloin kuivatuksen kapasiteettia lisätään esimerkiksi kasvattamalla rumpujen halkaisijaa.

Kuivatuksen kunnossapitoa ohjataan Väyläviraston *Päällystettyjen teiden korjauksen* sekä *Päällystettyjen teiden kuivatuksen kunnossapidon* toimintalinjoilla. Kunnossapidon suunnittelun perustana toimivat puolestaan Liikenneviraston ohjeet *Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu (5/2013)* ja *Vesilaki väylähankkeissa (12/2013)*. Kuivatuksen kunnostuksen kohteita ovat tien rakenne ja kuivatusjärjestelmän osat (Väylävirasto 2019a, s. 10).

3.1 Kunnossapitotarpeen arviointi

Päällystetyt tiet on jaettu ennen kolmeen päällysteiden ylläpitoluokkaan: YP1, YP2 ja YP3 (Eskola 2020, s. 20). Päällystettyjen teiden korjauksen toimintalinjoissa käytetään nykyisin YP-luokituksen sijaan päällysteiden korjausluokitusta (PK), joka jakautuu luokkiin PK1, PK2 ja PK3 (Väylävirasto 2022, s. 23–24). Luokitus perustuu tieosan keskimääräiseen kokonaisliikenteen (KVL) ja raskaan liikenteen (KVL_{raskas}) määrään (taulukko 11). Päällysteen ylläpitoluokkaan vaikuttaa liikennemäärän lisäksi myös tien verkollinen merkitys. (Väylävirasto 2026b, s. 20)

Taulukko 11. Päällysteiden korjausluokkien kriteerit (Väylävirasto 2026b, s. 20).

	PK1	***PK2***	***PK3***
KVL	> 3000	800–3000	< 800
KVL_{raskas}	> 300	80–300	< 80
Muut	- yhdistää tärkeät maakunta- tai aluekeskukset tai - on osa merkittävää elinkeinoelämän kuljetusreittiä tai merkittävää matkaketjua tai - johtaa merkittäviin satamiin tai rajanylityspaikkoihin.	- varmistaa taajamien yhteysvälit maakunta- ja aluekeskuksiin merkittävinä henkilöliikenteen reitteinä tai - varmistaa yhteyden kaikkiin tilastollisiin taajamiin tai - huomioi ELY-keskusten erityisolosuhteisiin perustuvat tarpeet.	

Maanteiden kuivatuksen kunnossapidon hallinta jaetaan kuivausjärjestelmän tiedonhallintaan, ohjelmointiin, suunnitteluun, toteutukseen ja laadunvarmistukseen. Koska kuivatuksen hallinta on monen tekijän kokonaisuus, tähän liittyviä haasteita on myös useita. Aho ja Saarenketo (2006, s. 11) jakavat kuivatusongelmat kolmeen pääluokkaan, jotka ovat kuivatuksen kunnossapitoon liittyvät ongelmat, suunnitteluun liittyvät ongelmat ja muut ongelmat.

Kuivatuksen kunnossapidon lähtökohtana toimii kuivatusjärjestelmän tiedonhallinta, joka jakautuu kuivatusrakenteiden ominaisuus- ja kuntotietoihin sekä tietoon kuivatuksen toimivuudesta. Vaikka kuivatusrakenteet ovat pysyviä, niiden ominaisuustiedot voivat muuttua korjaustoimenpiteiden seurauksena (Roadex Network n.d). Koska kuivatuksen kunnossapito on jatkuvaa toimintaa, tietojen ajantasaisuus on tiedonhallinnan kannalta keskeistä. Tien kuivatuksen kuntoa kuvaavat tiedot on pyritty kokoamaan Tievelho-järjestelmään. Harja-järjestelmässä hallinnoidaan kunnossapidon urakoita ja kuivatusrakenteisiin kohdistuvia toteumatietoja, joita välitetään muihin järjestelmiin. (Väylävirasto 2019a, s. 14–15)

Kuivatusrakenteiden inventoinnissa salaojien purkupaikkojen, tarkastus- ja hulevesikaivojen sekä maantierumpujen sijainnit tallennetaan sujuvoittamaan tien kunnossapitoa. Kuivatuksen toimivuuden inventointi keskittyy määrittämään sivu- ja laskuojien, reunapalteiden sekä rumpujen toimivuutta. Esimerkiksi rumpujen kohdalla selvitetään näiden liettymistä ja vauriota. Inventointi tehdään, kun halutaan selvittää tien kuivatuksen tilaa kunnostusten ohjelmointia ja suunnittelua varten. Useimmiten inventoinnin kohteena ovat päällystetyt tieverkot sekä soratiet. Inventointien tavoitteena on tuottaa kokonaiskuvan kuivatuspuutteiden määrästä ja sijainnista tieverkolla. (Väylävirasto 2019a, s. 15–16)

Kuivatuksen toimivuuden inventoinneissa kirjataan sivuojien toimivuus, päällystevaurioiden ja reunapainumien esiintyminen sekä sivuojarumpujen ja laskuojien kunto, jotka luokitellaan puuttuvaksi, ei kunnossa olevaksi tai kunnossa olevaksi. Inventoinnit tehdään yleensä joko keväällä lumen sulamisen jälkeen tai syksyllä, jolloin ojissa on vesien virtausta eikä kasvusto haittaa tarkastelua. (Väylävirasto 2019a, s. 16–17) Näitä voidaan tarpeen mukaan täydentää erikseen suoritettavilla mittauksilla. Useimmiten käytettyjä mittausmenetelmiä ovat laserkeilaus ja maatutkaus, joiden mittaustuloksista päästään analysoimaan kuivatuksen tilaa tarkemmin. Mittauksia tehdään, kun kyseessä on pinta- ja tien rungon vauriot. Lisäksi kuivatusanalyysissä voidaan hyödyntää PTM:n ja PVK:n tuottamaa aineistoa (Väylävirasto 2022, s. 13–14). Näiden perusteella lasketaan tien kuntoa kuvaavia tunnuslukuja sekä arvioidaan tien kunnon kehittymistä ja tulevia kunnossapito- ja korjaustarpeita (Eskola 2020, s. 36; Väylävirasto 2022, s. 14–15).

Kuivatusanalyysin pohjalta toteutetaan kuivatusparannusten ohjelmointi. Ohjelmoinnissa kuivatuksen kunnostuskohteet priorisoidaan inventointitietojen ja muiden lähtötietojen perusteella käytettävissä olevan rahoituksen mukaan. Priorisoinnissa huomioidaan muun muassa tien merkittävyys, kuivatus- ja päällysterakenteiden kunto sekä muiden tiehankkeiden yhteensovittaminen. Tavoitteena on kohdentaa toimenpiteet tehokkaasti ja parantaa kuivatusta loogisina tiejaksoina. (Väylävirasto 2022, s. 18–19)

Päällysteen vaurioiden ja kuivatuksen kunnon välinen yhteys on keskeinen tarkastelun kohde. Päällysteiden kunnossapidon ohjelmointi perustuu verkkotason analyysiin, jossa hyödynnetään erityisesti urasyvyyttä ja sen kehittymistä teiden kunnon sekä elinkaarikustannusten arvioinnissa. Päällystetyillä teillä ohjelmoinnissa tarkastellaan myös päällystysohjelmaa ja nykyisten päällysteiden kuntoa. (Saarenketo et al. 2012, s. 17–18; Saarenketo & Männistö 2024, s. 53–55)

Roadex Network (n.d) jakaa päällystetyt tiet kolmeen kuivatusluokkaan: hyvä (luokka 1), välttävä (luokka 2) ja huono (luokka 3). Ensimmäinen luokka kuvaa kuivatuksen kuntoa, jossa kuivatus on moitteeton ja poikkileikkaus on säilynyt ennallaan sekä vesi virtaa tien pinnalta ojiin ja ojissa estettä. Toisessa luokassa kuivatuksen tila on heikentynyt ja veden virtaus ei ole enää yhtä sujuvaa. Tien pientareella voi olla palletta sekä muuta kasvillisuutta. Lisäksi ojat ovat alkaneet padottua, ja niiden pohjalle on kertynyt vähän maa-ainesta. Kolmannessa luokassa muodonmuutokset ja vauriot ovat selkeästi havaittavissa. Korkea palle, kasvillisuus ja tien päällysrakenteen vauriot estävät veden virtausta ojiin. Samalla luiskien maa-ainesta on valunut ojan pohjalle, ja rummut ovat liettyneet lähes täysin. Tässä luokassa kuivatus on hyvin huono ja kuivatusjärjestelmän osat ovat lakanneet toimimasta.

3.2 Kuivatuksen kunnossapitoimenpiteet

Kuivatuksen kunnossapidon suunnittelu tapahtuu ohjelmoinnin pohjalta. Ajantasaisella ohjelmoinnilla tavoitellaan tiestön ennakoivaa kunnossapitoa. Säännöllisten tarkastusten ja oikea-aikaisten kunnossapitotoimenpiteiden avulla voidaan varmistaa tien ja sen kuivatusrakenteiden asianmukainen toimivuus. Tällä toimintatavalla voidaan estää laajojen vaurioiden kehittymistä.

Vaikka toimintatapaa voidaan pitää ideaalisena, ennakoiva kunnossapito ei aina johda optimaaliseen kuivatustilaan, jolloin pienten korjausten sijaan joudutaan suunnittelemaan laajempia toimenpiteitä. Kuivatuksen kunnossapitoratkaisuja on monta, ja niiden valinta riippuu muun muassa kohteen olosuhteista, vaurion laajuudesta sekä käytettävissä olevista resursseista. Ennen toimenpiteiden toteutusta varmistetaan, että tämä

vastaa juuri kuivatuksen tarpeeseen ja soveltuu ympäristöön. (Laitinen et al. 1992, s. 9) Kerätyt mittausaineistot yhdistetään jokaiselle tieosalle perustettuun omaan projektiin käyttämällä esimerkiksi Road Doctor Designer -tietokoneohjelmistoa tai vastaavanlaista ohjelmistoa. Tämän avulla voidaan sitoa kuivatusanalyysin tulokset, poikkileikkausdata ja digitaalivideot paikkatietoihin. (Roadex Network n.d.)

Kunnossapitotoimenpiteet voivat määräytyä esimerkiksi taulukon 9 mukaisten riskianalyysiluokituksen perusteella. Riskiluokassa 0 ei tarvita toimenpiteitä, ja riskiluokassa 1 riittää tiejakson seuranta sekä normaali ennakoiva kunnossapito. Riskiluokassa 2 suositellaan proaktiivista kunnostusta, kuten päällysteen vahvistamista, mikrohalkeamien suojaamista sirotepintauksella sekä kuivatuspuutteiden välitöntä korjaamista. Riskiluokassa 3 painopiste on kuivatuksen ja talvihoidon parantamisessa, kun taas rakenteelliset korjaukset toteutetaan myöhemmässä vaiheessa erillisen diagnoosin perusteella. Riskiluokan 4 tiejaksot kunnostetaan vaiheittain rakenteita vahvistamalla esimerkiksi teräsverkkoratkaisuilla. Riskiluokan 5 tiejakso vaatii välitöntä korjausta, joka voi sisältää täsmäkorjauksia, rakennekerrosten uusimista tai vahvistamista, massanvaihtoja, kuivatusjärjestelmän parantamista sekä sivukaltevuusongelmien korjaamista. Näissä kohteissa tarkempi, diagnostiikkaan perustuva suunnittelu on välttämätöntä. (Saarenketo et al. 2012, s. 11–12; Saarenketo & Männistö 2024, s. 48–50)

Päällysteet

Kuivatuksen puutteet voivat aiheuttaa päällystevaurioita, jolloin päällysteen kunnostaminen tulee tarpeelliseksi. Riippuen vaurion laajuudesta päällyste voidaan joko korjata osittain tai uusia täysin (Tie- ja vesirakennuslaitos 1976, s. 79–80). Päällysteiden korjaamiseen on useita vaihtoehtoisia menetelmiä. Korjaustoimenpiteitä vaativia päällystevaurioita ovat muun muassa tien poikittaiset ja pitkittäiset epätasaisuudet, verkkohalkeamat, pituus- ja poikkihalkeamat, päällysteen saumahalkeamat, reiät, purkaumat sekä roudan aiheuttamat vauriot (Väylävirasto 2023a, s. 11).

Korjausmenetelmien valintaan vaikuttavat muun muassa vaurion laatu, päällystetyyppi, tien liikenteellinen merkitys, vaurioitumisaste, korjaustyön kiireellisyys, vuodenaika sekä käytettävissä olevat resurssit. Yleisimpiä päällysteen korjaustapoja ovat päällysteen uusiminen ja paikkaus. Joskus pintakunnon parantaminen yksin ei riitä, vaan tien rakennetta tulee parantaa. Rakennetta voidaan parantaa päällystystyön yhteydessä korjaamalla muun muassa routaheittoja, painumia, sivukaltevuuksia ja leveitä pituushalkeamia. Vaihtoehtoisesti voidaan myös vahvistaa rakennetta sekoitusjyrsinnällä, kevennyksillä, stabiloinnilla ja käyttämällä vahvisteita. (Väylävirasto 2022, s. 34–39)

Korjauksissa on ensisijaisesti varmistettava liikenneturvallisuus ja liikennettä haittaavat vauriot on korjattava viipymättä. Korjausmenetelmä tulee valita tien merkityksen ja siihen kohdistuvan kuormituksen perusteella. (Väylävirasto 2019b, s. 19–21) Lisäksi sen tulee olla mahdollisimman pysyvä sekä yhteensopiva olemassa olevan päällysteen kanssa. Peruskorjauksilla pyritään pidentämään päällysteen käyttöikää. (Tie- ja vesirakennuslaitos 1976, s. 80)

Avo-ojat

Avo-ojat ovat osa tien kuivatusjärjestelmää, joiden tehtävänä on poistaa tiealueelle kertyvä vesi johtamalla se pois ympäröivään maastoon. Avo-ojia kunnostamalla voidaan pitää ojat tien kuivatustarvetta vastaavassa kunnossa. Vaihtoehtoisesti kasvavan kuivatuksen kuivatustarpeen tyydyttämiseksi voidaan rakentaa uusia ojia. (Tiehallinto 2005a, s. 66–67; Tie- ja vesirakennuslaitos 1976, s. 122–124) Ojien kunnossapidon tavoitteena on säilyttää luiskakaltevuudet suunnitelmien mukaisina, estää ojien tukkeutuminen sekä poistaa ojan pohjalle kertynyt maa-aines, jolloin veden virtaus sekä ojiin että ojissa on esteetön (Tielaitos 1993b, s. 20–22). Muita avo-ojien tukkeutumisen syitä ovat muun muassa kasvillisuus, routimisen nostamat maakivet ojissa sekä pakkautunut lumi (Tie- ja vesirakennuslaitos 1976, s. 33).

Tiehallinnon (2002a) ohjeiden mukaan ojan syvyyden tulee olla routimattomilla maalajeilla vähintään 15 cm ja routivilla maalajeilla 25–35 cm suhteessa päällysrakenteen alapintaan. KUNDI-hankkeessa kunnossapidon tavoitteena oli suunnitella ojasyvyydet niin, että ojan pohja sijaitsi noin 20–30 cm päällysrakenteen alapinnan alapuolella. Tavoitesyvyys on valittu routimattomille ja routiville maille annettujen suositusten välistä. Myös liittymärummut vaikuttavat ojan syvyyteen. Sivuojan pohjan tulisi sijaita rummun alapinnan tasolla, jotta veden kulku ojissa olisi esteetöntä (Tiehallinto 2002b). KUNDI-hankkeen suunnitteluperiaatteita ja laadunvarmistuksen tuloksia on kuvattu tarkemmin kappaleessa 4.2.

Ojien kunnostuksen avulla voidaan ehkäistä tien pinnalla seisovan veden aiheuttamia päällystevaurioita ja liikenneturvallisuusriskejä. Avo-ojien pääkorjaustoimenpiteitä ovat sivu- ja laskuojien kaivutyöt, perkaus ja reunapalteiden poisto. Ojien kuntoa parannetaan myös vahvistamalla ojien pohjia ja luiskia erityisesti kohdista, jotka ovat alttiita syöpyä tai sortua (Aho & Saarenketo 2006, s. 14–15). Mikäli ojissa on maakiviä tai kallion pinta, nämä voidaan poistaa tai louhia. (Väylävirasto 2019a, s. 24–26; Tie- ja vesirakennuslaitos 1976, s. 124)

Salaojat, putkiviemärit ja pumppaamot

Salaojien tehtävänä on kerätä ja poistaa maahan imeytynyttä vettä sekä tarvittaessa alentaa pohjaveden tasoa. Salaojitus toteutetaan yleensä rei'itetyillä salaojaputkilla, joita ympäröi suodatinmateriaali. Vesi suotautuu putkiin reikien kautta koko putken pituudelta ja johdetaan edelleen kuivatusjärjestelmään. (Tie- ja vesirakennuslaitos 1976, s. 36) Salaojien kunnossapidon tavoitteena on varmistaa veden esteetön virtaus, minkä vuoksi niitä puhdistetaan ja huuhdellaan tarvittaessa sekä pidetään laskuaukot toimintakuntoisina (Väylävirasto 2019a, s. 27).

Hulevesi- ja viemäriputkien tehtävänä on kerätä ja johtaa pois tien pinnalle sekä kuivatusrakenteisiin kertyvät vedet. Veden esteettömän johtamisen varmistamiseksi putkista ja kaivoista poistetaan säännöllisesti lietettä, kasvillisuutta ja muita virtausta haittaavia tukoksia (Väylävirasto 2019a, s. 27). Lisäksi rakenteiden kuntoa seurataan ja mahdolliset vauriot korjataan tarpeen mukaan. (Tie- ja vesirakennuslaitos 1976, s. 36)

Pumppaamoita käytetään kohteissa, joissa hulevesiä ei voida johtaa pois painovoimaisesti maaston korkeussuhteiden vuoksi (Väylävirasto 2019a, s. 24). Niiden tehtävänä on nostaa ja siirtää vesi edelleen kuivatusjärjestelmässä. Pumppaamoiden kunnossapito koostuu pumppujen, rakenteiden sekä sähkö- ja ohjauslaitteiden säännöllisistä tarkastuksista, huolloista ja tarvittavista korjauksista. (Tie- ja vesirakennuslaitos 1976, s.)

Rummut

Liittymärumpu sijoitetaan liittymän alle, ja tämän tehtävänä on mahdollistaa veden virtaus liittymän katkaiseman sivuojan läpi. Maantierumpu puolestaan alittaa maantien ja johtaa vedet tien toiselta puolelta toiselle. (Väylävirasto 2019a, s. 8) Rumpujen kunnossapidon tavoitteena on säilyttää veden esteetön virtaus avo-ojista rumpujen kautta laskuojiin.

Kunnossapitoa tarvitaan esimerkiksi silloin, kun rumpuihin kertyy pintavesien mukana kulkeutuvaa maa-ainesta, kasvillisuutta tai roskaa. Lisäksi talviolosuhteissa rummut voivat jäätyä umpeen, mikä heikentää niiden vedenjohtokykyä. (Aho & Saarenketo 2006, s. 34) Rummut voidaan kunnostaa puhdistamalla niihin kertyneet lietteet (Väylävirasto 2019a, s. 28). Mikäli rumpu jäätyy umpeen, tämä voidaan sulattaa esimerkiksi rummun sisään vietävällä putkella, joka saadaan kuumennettua höyryllä tai sähköllä. Vanhan rummun kunto voi heiketä, veden määrä alueella voi lisääntyä tai maa-alueiden kuivattamisesta aiheutuva perustamissyvyys voi muuttua, jolloin rumpu tulee uusia. Rumpujen vauriot ovat helpoiten havaittavissa poutajakson jälkeen. (Aho & Saarenketo 2006, s. 13–14; Tie- ja vesirakennuslaitos 1976, s. 135).

Kuivatuksen toimivuuden kannalta on tärkeää kiinnittää huomilta myös yksityisliittymiin ja näiden kunnossapitoon, sillä huonokuntoinen tai puuttuva yksityisliittymän rumpu heikentää tien kuntoa. Liittymän haltija vastaa liittymän yleisestä kunnosta ja turvallisuudesta. (Väylävirasto 2026a) Liittymässä olevien rumpujen kunnossapidosta vastaa kuitenkin elinvoimakeskus (STT info 2024).

Routavauriot

Ongelmia aiheuttaa myös tierakenteen kyllästyminen vedellä kelirikkokaudella ja leutojen talvien jäätymis-sulamissyklien aikana. Tästä johtuvia ongelmia ovat muun muassa kantavuusongelmat, päällysteen urautuminen ja tierakenteen pysyvät muodonmuutokset. Routivaan pohjamaahan tai sitomattomiin tien rakennekerroksiin voi muodostua jäälinssejä, jotka sulaessa heikentävät tien kantavuutta. (Leonovich et al. 2014; Väylävirasto 2024)

Routavauriot johtuvat yleensä kuivatuksen puutteesta ja niistä aiheutuu tien rakenteeseen huomattavia muutoksia ja tierungon vaurioita. Lisäksi hulevesien imeytyminen tierakenteeseen ojista aiheuttaa halkeilua. Routavaurioita voidaan korjata massanvaihdolla, jos ne heikentävät liikenneturvallisuutta tai aiheuttavat päällysteen vaurioitumista. Tällöin routiva maa-aines poistetaan siirtymäkiilasyvyyteen asti ja korvataan routimattomalla materiaalilla. Routavaurioista aiheutuvia haittoja voidaan vähentää tehostamalla tien kuivatusjärjestelmää. (Tie- ja maarakennustekniikan laitos 1979, s. 4–13)

3.3 Kuivatuksen kunnossapidon haasteet

Tien kuivatuksen kunnossapidon keskeisimmät haasteet liittyvät kuivatusrakenteiden toimintakyvyn heikkenemiseen tai rakenteellisiin puutteisiin, jotka estävät veden tehokkaan poisjohtamisen tiealueelta (Väylävirasto 2019a, s. 24). Puutteellinen kuivatus lisää tierakenteen kosteusrasitusta, heikentää kantavuutta ja nopeuttaa vaurioiden syntymistä. Yksi yleisimmistä kunnossapitohaasteista on ojien, rumpujen ja muiden kuivatusrakenteiden liettyminen. Ojiin kertyy ajan myötä maa-ainesta, hiekkaa, kasvijätteitä ja muuta kiintoainesta, mikä pienentää niiden vedenjohtokykyä. Vastaavasti rumpujen liettyminen tai tukkeutuminen estää veden vapaan virtauksen, jolloin vettä alkaa kertyä tiealueelle ja tierakenteisiin. Mikäli puhdistustoimenpiteitä ei tehdä säännöllisesti, kuivatusjärjestelmän toimintakyky heikkenee nopeasti. (Roadex Network n.d.; Aho & Saarenketo 2006, s. 33–34)

Toinen merkittävä haaste on ojien ja luiskien kasvillisuuden liikakasvu. Kasvillisuus hidastaa veden virtausta, vähentää ojien hydraulista kapasiteettia ja voi ajan myötä johtaa

ojien umpeenkasvuun. Lisäksi puiden ja pensaiden juuret voivat aiheuttaa vaurioita kuivatusrakenteisiin. Tieympäristössä kasvillisuuden leviäminen voi myös heikentää näkyvyyttä ja vaikeuttaa kunnossapitotöiden suorittamista. (Roadex Network n.d.)

Yksityistieliittymät aiheuttavat usein myös haasteita kuivatuksen kunnossapidolle, sillä liittymien yhteydessä sivuojat voivat madaltua tai tukkeutua. Tällöin vesi voi jäädä tiealueelle, mikä heikentää kuivatusjärjestelmän toimivuutta ja lisää tien rakenteellisten vaurioiden riskiä. Myös talviaikaiset kuivatusongelmat, kuten lumivallien myöhäinen poistaminen, voivat estää sulamisvesien hallittua johtumista ja lisätä tien reuna-alueiden muodonmuutoksia sekä epätasaisuutta. Lisäksi suolan käyttö yhdessä ohuiden päällysteiden kanssa voi nopeuttaa päällystevaurioiden syntymistä. (Saarenketo & Männistö 2024, s. 56–59)

Tien poikkileikkauksen latistuminen ja reunapalteiden muodostuminen ovat yleisiä erityisesti vanhemmilla tieosuuksilla. Kun tien pinta menettää alkuperäisen sivukaltevuutensa tai tien reunaan muodostuu materiaalikertymiä, pintavedet eivät enää pääse virtaamaan tehokkaasti sivuojiin (Aho & Saarenketo 2006, s. 16). Tällöin vettä jää seisomaan ajoradalle tai rakenteisiin, mikä lisää routavaurioiden sekä kantavuusongelmien riskiä. (Roadex Network n.d)

Kuivatuksen toimivuutta heikentävät myös rumpuihin liittyvät ongelmat. Rummut voivat olla tukkeutuneita, vaurioituneita tai sijaita väärässä korkeusasemassa. Joissakin tapauksissa rumpu voi puuttua kokonaan. Lisäksi monilla teillä ongelmana on laskuojien riittämätön kapasiteetti tai huono kunto. Vaikka sivuojat olisivat kunnossa, kuivatus ei toimi, jos vesi ei pääse poistumaan laskuojien kautta edelleen vastaanottavaan vesistöön. Tukkeutuneet tai liian matalat laskuojat aiheuttavat veden padottumista, jolloin myös tiealueen kuivatus heikkenee. (Roadex Network n.d.)

Kuivatuksen kunnossapidossa haasteita aiheuttavat ojaluiskien eroosio ja sortumat. Erityisesti rankkasateiden ja sulamisvesien aikana virtaava vesi voi kuluttaa luiskia ja aiheuttaa maa-aineksen valumista ojiin. Sortumat voivat tukkia kuivatusrakenteita, estää veden virtaamisen ja lisätä tierakenteeseen kohdistuvaa kosteusrasitusta. Tämän vuoksi ojien ja luiskien kuntoa on seurattava jatkuvasti. (Aho & Saarenketo 2006, s. 14–15)

Shaaban (2022) korostaa, että ilmastonmuutoksen aiheuttama sade- ja tulvatapahtumien yleistyminen on viime vuosina lisännyt kuivatuksen kunnossapitotarvetta ja vaikeuttanut kuivatusjärjestelmien toimintakyvyn ylläpitämistä. Rankkasateiden voimistuessa ja yleistyessä kuivatusjärjestelmät altistuvat entistä suuremmalle kuormitukselle, mikä lisää kunnossapidon tarvetta ja korostaa kuivatusrakenteiden toimintakyvyn merkitystä. Tulvien esiintyminen on myös lisääntynyt erityisesti kaupungistuneilla alueilla.

Kuivatusjärjestelmien kunnossapidolle on tyypillistä, että ongelmat syntyvät nopeasti. Ojien umpeenkasvu, liettyminen sekä rumpujen tukkeutuminen voivat kehittyä muutamien viikkojen tai kuukausien aikana. Tämän vuoksi kuivatus vaatii jatkuvaa seurantaa ja säännöllisiä kunnossapitotoimenpiteitä, kuten niittoa, ojien perkauksia, rumpujen puhdistusta ja luiskien muotoilua. Hoitamattomina kuivatusrakenteet menettävät toimintakykynsä nopeasti. (Roadex Network n.d.)

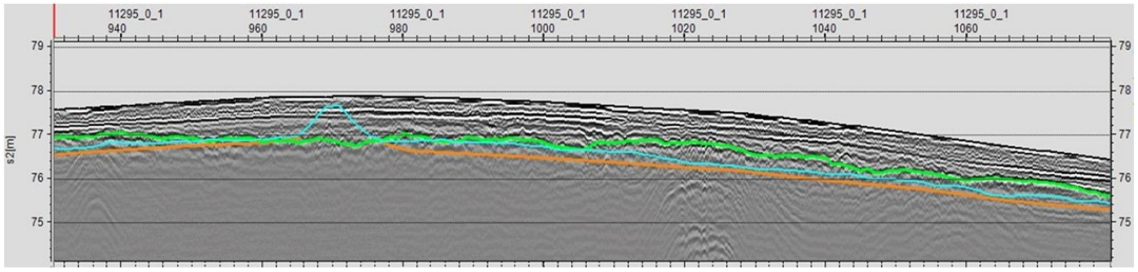
3.4 Digitaaliset ratkaisut

3.4.1 KUNDI-toimintamalli

KUNDI-hankkeen tavoitteena oli edistää digitalisaation hyödyntämistä kunnossapidon tukena laatimalla kuivatussuunnitelma laserkeilauksella tuotetun maastomallin pohjalta siten, että siinä huomioitiin pilottikohteiden erityispiirteet ja paikalliset olosuhteet. Hankkeen ojitussuunnittelussa hyödynnettiin laserkeilausaineiston lisäksi maatutka-aineistoja. Hankkeessa ojanpohjan suunnitteluperiaatteena oli sijoittaa uusi ojanpohja 20–30 cm tien päällysrakenteen alapintaa syvemmälle, jotta veden virtaus ojasta tierakenteeseen estyisi eikä vesi pääsisi nousemaan kapillaarisesti tien päällysrakenteeseen. (Heilala et al. 2023, s. 16)

Päällysrakenteen alapinta määritettiin Roadscannersin keräämästä maatutka-aineistosta. Koska tarkempia pohjatutkimuksia ei ollut käytettävissä, maatutka-aineistosta määritetyn päällysrakenteen alapinnan syvyystulkinnan tarkkuuden arvioitiin olevan noin 10 %. Maatutkaus tehtiin molemmilta kaistoilta ulompien ajourien kohdalta (suunta 1 ja 2), mikä mahdollisti ojien suunnittelun tarkemmin tien molemmin puolin. (Heilala et al. 2023, s. 16)

Kuvassa 11 on maantien 11295 paaluvälin 900–1100 maatutka-aineiston pituusleikkaus (vasenpuoleinen oja). Kuvassa 11 vihreä viiva kuvaa tulkittua päällysrakenteen alapintaa, kun taas sinisellä on esitetty laserkeilausaineiston pistepilvestä määritetty olemassa oleva ojanpohja ja oranssilla suunniteltu uusi ojanpohja. Suunniteltu ojanpohja siirrettiin kentälle pelkistettynä koneohjausmallina.



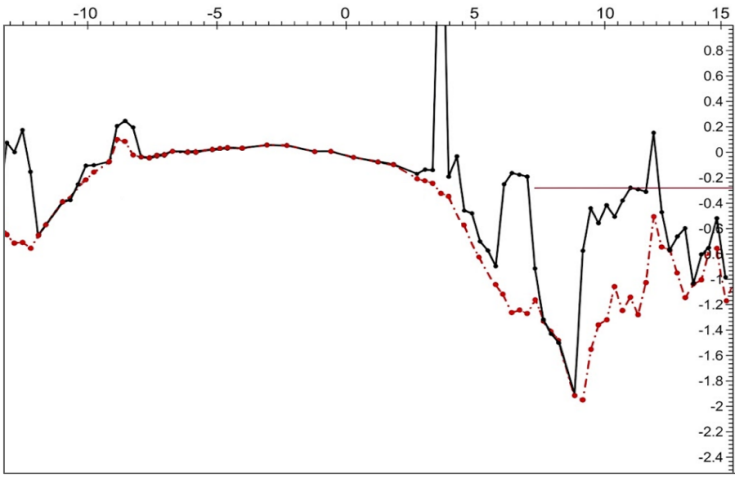
Kuva 11. Maantien 11295 maatutka-aineiston pituusleikkaus paaluväliltä 900–1100. (Heilala et al. 2023, s. 16)

Laserkeilaus

Laserkeilaus on kaukokartoitusmenetelmä, jossa kohteen etäisyys määritetään mittaamalla lasersäteen kulkuaika kohteeseen ja takaisin. Kun lasersäteen lähetyskulma sekä mittausjärjestelmän sijainti tunnetaan tarkasti, voidaan ympäristöstä muodostaa kolmiulotteinen pistepilvi. Pistepilvi sisältää suuren määrän mittauspisteitä, joille on määritetty x-, y- ja z-koordinaatit sekä kohteen heijastusominaisuuksia kuvaavia arvoja. Laserkeilausjärjestelmä koostuu laserlähettimestä, skannerista ja vastaanottimesta. Laserlähetin tuottaa lasersäteen, skanneri ohjaa säteen eri suuntiin ja vastaanotin havaitsee kohteesta takaisin heijastuneen signaalin. (Roadex Network n.d.)

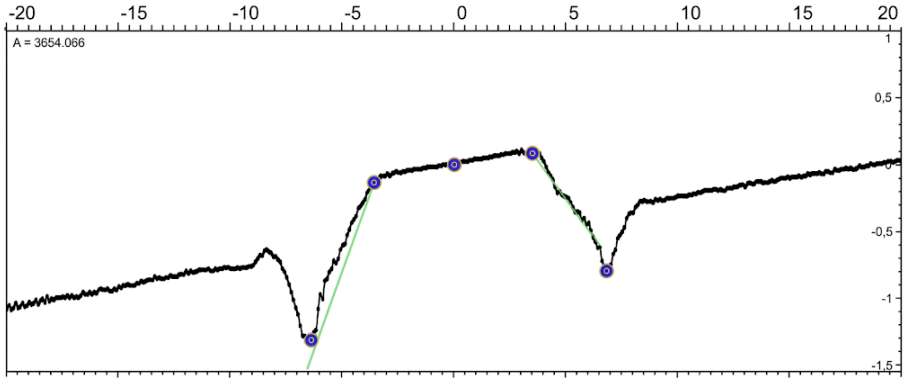
Tieympäristön tutkimuksessa laserkeilaus mahdollistaa tarkkojen poikkileikkausprofiilien muodostamisen sekä tieympäristön kolmiulotteisen mallintamisen. Menetelmää hyödynnetään esimerkiksi urautumisen, poikittaiskaltevuuksien, kuivatusrakenteiden ja ojien kunnon arvioinnissa. Korkeustiedon perusteella voidaan tunnistaa myös kuivatusongelmia, kuten täyttyneitä ojia tai veden virtausta estäviä rakenteita. (Roadex Network n.d.)

Ojien syvyyden määrittäminen laserkeilausaineistosta on tärkeä, mutta osittain myös haastavaa, koska kasvillisuus ja mahdollinen seisova vesi voivat peittää näkyvyyden ojan pohjaan. KUNDI-hankkeessa ojien pohjakorkeuden määrityksessä hyödynnettiin menetelmää, jossa Road Doctor -ohjelmiston algoritmi tunnisti pistepilviaineistosta tien suuntaisesti määritellyn ruudukon alueelta alimman pisteen. Kuvan 12 näkymässä on kaksi poikkileikkausta, jotka on muodostettu samasta pistepilvestä. Kuvassa 12 musta viiva edustaa normaalia prosessoimatonta poikkileikkausta, kun taas punainen viiva prosessoitua poikkileikkausta, jossa virhepisteet on poistettu. Tunnistus perustuu puoliautomaattiseen poikkileikkausalgoritmiin, joka hyödyntää ohjelman käyttäjän määrittämiä etäisyys-, syvyys- ja kaltevuusraja-arvoja. (Heilala et al. 2023, s. 14)



Kuva 12. Samasta pistepilvestä kahdella eri menetelmällä muodostetut poikkileikkaukset. (Muokattu lähteestä Heilala et al. 2023, s. 14)

Kasvillisuuden poistamisen jälkeen pistepilvestä voidaan tunnistaa tien poikkileikkauksen keskeiset taitepisteet, kuten keskilinja, pientareet, ojan pohjat ja sisäluiskan taitekohdat (kuva 13). KUNDI-hankkeen loppuvaiheessa algoritmia kehitettiin siten, että se tunnisti myös ulkoluiskan taitepisteet. Hankkeessa hyödynnetyt ulkoluiskan taitepisteet oli kuitenkin tässä vaiheessa jo määritetty manuaalisesti. (Heilala et al. 2023, s. 15)



Kuva 13. Tien poikkileikkaus, josta Road Doctor -ohjelmistolla on tunnistettu taitepisteet sekä sisäluiskan kaltevuus. (Heilala et al. 2023, s. 15)

KUNDI-hankkeessa vertailtiin ajoneuvolaserkeilausta ja Maanmittauslaitoksen ilmalaserkeilausaineistoa ojan pohjan tunnistamisessa. Tulosten perusteella tien poikkileikkauksen muoto voitiin tunnistaa molemmista aineistoista, mutta kuivatussuunnittelun kannalta ajoneuvolaserkeilaus osoittautui edullisemmaksi. Mittaukset voidaan suorittaa kasvukauden alkuvaiheessa, jolloin kasvillisuus ei vielä haittaa näkyvyyttä ojiin. Sen sijaan ilmalaserkeilauksen käytettävyyttä heikentää usein puuston ja kasvillisuuden aiheuttama peittävyys erityisesti metsäisillä alueilla. Molempien aineistojen pistetiheys arvioitiin kuitenkin riittäväksi avoimissa maasto-olosuhteissa. (Heilala et al. 2023, s. 15)

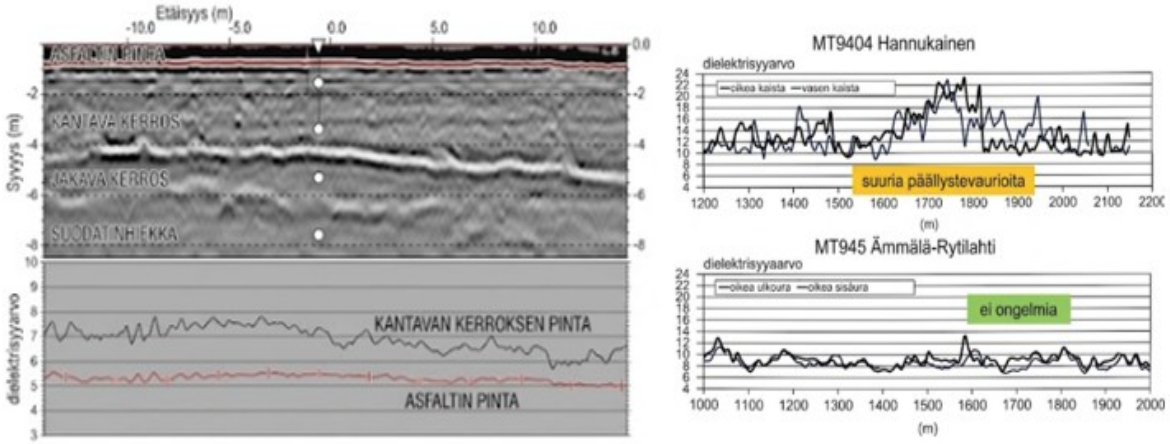
Maatutkaluotaus

Maatutkaluotaus on rakennetta rikkomaton tutkimusmenetelmä, jolla voidaan selvittää tierakenteen ja pohjamaan ominaisuuksia ilman kairauksia. Mittaus tehdään ajoneuvoon kiinnitetyllä tutka-antennilla, jolloin tierakenteesta saadaan jatkuva profiili liikennettä häiritsemättä. Käytettävän antennityypin mukaan menetelmällä voidaan määrittää muun muassa päällysteen paksuus, rakennekerrosten paksuudet, pohjamaan vaihtelut sekä rakennekerrosten suhteellinen kosteuspitoisuus (Väylävirasto 2022, s. 16). Lisäksi maatutkaluotauksella voidaan havaita rakenteellisia ongelmakohtia, kuten routa-aikana muodostuvia jäälinssejä. (Roadex Network n.d)

Maatutkan toimintaperiaate perustuu tierakenteeseen lähetettyjen elektromagneettisten pulssien heijastumiseen materiaalirajapinnoista (Roadex Network n.d; Saarenketo &

Scullion 2000, s. 120). Kun aalto kohtaa sähköisiltä ominaisuuksiltaan erilaisen materiaalin, osa energiasta heijastuu takaisin vastaanottimeen ja osa etenee syvemmälle rakenteeseen (Roadex Network n.d). Heijasteiden kulkuaikaa ja amplitudia analysoimalla voidaan tunnistaa kerrosrajat sekä materiaalien ominaisuuksissa tapahtuvat muutokset (Saarenketo & Scullion 2000, s. 120).

Menetelmä perustuu materiaalien dielektrisiin ominaisuuksiin, jotka ovat voimakkaasti yhteydessä materiaalin vesipitoisuuteen (Saarenketo & Männistö 2024, s. 19). Maatutkaluotaukseen perustuvalla pintaheijastusmenetelmällä (*eng. Surface Reflection Technique*) voidaan määrittää tierakenteen kantavan kerroksen dielektrisyysarvo (ε_r) (kuva 14). Dielektrisyysarvolla voidaan arvioida rakenteen kuntoa, sillä se toimii rakenteen kosteustilan indikaattorina (Saarenketo & Männistö 2024, s. 19; Roadex Network n.d).



Kuva 14. Maatutkaluotaukseen perustuva tierakenteen kantavan kerroksen dielektrisyysarvon määrittäminen ja sen yhteys tien vaurioihin**.** (Saarenketo 2024)

Taulukossa 12 on esitetty kantavan kerroksen dielektrisyysarvon raja-arvot. Matalat arvot viittaavat kuivaan ja hyväkuntoiseen rakenteeseen, kun taas korkeat arvot kertovat kantavan kerroksen kohonneesta kosteuspitoisuudesta. Dielektrisyysarvon kasvaessa myös rakenteen routimisherkkyys sekä alttius pysyville muodonmuutoksille lisääntyvät.

Taulukko 12. Kantavan kerroksen luokittelu dielektrisyysarvon perusteella (Saarenketo 2024).

Luokittelu	***ε_r -arvo***
(1) Hyvä	< 7
(2) Tyydyttävä	7–9
(3) Routiva	9–16
(4) Altis pysyville muodonmuutoksille	> 16
(5) Kyllästynyt	> 32

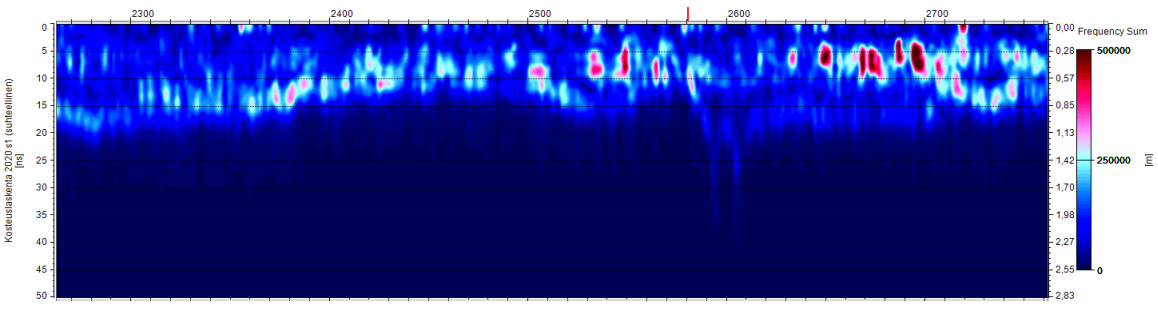
Kuvan 14 esimerkkikohteet auttavat havainnollistamaan dielektrisyysarvon ja päällysteen kunnon välistä yhteyttä. Korkeiden dielektrisyysarvojen alueella esiintyy merkittäviä päällystevaurioita, kun taas alhaisten dielektrisyysarvojen tieosuudella ei havaita merkittäviä ongelmia (Saarenketo 2024). Tämä osoittaa, että maatutkaluotauksella määritettyjä dielektrisyysarvoja voidaan hyödyntää kosteudesta johtuvien rakenneongelmien tunnistamisessa ja vaurioitumisriskin arvioinnissa.

Kosteustilan arvioinnissa voidaan hyödyntää MDI *(eng. Moisture Damage Index)* -analyysiä, joka perustuu myös maatutka-aineistoon. Vuorimies et al. (2019) ovat havainneet yhteyden korkeiden MDI-arvojen ja urautumisen välillä. Tästä voidaan päätellä, että kosteudella on merkittävä rooli tierakenteen vaurioitumisessa. MDI-analyysissä tarkastellaan erikseen rakenteen ylä-, keski- ja alaosaa, jolloin kosteuden jakautumista voidaan arvioida eri syvyyksillä (Arnold et al. 2017, s. 30). Taulukossa 13 on raja-arvot MDI-arvoille.

Taulukko 13. MDI-arvojen luokittelu (Liikka 2026, s. 41).

Luokittelu	*MDI*
(1) Lähes kuiva	< 50
(2) Kostea	50–75
(3) Kyllästynyt tai lähes kyllästynyt	> 75

Kuvassa 15 on maantien 11321 maatutkaluotauksen suhteellisen kosteuslaskennan tulokset vuodelta 2020. Luotausprofiili on esitetty poikkileikkauksena, jossa vaakasuuntainen akseli osoittaa paalulukemat (paaluväliltä 2250–2750) ja pystysuuntainen vasen akseli kuvaa signaalin kulkuaikaa nanosekunneissa. Oikeanpuoleinen pystyakseli arvioi kohteen syvyyttä metreinä. Tulokset on visualisoitu värikartan avulla, joka perustuu ”taajuussummaan” (*eng. Frequency Sum*). Kuvan 15 oikeanpuoleisesta väriskaalasta nähdään, että punaiset alueet edustavat korkeampia kosteusarvoja, kun taas tummansininen väri viittaa alhaiseen kosteuteen.



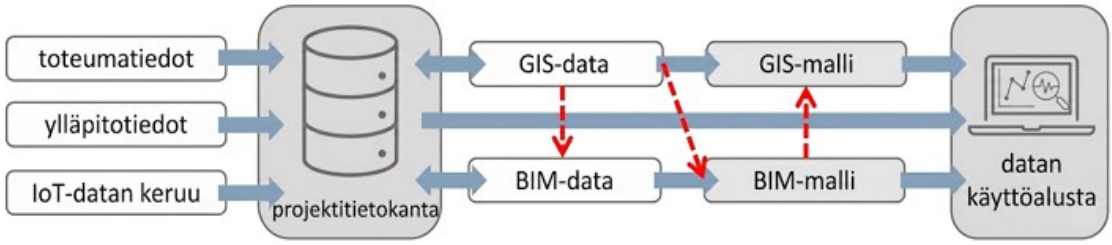
Kuva 15. Maantien 11321 suunnan 1 kosteuslaskenta vuodelta 2020. (Roadscanners 2020)

3.4.2 Muut digitaaliset ratkaisut

Tutkimukset ja kehitetyt menetelmät painottuvat tien rakenteen ja kuivatusjärjestelmien osalta eri näkökulmiin. Mittaus- ja havainnointimenetelmät auttavat arvioimaan tien toimivuutta ja kuivatuspuutteita. Motaei et al. (2020) esittävät esimerkin, jossa digitaalinen kuvankäsittely mahdollistaa tien pinnan kuivatuskyvyn analysoinnin. Kuvankäsittelymenetelmällä päästään määrittämään kolme aikaan sidottua indeksiä, jotka ovat entropia, energia ja pikseliosuus. Näitä indeksitietoja yhdistämällä voidaan arvioida pintakuivatuksen laatua. Pintakuivatusominaisuuksiensa perusteella päällyste luokitellaan muun muassa hyväksi, normaaliksi tai heikoksi.

Vaikka Motaei et al. (2020) mainitsemassa kuvankäsittelymenetelmässä tavoitteena onkin indeksitietojen mittaaminen, menetelmä rajoittuu pitkälti mittaustuloksiin perustuvaan päällysteen luokittelumallin luontiin. Mittaustulokset eivät siis tuota suoraan 2D-aineistoa, mikä korostaa eroa perinteiseen lähestymistapaan, jossa tehokas kuivatus on Cepa et al. (2024) mukaan perustunut 2D-piirrustuksiin.

Kuitenkin kuivatusrakenteita koskeva tiedon digitalisoitumisen myötä mallinnus on mahdollista tehdä eri ulottuvuuksia käyttäen. Tähän ottavat kantaa Sreekanthaswamy et al. (2025) osoittamalla, että siirtyminen 2D-mallinnuksesta 3D-mallinnukseen rakennustietomallinnuksen (BIM) avulla mahdollistaa kuivatusrakenteiden, kuten ojien ja putkistojen, tarkemman hahmottamisen ja yhteensovittamisen. He laajentavat tätä näkökulmaa tuomalla mukaan paikkatietomallinnuksen (GIS), jonka avulla voidaan analysoida maastoa ja veden kulkeutumista, mikä täydentää 3D-mallinnuksen rakenteellista näkökulmaa (kuva 16).



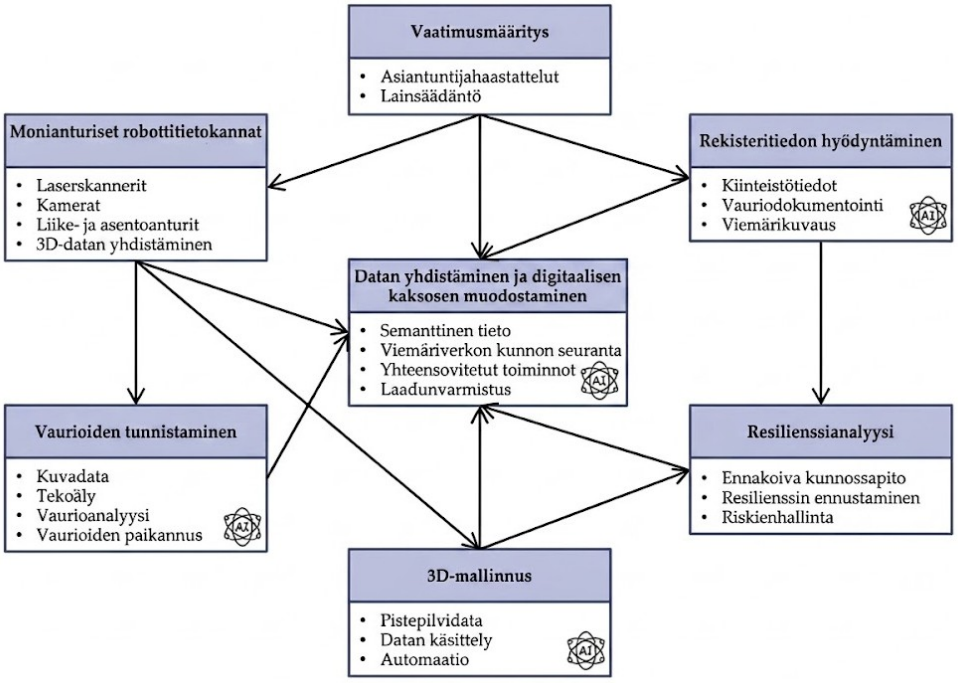
Kuva 16. Tien kuivatuksen kunnossapidon tiedonkulku BIM- ja GIS-järjestelmien integraatiossa. (Muokattu lähteestä Cepa et al. 2024)

Selvakumar (2026) jatkaa Sreekanthaswamy et al. (2025) esittämää ideologiaa eteenpäin selittämällä, että pelkkä 3D-mallinnus ei vielä riitä, vaan mukaan tarvitaan lisää ulottuvuuksia: 4D tuo malliin ajan, jolloin rakentamisen aikataulutus ja vaiheistus voidaan huomioida, 5D yhdistää kustannustiedot suunnitteluun ja 6D lisää kestävyyden ja elinkaaren hallinnan näkökulman. Näin Selvakumar (2026) syventää Sreekanthaswamy et

al. (2025) esittämiä ajatuksia ja laajentaa niiden soveltamista koko infrastruktuurin elinkaaren hallintaan, samalla vastaten Cepa et al. (2024) esittämään tarpeeseen entistä tehokkaammasta ja kestävämmästä kuivatussuunnittelusta.

Lisäksi ilmastonmuutoksen vaikutusten ilmenemisen myötä viime vuosina on noussut esiin resilienssiä eli sopeutumista korostava ajattelu. Tässä tavoitteena ei ole ainoastaan estää ongelmien syntymistä, vaan myös varmistaa kuivatuksen toimivuus poikkeustilanteissa. Resilienssikehitykset (Barreiro et al. 2024) auttavat kuivatusjärjestelmän osien kykyä selviytyä esimerkiksi rankkasateista. Tämä lähestymistapa siirtää painopistettä perinteisestä “virheettömästä” suunnittelusta kohti mukautuvia suunnittelumuotoja, jotka kestävät häiriöitä.

Edellisten menetelmien ohella kuivatuksen kunnossapitoa kehitetään myös erilaisissa tutkimus- ja kehityshankkeissa. Yksi esimerkki tästä on Saksassa toteutettava KaSyTwin-projekti, jonka tavoitteena on hyödyntää digitalisaatiota, data-analytiikkaa ja digitaalisia kaksosia kuivatusjärjestelmien kunnon seurannassa ja kunnossapidon suunnittelussa. Hankkeen lähtökohtana on siirtyä perinteisestä reaktiivisesta kunnossapidosta kohti ennakoivaa ja tietoon perustuvaa toimintamallia, jossa rakenteiden kuntoa seurataan jatkuvasti ja kunnossapitotoimenpiteet voidaan kohdentaa oikea-aikaisesti. Lisäksi hankkeessa tarkastellaan kuivatusjärjestelmien toimivuutta ja häiriönsietokykyä muuttuvissa olosuhteissa (kuva 17). (Hartmann et al. 2025)



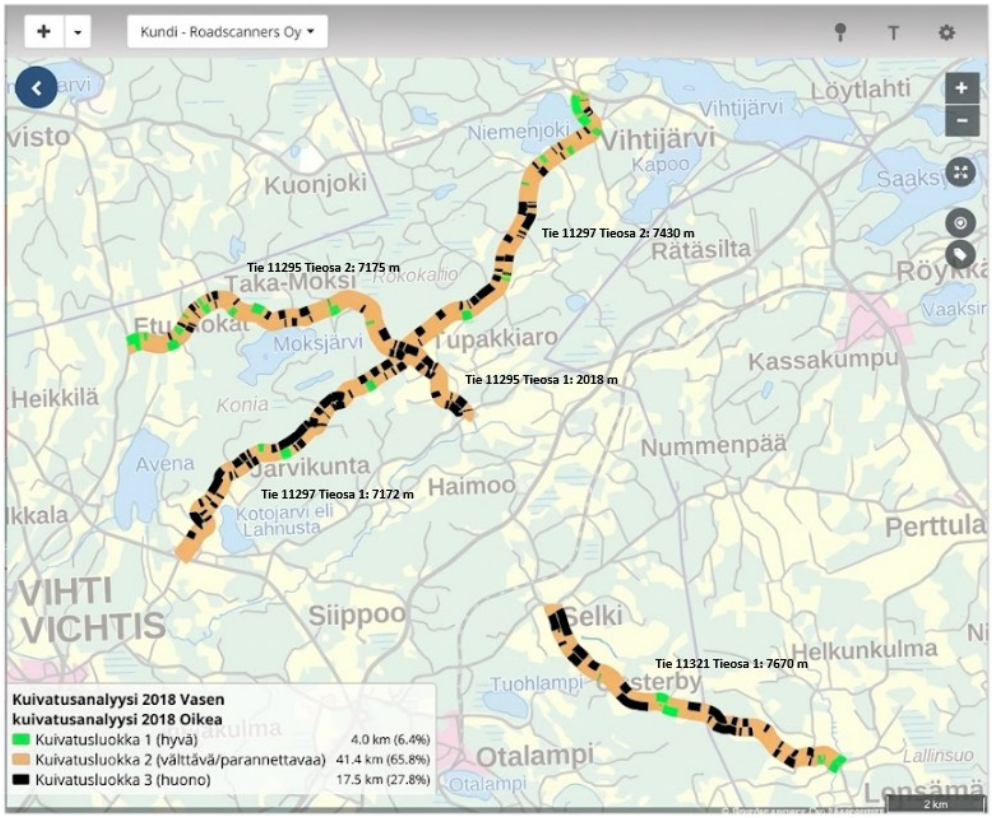
Kuva 17. KaSyTwin-projektin tutkimusalueet. (Muokattu lähteestä Hartmann et al. 2025)

KUNDI-hankkeen toimintamalli vastaa Selvakumarin (2026) ja Sreekanthaswamy et al. (2025) esittämää moniulotteisen kunnossapidon hallinnan ajattelutapaa, sillä hankkeessa kehitetty kuivatuksen digitalisaatio mahdollistaa kuivatuksen hallinnan kehittämisen tarjoamalla joustavaa, ajantasaista ja helposti päivitettävää tietoa pitkäjänteisen ja kestävän tien kunnossapidon tueksi. Myös vertaillessa KUNDI-hanketta ja KaSyTwin-projektia keskenään huomataan, että perusidea on molemmissa sama: kuivatusjärjestelmien kunnossapitoa kehitetään käytännönläheisesti digitalisaation avulla. KUNDI-hankkeessa kehitystarpeen painopiste on kunnossapidon suunnittelussa ja toteutuksessa, kun taas KaSyTwin-projektissa se keskittyy enemmän järjestelmän jatkuvaan kunnon seurantaan ja analyysiin. Näistä kaikista maailmalla käytössä olevista esimerkeistä kuitenkin nähdään, että kuivatuksen eri näkökulmat vastaavat eri tarpeeseen, vaikka tavoitteena olisikin kuivatuksen kunnossapidon toimiva hallinta ja digitalisointi. Parhaat tulokset saavutetaan yhdistämällä nämä näkökulmat, jolloin sekä suunnittelu että toteutus tukevat toisiaan.

4. HAVAINTOKOHTEET JA TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

4.1 Pilottikohteiden esittely

KUNDI-hankkeen pilottikohteet 11295, 11297 ja 11321 valittiin PEHKO-projektissa tarkastelluista Uudenmaan tieverkon kohteista. Kohteista oli vuonna 2018 tehty visuaalinen kuivatusinventointi. Inventoinnissa kuivatus arvioitiin silmämääräisesti kolmeen kuntoluokkaan: hyvä, välttävä ja huono (kuva 18). Inventoinneissa oli havaittu useita kuivatuspuutteita, minkä vuoksi kohteilla nähtiin tarve tavanomaista perusteellisemmille kuivatusparannuksille. Inventoinnin lisäksi kohteista oli saatavilla Road Doctor Survey Van (RDSV) -mittausaineistoja.



Kuva 18. Visuaalisen kuivatusinventoinnin tulokset pilottikohteilla. (Muokattu kohteesta Heilala et al. 2023, s. 13)

Tien 11295 tieosalle 2 toteutettiin vuonna 2006 kevytparannus, jonka yhteydessä myös päällyste uusittiin. Taulukossa 14 on koottuna joitain olennaisia tietoja vuoden 2018 ylläpito hallintajärjestelmän (YHA) -kartoituksesta. Kohde edustaa hyvin vähäliikenteistä tieverkkoa, minkä vuoksi liikennekuormituksen aiheuttama rakenteen ja päällysteen rasitus on suhteellisen vähäistä.

Taulukko 14. Maantien 11295 YHA-kartoitus vuodelta 2018 (Roadscanners 2020).

Paaluväli	*Tieosa*	*KVL*	*KVL_{raskas}*	*Päällystetyyppi*	*Nopeus km/h*	*PK-luokka*	*Päällysteen ikä*
0–600	1	281	21	PAB-B	40	PK3	28
600–2018	1	281	21	PAB-B	60	PK3	28
0–7175	2	101	7	PAB-V	80	PK3	20

Tutkimuksen toisena pilottikohteena toimi maantie 11297, joka on kolmesta tarkastelta-vasta kohteesta pisin, pituudeltaan noin 14,5 km. Kohteesta on käytettävissä vuonna 2018 toteutetun YHA-kartoituksen tiedot (taulukko 15). Tieosan 2 paaluväleillä 6500–6700 ja 7100–7200 toteutettiin vuonna 2006 rakenteellinen vahvistus teräsverkolla, jonka tavoitteena oli parantaa rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä.

Taulukko 15. Maantien 11297 YHA-kartoitus vuodelta 2018 (Roadscanners 2020).

Paaluväli	*Tieosa*	*KVL*	*KVL_{raskas}*	*Päällystetyyppi*	*Nopeus km/h*	*PK-luokka*	*Päällysteen ikä*
0–7172	1	341	12	PAB-V	60	PK3	17
0–7430	2	176	9	PAB-V	80	PK3	20

Maantie 11321 koostuu yhdestä tieosasta, jonka kokonaispituus on 7 670 metriä (tauluokko 16). Tie uudelleenpäällystettiin vuonna 2018. Päällystystyön yhteydessä tien kantavaa kerrosta on vahvistettu vaahtobitumistabiloinnilla. Menetelmä ei kuitenkaan ole tyypillinen tämän kaltaiselle PK3-luokan vähäliikenteiselle tielle, sillä vaahtobitumistabilointia käytetään tavallisesti liikenteellisesti tai rakenteellisesti vaativammissa kohteissa.

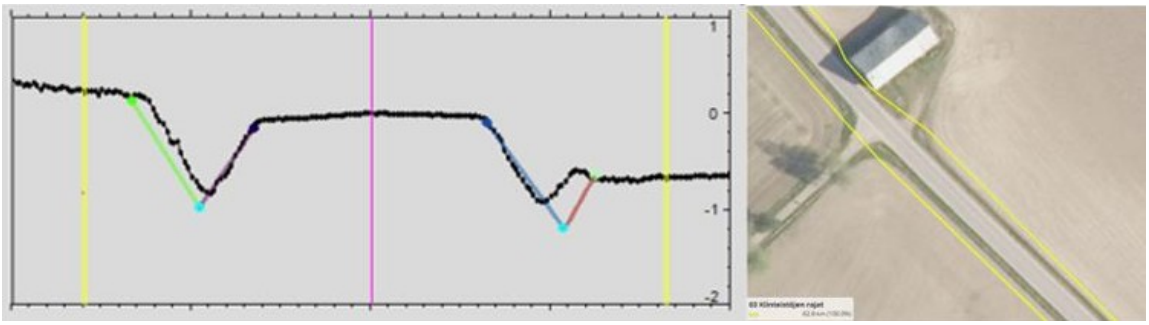
Taulukko 16. Maantien 11321 YHA-kartoitus vuodelta 2018 (Roadscanners 2020).

Paaluväli	*Tieosa*	*KVL*	*KVL_{raskas}*	*Päällystetyyppi*	*Nopeus km/h*	*PK-luokka*	*Päällysteen ikä*
0–4200	1	463	14	PAB-B	80	PK3	8
4200–5300	1	463	14	PAB-B	50	PK3	8
5300–6500	1	463	14	PAB-B	60	PK3	8
6500–6600	1	491	15	PAB-B	50	PK3	8
6600–7100	1	605	15	PAB-B	50	PK3	8
7100–7200	1	833	46	AB	50	PK3	8
7200–7670	1	931	60	AB	50	PK3	8

4.2 Kuivatusparannuksen vaiheet 2020–2023

4.2.1 Suunnittelu

Kuivatusparannus tehtiin KUNDI-hankkeessa vuosina 2020–2023. Kuivatuksen suunnittelussa huomioitiin rumpujen, laskuojien, tiealueen rajojen ja kaapeleiden vaikutus. Rumpujen kuntoa ja korkeustasoa selvitettiin hyödyntämällä vuoden 2018 PEHKO-hankkeen liittymärumpuinventointeja. Lisäksi keskeisimmät rummut tarkastettiin maastossa, valokuvattiin ja osalle tehtiin VRS-GPS (eng. *Virtual Reference Station Global Positioning System*) -mittauksia. Havaitut tiedot tallennettiin myöhempää kunnossapitoa varten roaddatacenter.com -palveluun. Tiealueen rajat määritettiin kiinteistörekisteriaineiston perusteella muodostamalla tiehen rajautuvista kiinteistörajoista tiealueen rajaviiva (kuva 19). Kaapelitietoja kerättiin eri verkkopalveluista, ja niitä hyödynnettiin suunnittelussa silloin, kun aineisto oli saatavilla digitaalisessa muodossa. Kaapeleiden tarkat syvyystiedot olivat kuitenkin pääosin puutteellisia, minkä vuoksi urakoitsija tilasi ennen kaivutöitä erilliset kaapelinäytöt. (Heilala et al. 2023, s. 6–18)



Kuva 19. Kiinteistön rajat näkyvät sekä Road Doctor -ohjelmiston näkymässä (vasen) että ilmakuvassa (oikea) keltaisella rajaviivalla. (Heilala et al. 2023, s. 18)

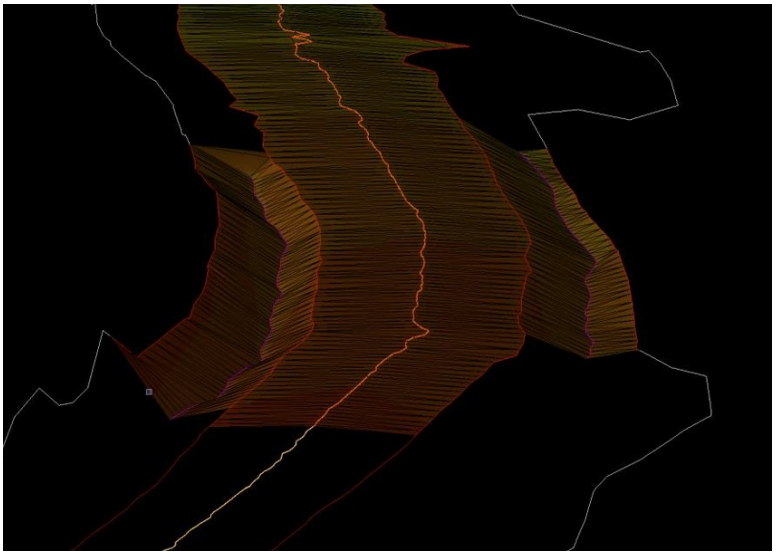
Projektissa laadittiin kuivatusparannussuunnitelmat teille 11295, 11297 ja 11321. Kuivatussuunnittelussa tarkasteltiin erityisesti sivuojien syvyyttä, pituuskaltevuuksia ja luiskien kaltevuuksia. Tavoitteena oli varmistaa, että ojat johtavat vettä tehokkaasti pois tiealueelta ja että ojan pohja sijaitsee mahdollisuuksien mukaan päällysrakenteen alapuolella. Suunnittelussa hyödynnettiin laserkeilaus- ja maatutka-aineistoja, joiden avulla voitiin vertailla nykyisiä ojasyvyyksiä tien rakenteelliseen kuntoon sekä suunnitella tarvittavat syvennykset tarkasti. Lisäksi ojien pituuskaltevuudet pyrittiin muodostamaan mahdollisimman tasaisesti laskeviksi vedenjakajilta purkupisteisiin asti, vaikka olemassa olevat rakenteet rajoittivat osittain tavoitekaltevuuksien saavuttamista. (Heilala et al., 2023, s. 21–23)

Suunnittelun aikana havaittiin, että monilla tieosuuksilla nykyiset luiskat olivat ohjeellisia arvoja jyrkempiä ja tiealue oli niin kapea, ettei kaikkialla voitu toteuttaa suositeltuja luis-

kakaltevuuksia. Tavoitteena pidettiin luiskakaltevuutta 1:2, mutta käytännössä suunnitelmissa jouduttiin tekemään paikallisia kompromisseja tiealueen leveyden ja olemassa olevien olosuhteiden vuoksi. Erityisesti peltoalueilla suunnittelua rajoitti se, että viljelymaat olivat paikoin levinneet tiealueelle, mikä vaikeutti ojien leventämistä ja luiskien loiventamista. (Heilala et al., 2023, s. 22–23)

Suunnitelmat laadittiin hyödyntämällä Road Doctor- ja Trimble Business Center -ohjelmistoja. Laserkeilausaineisto yhdistettiin suunniteltuihin ojanpohjien ja ulkoluiskien taiteviivoihin, minkä perusteella muodostettiin kolmiulotteiset suunnitelmamallit. Samalla suoritettiin visuaalinen laaduntarkastus mahdollisten mittaus- ja tulkintavirheiden tunnistamiseksi. Suunnitelmamallien avulla arvioitiin myös kaivutöissä syntyvät massamäärät vertaamalla suunniteltuja pintoja nykyisestä maanpinnasta muodostettuun malliin. (Heilala et al., 2023, s. 23–24)

Toteutusta varten suunnitelmista tuotettiin tietomallipohjaiset toteutusmallit, jotka sisälsivät muun muassa tien geometrian, suunnitellut ojanpohjat ja tiealueen rajat. Mallit jaettiin noin kilometrin mittaisiin osiin koneohjauksen käytön helpottamiseksi. Koneohjauksessa painotettiin erityisesti ojanpohjan suunniteltua sijaintia ja syvyyttä, joiden perusteella myös ojien pituuskaltevuudet muodostuivat suunnitellun mukaisiksi. Toteutusmallit sisälsivät tiekaistojen geometrian koko suunnittelualueelta, mutta sivuojat mallinnettiin ainoastaan niihin kohtiin, joissa ojien syventäminen oli suunniteltu (kuva 20). Liittymäalueita ei mallinnettu erikseen. Lisäksi liittymärumpujen kohdilla ojien korkeusasema mukautettiin nykyisten rumpujen tasoon. Projektissa testattiin erityisesti 3D-koneohjausta, jossa hyödynnettiin VRS-korjattua GPS-paikannusta korkeus- ja sijaintitietojen hallintaan. (Heilala et al., 2023, s. 25–26)



Kuva 20. Suunnitellut toteutusmallit Trimble Business Center -ohjelmistossa. (Heilala et al., 2023, s. 25)

4.2.2 Toteutus

Projektin toteutusvaiheessa tavoitteena oli siirtää suunnitteluvaiheessa laaditut koneohjausmallit käytännön kaivutyöhön ja arvioida niiden toimivuutta. Tavoitteena oli laatia sellainen koneohjausmalli, jota voitaisiin käyttää eri valmistajien järjestelmissä ilman, että hankkeessa olisi mukana koneohjaukseen erikoistunutta yritystä. Koneohjausmallit saatiin siirrettyä onnistuneesti kaivinkoneen järjestelmään, ja niiden hyödyntäminen osoittautui sujuvaksi ilman erillistä koneohjausasiantuntijan tukea. Tämä osoitti, että digitaalisiin suunnitelmiin perustuva toimintatapa on mahdollista ottaa käyttöön kuivatusparannushankkeissa myös käytännön toteutuksessa. (Heilala et al. 2023, s. 27)

Kaivutyö toteutettiin suunnitelmamallin ohjaamana syksyllä 2022 pyöräalustaisella kaivinkoneella, mutta samalla kuljettajalle jätettiin mahdollisuus tehdä harkittuja ratkaisuja paikallisten olosuhteiden perusteella. Näin digitaalinen toteutusmalli toimi työn lähtökohtana, kun taas kuljettajan ammattitaito täydensi suunnitelmaa tilanteissa, joissa maasto tai muut rajoitteet edellyttivät poikkeamia alkuperäisestä mallista. Tämä poikkesi perinteisestä toimintatavasta, jossa kuivatusparannukset perustuvat suurelta osin kuljettajan silmämääräiseen arvioon maastossa. (Heilala et al. 2023, s. 27)

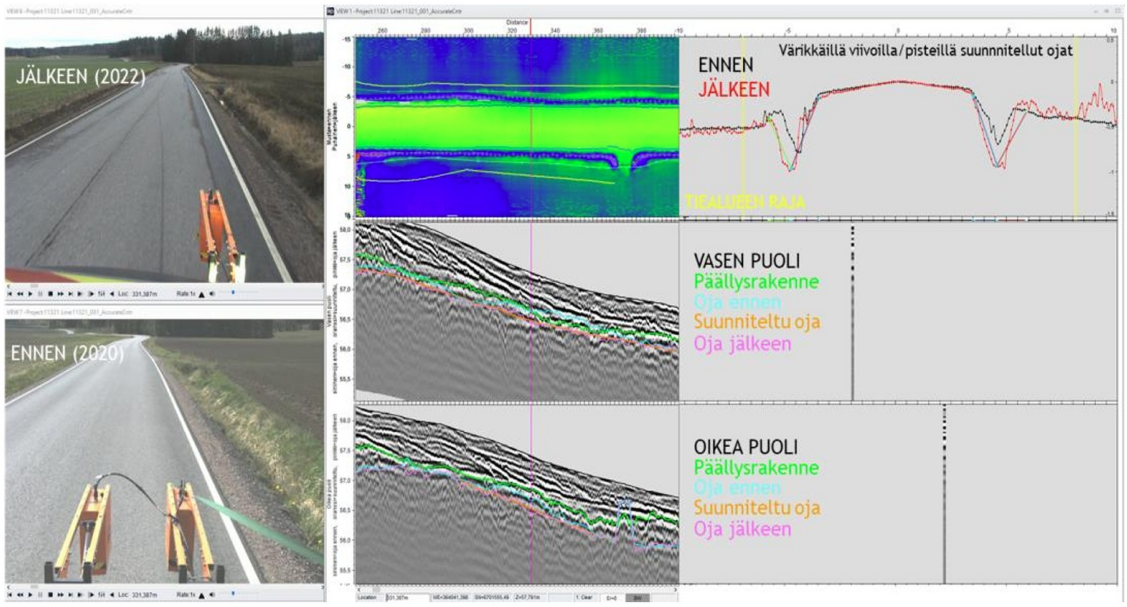
Toteutuksen aikana havaittiin, että suunnitelmien mukaisen kuivatusparannusta rajoittivat erityisesti kohteen maasto-olosuhteet sekä tiealueen läheisyydessä sijaitsevat viljelyalueet. Toteutusvaiheessa jyrkät sisäluiskat jätettiin ennalleen niiden kantavuuden ja rakenteellisen vakauden varmistamiseksi. Ulkoluiskat rakennettiin mahdollisuuksien mukaan siten, että pellolle ulottuvaa leikkausta vältettiin. Joissakin kohdissa ojia voitiin kuitenkin syventää merkittävästi. Näissä tapauksissa ulkoluiskat jäivät suunniteltua jyrkemmiksi, koska pellon puolelle ei haluttu tehdä laajoja kaivutöitä. Näin ollen suunnitelman teknisten tavoitteiden ja maanomistajien tarpeiden välillä jouduttiin tekemään kompromisseja. Vaikka toteutuksessa kohdattiin erilaisia rajoitteita, digitaalinen koneohjaus mahdollisti kuivatuksen parantamisen aiempaa systemaattisemmin ja suunnitelmallisemmin. Toteutusvaihe osoitti, että tietomallipohjainen toimintatapa pystyy tukemaan kaivutyötä käytännössä ja helpottaa suunniteltujen kuivatusratkaisujen viemistä maastoon. (Heilala et al. 2023, s. 27–28)

4.2.3 Laadunvarmistus

Toteutusvaiheen onnistumista arvioitiin vertaamalla toteutunutta lopputulosta laadittuihin suunnitelmiin. Hankkeessa laadunvarmistus toteutettiin laserkeilaamalla kohteet kaivutöiden jälkeen ja vertaamalla uusia mittauksia sekä lähtötilanteen aineistoon että suunniteltuihin kuivatusratkaisuihin. Menetelmän avulla tunnistettiin mahdolliset poikkeamat

ja arvioitiin, kuinka hyvin suunnitelmat olivat toteutuneet käytännössä. (Heilala et al. 2023, s. 29)

Laadunvarmistusmittaukset tehtiin RDSV-mittausajoneuvolla syksyllä 2022. Tarkemmat analyysit kohdistuivat tiehen 11321, jonka kuivatusparannukset olivat valmistuneet mittausajankohtaan mennessä. Mittaustuloksia verrattiin Road Doctor -ohjelmistossa ennen parannuksia kerättyyn aineistoon sekä suunnitelmamalliin, minkä avulla tarkasteltiin ojien poikkileikkauksia ja ojasyvyyksiä (kuva 21). (Heilala et al. 2023, s. 29)



Kuva 21. Pilottikohteen 11321 Road Doctor -näkymä ojien ennen-jälkeen tilanteesta. (Heilala et al. 2023, s. 29)

Tulosten perusteella toteutuneet ojasyvyydet vastasivat melko hyvin suunniteltuja arvoja. Vasemman ojan syvyys poikkesi suunnitellusta keskimäärin 3,2 cm ja oikean ojan 4,0 cm, mitä pidettiin pilotin näkökulmasta hyvänä tuloksena. Havainnot osoittivat, että koneohjaukseen perustuvalla toimintatavalla suunnitellut ojasyvyydet siirtyivät varsin tarkasti käytännön toteutukseen. (Heilala et al. 2023, s. 29–30)

Laadunvarmistusmittausten perusteella liian matalien ojien määrä väheni merkittävästi kuivatusparannuksen jälkeen. Tulokset viittasivat siihen, että tietomallipohjainen suunnittelu ja koneohjaus mahdollistivat kuivatusratkaisujen toteuttamisen aiempaa systemaattisemmin ja tarkemmin kuin pelkkiin maastohavaintoihin perustuva toimintatapa. (Heilala et al. 2023, s. 30)

Poikkeamia havaittiin kuitenkin erityisesti ulkoluiskien kaltevuuksissa, sillä ne jäivät paikoin suunniteltua jyrkemmiksi. Tämä johtui pääasiassa siitä, että toteutuksessa pyrittiin välttämään viljelysmaan tarpeetonta leikkaamista. Lisäksi toteutuneet ojanpohjat olivat suunniteltua leveämpiä kaivinkoneen kauhan leveyden vuoksi. Tulokset osoittivat, että

vaikka koneohjaus tuki suunnitelmien toteuttamista, käytännön työssä jouduttiin edelleen sovittamaan suunnitteluratkaisuja kohteen olosuhteisiin ja hyödyntämään kuljettajan ammattitaitoa. (Heilala et al. 2023, s. 30–31)

4.3 Seurantamittaukset 2024–2026

KUNDI-hankkeen pilottikohteina toimivilla teillä 11295, 11297 ja 11321 on tehty vuosina 2023–2026 useita seurantamittauksia kuivatuksen toimivuuden ja tien kunnon kehityksen arvioimiseksi. Koska kohteet kuuluvat PEHKO-projektiin, niistä on saatavilla mittausaineistoa useilta vuosilta sekä ennen kuivatusparannusten toteuttamista että niiden jälkeen. Pitkä mittaushistoria mahdollistaa kuivatuksen vaikutusten tarkastelun sekä lyhyellä että pidemmällä aikavälillä.

Teiden kuntoa on seurattu palvelutasomittauksilla. Mittauksista on saatavilla tietoa tien pituus- ja poikittaissuuntaisesta epätasaisuudesta sekä urautumisen kehittymisestä. Tarkasteltavia tunnuslukuja ovat muun muassa IRI-arvot ja urasyvyydet. Teillä 11295 ja 11321 on lisäksi tehty TSD-mittauksia. Niistä määritetään tien pinnan taipuma kuormituksen alla (D_0) sekä tien pinnan taipumat eri etäisyyksillä kuormituspisteestä. Mittaustulosten avulla voidaan seurata rakenteen kuormituskestävyyden muutoksia sekä arvioida kuivatusolosuhteiden ja rakenteen kosteustilan vaikutusta tien rakenteelliseen toimintaan.

PEHKO-projektin yhteydessä tehtyjen mittausten lisäksi KUNDI-hankkeen seurantatutkimuksen yhteydessä kohteiden ojat laserkeilattiin ja kohteilla tehtiin maatutkamittaukset. Maatutka-aineistosta on laskettu kohteille suhteelliset kosteudet. Lisäksi teille 11295 ja 11321 on laskettu MDI-arvot tierakenteen syvyyksiltä 0–300 mm (yläosa), 300–600 mm (keskiosa) ja 600–900 mm (alaosa). Laserkeilauksella on puolestaan mitattu sivuojien ja luiskien geometriaa. Laserkeilausaineistosta on määritetty ojien muodot, ojan pohjan sijainti sekä sisä- ja ulkoluiskien kaltevuudet.

Mittaukset on suunniteltu siten, että niitä voidaan toistaa tulevaisuudessa kuivatuksen kunnon seurannassa. Erityisesti sivuojien pohjan tason ja muodon muutoksia voidaan seurata määräajoin tehtävillä laserkeilausmittauksilla tai vastaavalla mittaustekniikalla. Mittaukset on tehty aina joko loppukeväällä tai alkukesällä, jolloin ojissa ja luiskissa on ollut mahdollisimman vähän kasvillisuutta, ja kuivatusrakenteiden geometria on ollut luotettavasti mitattavissa.

4.4 Aineiston analyysi

Kuivatustilan ja tien kunnon välinen tarkastelu

Aineiston analyysin tavoitteena on arvioida kuivatustilan muutoksia sekä niiden mahdollista yhteyttä tien rakenteelliseen kuntoon ja päällysteen vaurioitumiseen. Osana analyysia tarkastellaan kunnostamattomien tiejaksojen tilaa. Tarkastelussa verrataan eri mittaustunnuslukujen kehitystä sekä arvioidaan, kuinka pohjamaaolosuhteet, ympäristötekijät, rummut, liittymät ja muut paikalliset kuivatusratkaisut vaikuttavat havaittuihin muutoksiin.

PTM-aineistojen analysointi

PTM-aineistojen pohjalta tarkastellaan urasyvyyksiä sekä pituussuuntaista epätasaisuutta kuvaavia IRI-arvoja. Paikattuja tiejaksoja lukuun ottamatta uramaksimin voidaan odottaa kasvavan ajan myötä liikennekuormituksen ja rakenteen luonnollisen kulumisen seurauksena. Uramaksimien ja tästä lasketun homogeenisuuskertoimen lisäksi analysoidaan urautumisnopeutta, jonka avulla voidaan arvioida mahdollisia muutoksia tien rakenteen käyttäytymisessä ennen ja jälkeen kuivatusparannusta.

Palvelutasomittausten uramaksimi- ja IRI-arvot esitetään yleensä 100 metrin jaksoille keskiarvostettuina. Roadscannersin aineistossa arvot on keskiarvostettu noin 10 metrin mittaisille jaksoille. Kunnostamattomia ja kunnostettuja tiejaksoja tarkastellaan 500 m pituisina osuuksina, koska homogeenisuuskertoimet lasketaan 500 metrin tiejaksoille. Vaikka vaihtelevissa olosuhteissa 500 metrin tarkastelujakso tasoittaa paikallista vaihtelua melko voimakkaasti, menetelmää voidaan pitää perusteltuna silloin, kun uramaksimia, urakasvunopeutta ja IRI-arvoja käytetään tunnuslukuna arvioitaessa tehdyn toimenpiteen yleistä vaikutusta tiejakson käyttäytymiseen. Tavoitteena ei ole yksittäisten vauriokohtien analysointi, vaan tiejakson keskimääräisen kunnonkehityksen tarkastelu. Tarkastelua voidaan tarvittaessa tarkentaa 100 metrin keskiarvoihin, mikäli 500 metrin tarkasteluun perustuvat keskiarvot ovat vaikeasti tulkittavia tai ne eivät vastaa tiejakson havaittua kuntotilaa. Tällöin voidaan tarkemmin arvioida tiejakson sisäistä vaihtelua ja sen vaikutusta tuloksiin.

Esimerkiksi Liikan (2026) tutkimuksessa todettiin, että jo 100 metrin keskimääräinen urasyvyys peitti tehokkaasti tien urautumiskäyttäytymisen pienipiirteistä vaihtelua. Kyseisessä tutkimuksessa tarkastelun painopiste oli kuitenkin yksittäisten poikkileikkausten toiminnan analysoinnissa, kun taas tässä työssä huomio kohdistuu koko tiejakson yleiseen käyttäytymiseen ja kunnon kehittymiseen. Analyysissä käytetään Väyläviraston

(2022b) mukaisia kuntoluokkarajoja, koska käytettävissä olevat Roadscannersin mittausaineistot on tuotettu kyseiseen ohjeistukseen perustuvalla mittausmenetelmällä, ja näin tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia uuden linjauksen (Väylävirasto 2026b) kanssa.

Ojituksen vaikutusten arviointi laserkeilausaineistosta

Ojien toimintaa arvioidaan vertaamalla ojasyvyyksiä tien rakenteellisiin ja toiminnallisiin tunnuslukuihin. Tarkasteluissa esitetään samassa kuvaajassa sekä eri vuosina mitatut ojien pohjien tasot että maatutka-aineistosta tulkittu tierakenteen alarajapinta, jolloin voidaan arvioida kuivatusparannuksen riittävyyttä, muutosta ja nykyistä tilaa. Lisäksi tutkitaan, näkyvätkö matalat tai puutteellisesti toimivat ojat esimerkiksi suurempina urautumisnopeuksina, korkeampina IRI-arvoina tai lisääntyneenä vaurioitumisena.

TSD- ja PPL-mittausten hyödyntäminen

Teillä 11295 ja 11321 on tehty TSD-mittauksia vuosina 2018 ja 2024, joiden perusteella voidaan tarkastella rakenteen kuormituskestävyyttä kuvaavia taipumaindeksejä. Tiestä 11321 on vuodelta 2019 saatavilla myös PPL-mittaustuloksia. Tarkasteltavia tunnuslukuja näistä aineistoista ovat muun muassa SCI_{200}-, BCI- ja D_0-arvot, joiden avulla voidaan arvioida rakenteen eri osien mekaanista käyttäytymistä. Taipumaindeksien alueellisia vaihteluita verrataan kuivatuksen tilaan, jotta voidaan tunnistaa mahdollisia yhteyksiä kosteuden, kantavuuden ja rakenteellisen kunnon välillä.

Taipumaindeksien tarkastelussa 500 metrin tiejakso on melko pitkä, sillä pohjamaaolosuhteet ja tierakenteet voivat muuttua kyseisellä matkalla useita kertoja. Tämän vuoksi taipumaindeksien tarkastelu tiellä 11295 perustuu 100 metrin keskiarvoihin. Tiellä 11321 tarkastelu tehdään kuitenkin 500 metrin keskiarvoina. Tiellä 11321 vuoden 2018 TSD-mittausten taipumaindeksit eivät vastaa rakenteen todellista pitkäaikaista kantavuustilaa, sillä mittaukset on tehty suhteellisen pian kantavan kerroksen vaahtobitumistabiloinnin ja uudelleenpäällystyksen jälkeen. Stabiloidun rakenteen ominaisuuksien voidaan olettaa kehittyvän vielä mittausajankohdan jälkeen, minkä vuoksi mitatut taipumaindeksiarvot saattavat poiketa rakenteen lopullista tilaa kuvaavista arvoista.

Maatutka-aineistojen analysointi

Maatutka-aineistoista tarkastellaan rakenteen kosteustilaa kuvaavia MDI-arvoja sekä Road Doctor -ohjelmistossa laadittuja suhteellisia kosteusnäkymiä. MDI-arvot on määritetty erikseen rakenteen ylä-, keski- ja alaosasta, mikä mahdollistaa kosteuden sijainnin tarkastelun tien eri rakennekerroksissa. Tarkastelu perustuu 100 metrin keskiarvoihin. Näin voidaan arvioida, esiintyykö rakenteessa kosteuden kertymistä tietyllä syvyydellä ja ovatko mahdolliset kosteuspitoisuuksien muutokset yhteydessä kuivatusolosuhteisiin. MDI-arvojen ja suhteellisen kosteuden tarkastelujen avulla voidaan arvioida, näkyvätkö mahdolliset kuivatuspuutteet rakenteen kosteustilassa ja ovatko ne yhteydessä tien rakenteellisen kunnon heikkenemiseen. Erityistä huomiota kiinnitetään tiejaksoihin, joilla kosteusarvot poikkeavat ympäröivistä osuuksista tai joissa kosteutta havaitaan rakenteen syvemmissä kerroksissa.

Päällysteen vaurioinventoinnit ja vauriosumma tarkastelu

Päällysteen vaurioinventoinnit tehdään vuosien 2020, 2023 ja 2026 videoaineistoista. Vauriosummalaskennassa huomioidaan ainoastaan ajokaistoilla esiintyvät päällystevauriot, jolloin esimerkiksi pysähdysalueiden vauriot rajataan tarkastelun ulkopuolelle. Vauriosummat määritetään 100 metrin mittaisille tiejaksoille, mikä mahdollistaa päällysteen kunnon alueellisen vaihtelun tarkastelun riittävällä tarkkuudella. Menetelmän avulla voidaan tunnistaa tieosuuksia, joilla vaurioituminen on ollut ympäröiviä osuuksia voimakkaampaa tai nopeampaa, sekä kohdistaa yksityiskohtaisempi tarkastelu näille alueille.

Vauriosummien pohjalta lasketaan päällysteen vaurioitumisnopeudet eri tarkastelujaksoille. Sen avulla voidaan tunnistaa tieosuudet, joilla päällysteen kunto heikkenee keskimääräistä nopeammin sekä arvioida, ylittääkö vaurioituminen päällystetyypille tyypillisen tai hyväksyttävän kehitysnopeuden. Vaurioitumisnopeuksien vertailu urasyvyyden, IRI-arvon, ojasyvyyden sekä muiden rakenteellista kuntoa kuvaavien tunnuslukujen kanssa auttaa tunnistamaan mahdollisia syitä päällysteen kunnon heikkenemiselle ja arvioimaan kuivatuksen vaikutusta vaurioiden kehitykseen.

Tulosten esittäminen

Tarkastelussa tie 11295 jaetaan ojitustoimenpiteiden toteutumisen perusteella erillisiin tiejaksoihin. Vertailtavina ovat sekä ojitetut osuudet että tiejaksot, joilla ojia ei ole kaivettu. Tämä mahdollistaa ojitustoimenpiteiden vaikutusten tarkemman arvioinnin.

Tie 11295 edustaa hyvin tavanomaista vähäliikenteistä PK3-luokan tietä. Sen sijaan tien 11321 kantavan kerroksen vaahtobitumistabilointi on vähäliikenteisillä teillä poikkeuksellinen rakenneratkaisu. Tämän vuoksi tien 11321 osalta tarkastelu kohdistuu pääasiassa ojitettuihin tiejaksoihin.

Kunnostettujen ja kunnostamattomien tiejaksojen analyysi perustuu ensisijaisesti tien 11295 sisäisiin vertailuihin. Saman kohteen sisäiset vertailut mahdollistavat ojituksen vaikutusten luotettavamman arvioinnin, sillä liikennemäärä, raskaan liikenteen osuus, päällystetyyppi ja nopeusrajoitus pysyvät tarkastelualueella muuttumattomina. Näin voidaan paremmin erottaa kuivatusolosuhteiden ja ojitustoimenpiteiden vaikutukset muista tien kuntoon vaikuttavista tekijöistä.

Tarkastelu keskittyy teihin 11295 ja 11321. Vaikka tielle 11297 on laadittu kuivatussuunnitelmia, ojien kunnostustoimenpiteitä ei ole toteutettu. Maastokäynnin yhteydessä havaittiin, että kohde on pilottikohteista heikoimmassa kunnossa ja päällystevaurioita esiintyy paikoin laajoilla alueilla (kuva 7). Tien heikon lähtökunnon vuoksi urasyvyys- ja urakasvunopeustarkastelut sekä päällystevauriot eivät tässä tapauksessa välttämättä kuvaa nimenomaan kuivatuksen tilaa ja vaikutuksia.

Tulokset esitetään siten, että suunnan 1 yhteydessä tarkastellaan oikeanpuoleista ojaa ja suunnan 2 yhteydessä vasemmanpuoleista ojaa. Näin ojien ominaisuuksia voidaan verrata johdonmukaisesti tiegeometriaan ja mittaussuuntaan nähden. Teiden 11295 ja 11321 osalta urakasvunopeutta ja ojan pohjan tason sijaintia voidaan tarkastella samassa kuvaajassa, jolloin muuttujien välisiä mahdollisia yhteyksiä ja riippuvuuksia on helpompi havaita.

5. MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYYSI

5.1 Urasyvyys ja urakasvunopeus

Luonnollisesti uramaksimin voidaan odottaa kasvavan vuosien kuluessa. Kuitenkin uramaksimiarvo voi poikkeustilanteissa myös pienentyä. Uramaksimiarvon aleneminen voi johtua esimerkiksi tehdyistä päällystys- ja korjaustoimenpiteistä, mittauseroista tai tierakenteen luonnollisesta tasoittumisesta.

Vaikka kohteessa 11321 on tehty uudelleenpäällystys ja vaahtobitumistabilointi vuonna 2018, jää toimenpide tarkastelujakson ulkopuolelle eikä siten vaikuta suoraan urakehityksen tarkasteluun. Tie 11295 on puolestaan rakenteeltaan vanhempi, minkä vuoksi uratarkastelussa tulee huomioida päällystevauriot sekä tarkastelujakson aikana tehdyt paikkaukset. Eri vuosien aineistojen välillä havaittava uramaksimin aleneminen saattaa tien 11295 kohdalla viitata siihen, että joitakin vauriokohtia on paikattu mittauskertojen välillä, jolloin aiemmin mitattu ura on poistunut. Tien 11321 kohdalla päällysteen vaurioituminen on sen sijaan ollut hyvin vähäistä, minkä vuoksi paikkauksille ei ole ollut merkittävää tarvetta. Päällystevaurioita käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.3. Kuvaajissa 23, 24 ja 25 havaittujen poikkeamien syitä voidaan osittain selvittää video- ja laserkeilausaineistoista (kuva 22).

Koska analyysin tavoitteena on tarkastella erityisesti kunnostetun ojan vaikutusta, tie 11295 on jaettu tarkastelualueisiin siten, että sinisellä rajatut alueet edustavat kunnostettuja tieosuuksia ja punaisella rajatut alueet kunnostamattomia tieosuuksia. Tarkasteluun valittiin pääsääntöisesti sellaisia 500 metrin tiejaksoja, jotka olivat koko pituudeltaan joko lähes kokonaan kunnostettuja tai kokonaan kunnostamattomia. Kunnostetuilla tiejaksoilla mahdolliset kunnostamattomat kohdat liittyivät pääosin yksittäisiin liittymäalueisiin, joilla ojitustoimenpiteitä ei ole voitu toteuttaa.

Uramaksimiarvojen tarkastelussa poikkeavien arvojen tunnistamisessa voidaan hyödyntää taulukossa 6 esitettyjä urasyvyyden raja-arvoja. Arvoja verrataan tien nopeusrajoituksen ja KVL:n (taulukot 14 ja 16) perusteella määritettyihin kuntoluokan KL3 raja-arvoihin. Kuvaajiin (kuvat 23–25) on merkitty mustalla katkonaisella vaakasuoralla viivalla tarkastelukohteen KL3:n yläraja-arvo. Mikäli uramaksimi ylittää tämän raja-arvon, voidaan tarkemmin selvittää mahdollisia syitä poikkeuksellisen korkealle arvolle.

Taulukossa 17 on esitetty uramaksimien keskiarvot vuosilta 2020, 2023 ja 2026. Tulosten perusteella 500 metrin tiejaksojen uramaksimien keskiarvot sijoittuvat kuntoluokkiin KL4 ja KL3. Tuloksista havaitaan, että tien 11295 500 metrin tiejaksojen arvot eivät kasva

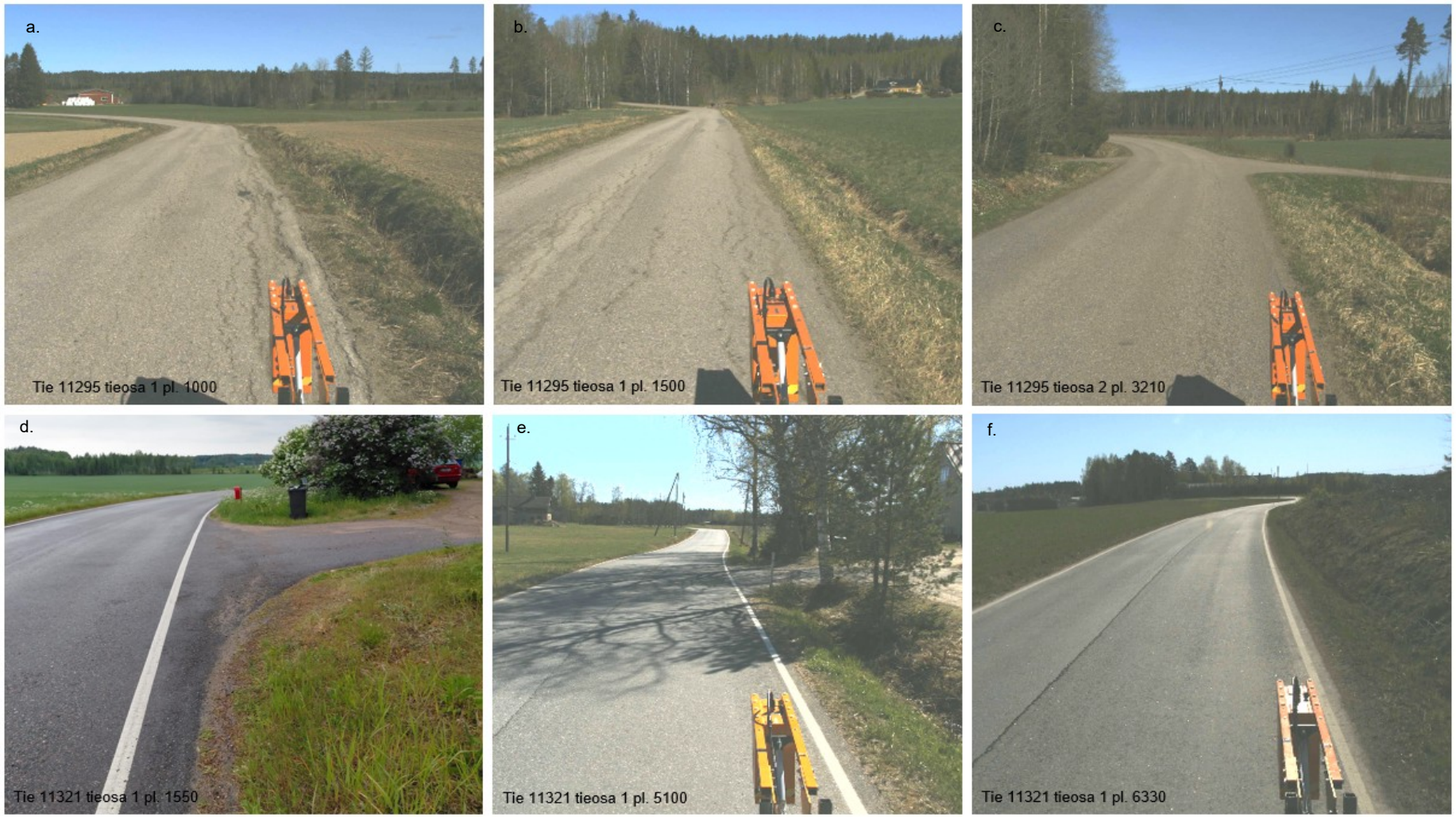
luonnollisesti ajan myötä, vaan vuoden 2023 tuloksista nähdään, että ne ovat laskeneet verrattuna vuoden 2020 tuloksiin. Vuoden 2023 uramaksimi on laskenut vuoden 2020 uramaksimiin verrattuna paaluvälillä 700–1200 2,01 mm, paaluvälillä 1200–1700 0,8 mm, paaluvälillä 3100–3600 3,33 mm ja paaluvälillä 5000–5500 0,62 mm. Näillä tiejaksoilla ei ole missään kohtaa tehty paikkauksia, jotka selittäisivät vuoden 2023 pienemmät uramaksimiarvot. Vastaavanlainen uramaksiarvojen lasku on havaittavissa tien 11321 vuosien 2023 ja 2026 tuloksista. Havaitut poikkeamat ovat kuitenkin pieniä, ja niiden voidaan arvioida johtuvan joko eri vuosien välisistä mittauseroista tai rakenteen luonnollisesta tasaantumisesta, kun huomioidaan mittausten ajoittuneen loppukevääseen tai alkukesään.

Taulukko 17. Teiden 11295 ja 11321 tarkastelujaksojen uramaksimien keskiarvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ojaosuuksia. Värikoodit kuntoluokittain: KL4 = sininen ja KL3 = oranssi.

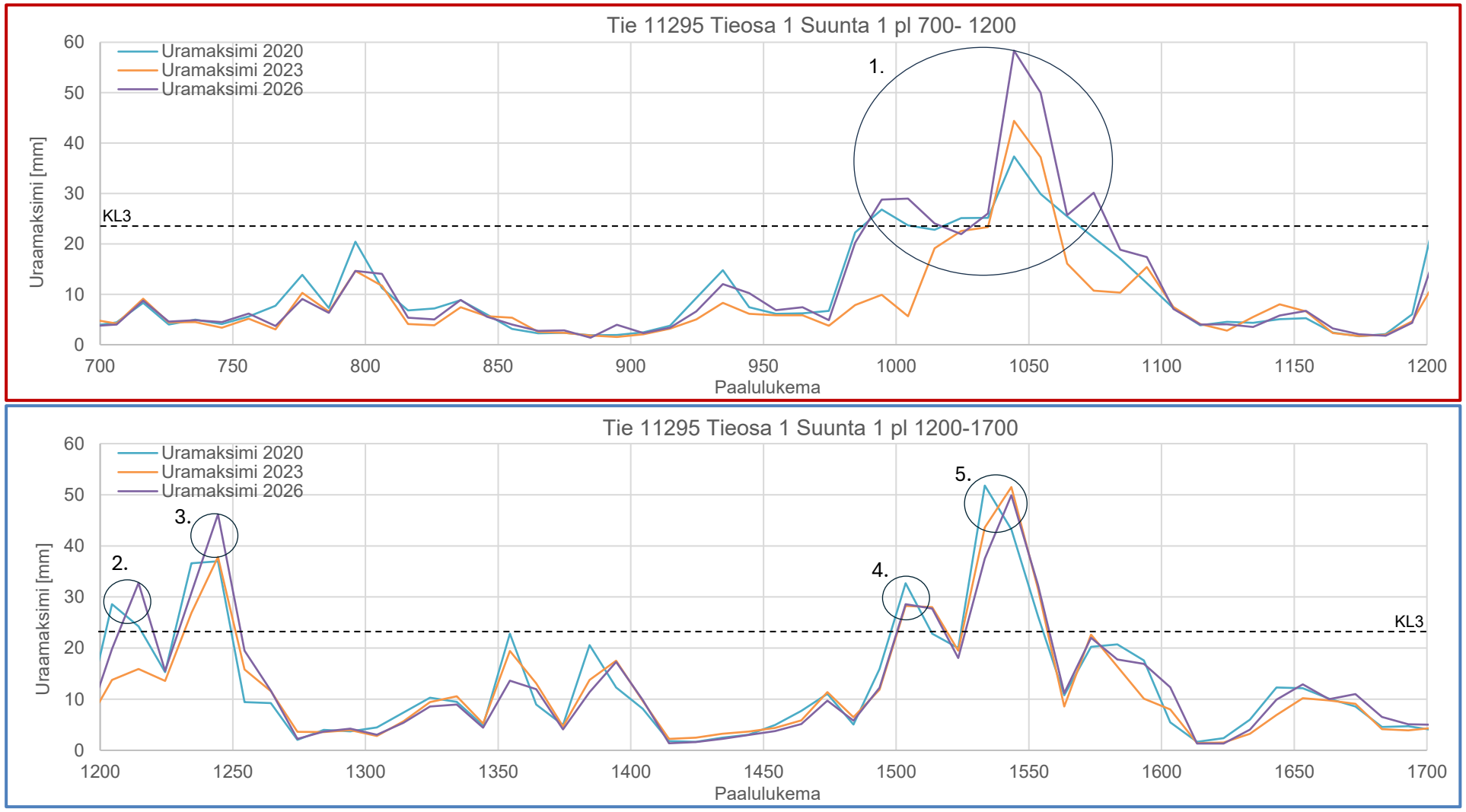
U_{max} keskiarvo (mm)	Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200	Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700	Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600	Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500	Tie 11321 tieosa 1 suunta 1 pl 2000–2500	Tie 11321 tieosa 1 suunta 2 pl 5500–6000
2020	10,4	13,4	10,8	8,58	7,66	8,24
2023	8,39	12,6	7,47	7,96	9,20	10,3
2026	11,3	13,3	10,6	9,33	8,78	11,1

Pelkän uramaksimin keskiarvon perusteella tien kuntotilaa ei kuitenkaan voida arvioida luotettavasti, sillä keskiarvo ei kuvaa tiejakson sisäistä vaihtelua eikä mahdollisia paikallisia vauriokohtia. Poikkeavia kohtia voidaan tarkastella tarkemmin tien 11295 osalta kuvista 23 ja 24. Kuvaan 22 on koottu viisi poikkeamakohtaa niiden olosuhteiden havainnollistamiseksi. Kuvan 23 kohdassa 1 uran oikealla puolella esiintyy useiden metrien pituinen leveä pituushalkeama, jonka yhteydessä on osittain paikattuja ja osittain avoimia vauriokohtia (kuva 22 a). Kohdissa 2 ja 3 havaitaan leveä pituushalkeama, kun taas kohdissa 4 ja 5 ajouran alueella esiintyy verkkohalkeilua (kuva 22 b). Tien 11295 tieosan 1 poikkeuksellisen korkeat uramaksimiarvot voidaan siten todeta liittyvän pääasiassa urien kohdalle muodostuneisiin päällystevaurioihin.

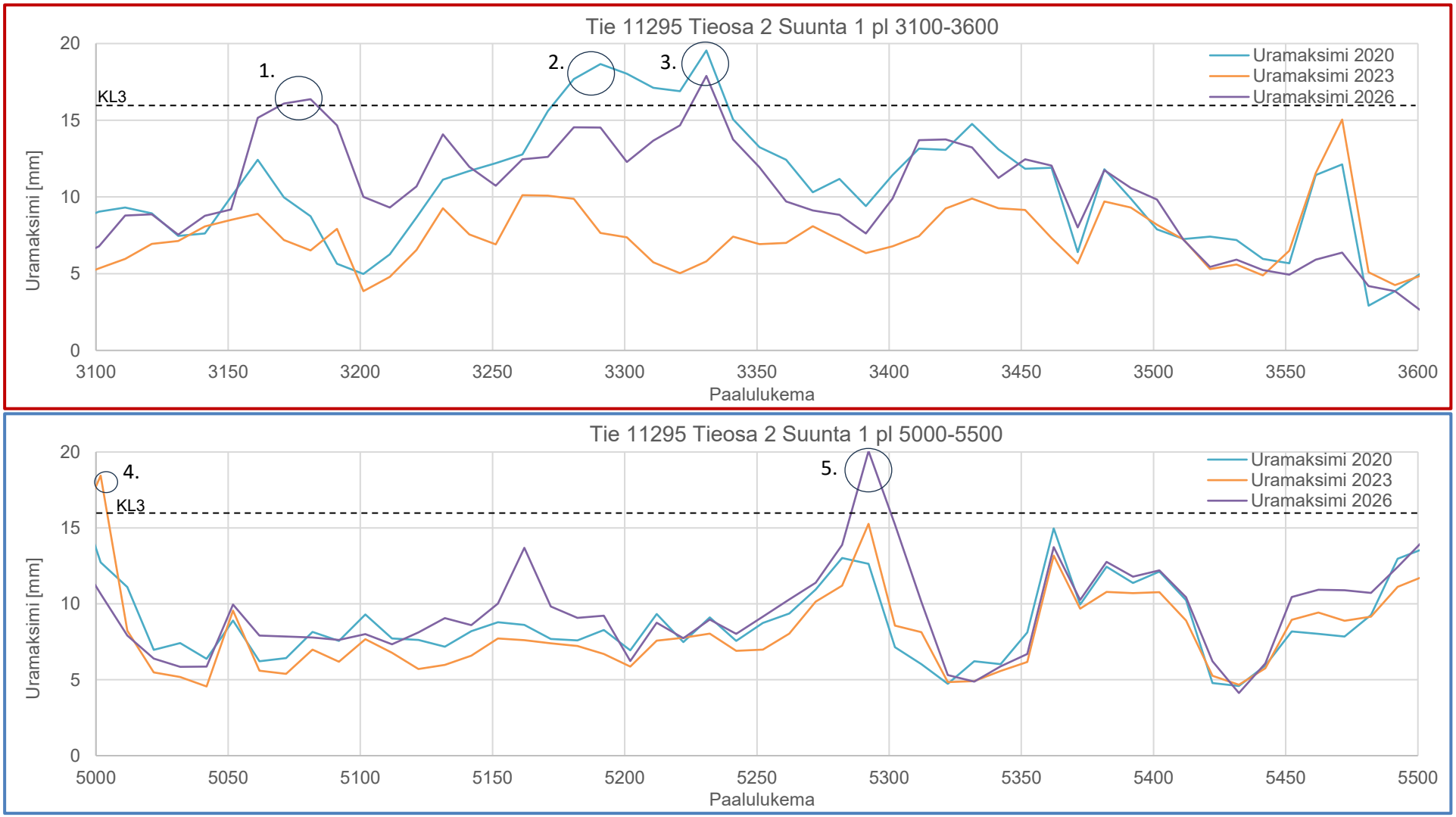
Tien 11295 tieosan 2 alueella poikkeuksellisen suuret uramaksimiarvot on esitetty kuvassa 24. Kuvan 24 kohdassa 1 ei havaita merkittäviä päällystevaurioita, rumpuja tai liittymiä, jotka selittäisivät kohonneen uramaksimin. Alueen pohjamaa on moreenia (taulukko 22). Kohdissa 2 ja 3 oikea ajoura on ympäristöään syvempi, ja päällysteessä esiintyy vähäistä halkeilua (kuva 22 c). Poikkeamakohtien läheisyydessä sijaitsee pihatie ja liittymä. Liittymässä ei ole liittymärumpua. Kohdassa 4 uran kohdalla on osittain paikattu ja osittain avoin leveä pituushalkeama. Kohdassa 5 havaitaan reunapainuma, ja alueen pohjamaa on moreenia (taulukko 22).



Kuva 22. Esimerkkinäkymiä teiden 11295 ja 11321 kuvien 23–25 uramaksimien poikkeamakohdista. Vuonna 2026 otetuissa kuvissa näkyy päällystevaurioita sekä ympäristötekijöitä. (kuvat a, b, c, e & f: Roadscanners 2026; kuva c: Pauli Kolisoja 5.6.2026)



Kuva 23. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 paaluvälien 700–1200 ja 1200–1700 uramaksimit. Paaluväli 700–1200 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 1200–1700 kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 24. Tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 paaluvälien 3100–3600 ja 5000–5500 uramaksimit. Paaluväli 3100–3600 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 5000–5500 kunnostettua ojaosuutta.

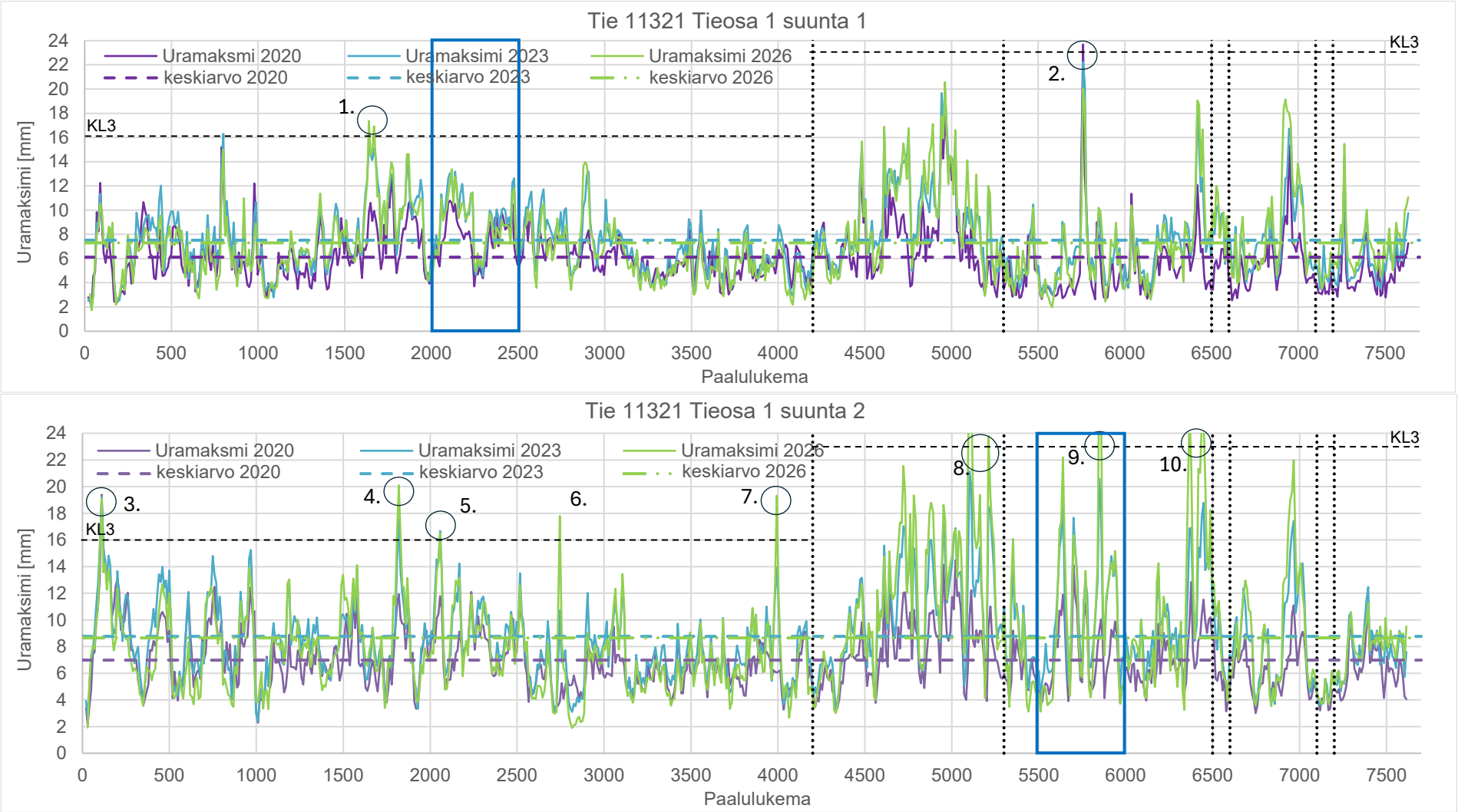
Tien 11321 uramaksimiarvot on esitetty kuvassa 25. Kuvan havaitussa poikkeamakohdassa 1 tiejakso sijaitsee mäkisessä maastossa ja tämän läheisyydessä on pihatie (kuva 22d). Kohdissa 2, 4 ja 8 (kuva 22e) uramaksimin kasvu sijoittuu liittymien ja liittymärumpujen kohdalle. Kohdassa 3 ojaa ei ole, vaan tien vieressä on metsikkö, ja pohjamaa on savea (taulukko 22). Kohdissa 5, 9 ja 10 (kuva 22f) pohjamaa on liejuista savea (taulukko 22). Näissä kohdissa korkeat uramaksimiarvot saattavat liittyä erityisesti heikkoihin pohjamaaolosuhteisiin, jotka voivat lisätä rakenteen muodonmuutoksia kuormituksen vaikutuksesta. Kohdassa 6 uran kohdalla esiintyy reikävaurio. Kohdassa 7 ulkoluiska on jyrkkä ja ojan pohja näyttää olevan päällysrakenteen alapinnan tason yläpuolella (kuva 33). Maatutka-aineistosta määritettyjen kosteusarvioiden perusteella kyseisessä kohdassa tien päällysrakenteessa on havaittavissa muuta tiejaksoa korkeampi kosteuspitoisuus.

Yksinään 500 merin tiejaksojen uramaksimikeskiarvot eivät anna riittävää informaatiota tiejaksojen urautumisesta. Uramaksimiarvojen perusteella voidaan määrittää tien päällysteelle homogeenisuuskertoimet, joilla selvitetään urautumisen tasaisuutta. Homogeenisuuskertoimet on laskettu rajatuille alueille 500 metrin tiejaksoilta. Taulukossa 18 teiden 11295 ja 11321 rajattujen alueiden homogeenisuuskertoimet ovat värikoodattu taulukon 9 riskiluokkien raja-arvojen perusteella.

Taulukko 18. Teiden 11295 ja 11321 tarkastelujaksojen homogeenisuuskertoimet. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ojaosuuksia. Värikoodit riskiluokittain: RL2 = turkoosi, RL3 = sininen, RL4 = violetti ja RL5 = punainen.

HK	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200*	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 1 pl 2000–2500*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 2 pl 5500–6000*
2020	3,71	3,06	1,52	1,53	1,29	1,69
2023	2,90	2,88	1,37	1,43	1,27	1,53
2026	4,21	2,94	1,38	1,42	1,32	1,79

Teiden 11295 ja 11321 rajattujen alueiden homogeenisuuskertoimissa on selviä eroja. Tien 11295 tieosan 1 homogeenisuuskertoimet ovat olleet korkeita 2,88–4,21, mikä viittaa urautumisen epätasaiseen jakautumiseen. Sen sijaan tien 11295 tieosan 2 sekä tien 11321 suunnan 1 homogeenisuuskertoimet ovat pysyneet välillä 1,27–1,52, mikä osoittaa urautumisen olevan tasaisempaa. Tien 11295 tieosien 1 ja 2 homogeenisuuskertoimien välinen ero johtuu todennäköisesti tieosan 2 pienemmästä KVL:sta sekä päällysteen paremmasta kunnosta (rajatun alueen puitteissa). Tien 11321 suunnassa 2 urautumisen vaihtelu on suurempaa kuin suunnassa 1. Tulosten perusteella tien 1129 tieosa 1 erottuu selvästi epähomogeenisimpana alueena, kun taas tien 11295 tieosa 2 ja tien 11321 suunta 1 edustavat tasaisemmin urautuneita osuuksia.



Kuva 25. Tien 11321 tieosan 1 suuntien 1 ja 2 uramaksimit. Sinisellä rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostettuja ojaosuuksia.

Uramaksimin avulla voidaan laskea myös urakasvunopeudet. Urakasvunopeudet määritetään ajanjaksoille 2019–2022 ja 2023–2026, jolloin voidaan vertailla tilannetta ennen ja jälkeen ojitustoimenpiteiden. Vuoden 2022 ja vuoden 2023 välinen jakso jätetään tarkastelun ulkopuolelle, koska ojitustyöt toteutettiin vuoden 2022 loppupuolella. Näin pyritään eliminoimaan siirtymävaiheen vaikutukset.

Koska urakasvunopeuslaskennassa määritetään ajankohtien t_1 ja t_2 uramaksimien välinen erotus, voidaan jättää negatiiviset eli niin sanotut epäluonnollista uramaksimin kasvua kuvaavat arvot tarkastelun ulkopuolelle. Näin analyysi voidaan kohdistaa nimenomaan ojituksen vaikutuksiin urautumisen kehittymisessä. Taulukossa 19 on esitettynä urakasvunopeudet, joista negatiiviset tulokset on jätetty huomioimatta.

Taulukko 19. Teiden 11295 ja 11321 tarkastelujaksojen urakasvunopeuksien keskiarvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ojaosuuksia.

$U_{kasvunopeus}$ **500 m keskiarvo (mm/vuosi)**	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200*	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 1 pl 2000–2500*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 2 pl 5500–6000*
2019–2022	0,659	0,312	0,344	0,356	0,674	1,113
2023–2026	1,46	0,940	1,30	0,569	0,163	0,706

	Tie 11295 tieosa 1 suunta 1	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 1*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 2*
2019–2022	0,482	0,391	0,603	0,825
2023–2026	0,953	0,688	0,314	0,481

Taulukon 19 arvoista nähdään sekä koko tien urakasvunopeuksien keskiarvot että rajattujen alueiden urakasvunopeudet. Tien 11295 arvoista huomataan, että urakasvunopeus on kasvanut tarkastelujaksojen välillä riippumatta siitä, onko ojia parannettu vai ei. Verrattaessa tieosan 1 paaluvälin 700–1200 urakasvunopeuksia vuosien 2019–2022 ja 2023–2026 välillä havaitaan eron olevan noin 0,80 mm/vuosi alueella, jolla ojia ei ole parannettu, kun taas paaluvälillä 1200–1700 ero on 0,63 mm/vuosi. Tämä viittaa siihen, että urakasvunopeuden kasvu on ollut hitaampaa kunnostetulla osuudella. Urakasvunopeuden vähäisempi kasvu ojitetuissa kohdissa näkyy myös tieosan 2 tuloksissa. Kunnostetulla kohdalla urakasvunopeuden muutos oli noin 0,21 mm/vuosi, kun taas kunnostamattomalla kohdalla vastaava muutos oli noin 0,96 mm/vuosi.

Tarkastelua voidaan tarkentaa tien 11295 osalta jakamalla 500 metrin tiejaksot 100 metrin osiin. Tarkastelusta rajataan pois sellaiset 100 metrin tiejaksot, joilla ojitustoimenpiteitä ei ole toteutettu esimerkiksi liittymien vuoksi (kuvat 27, 28, 30 ja 31). Taulukossa 20 esitetään valittujen tiejaksojen urakasvunopeuksien 100 metrin keskiarvot.

Taulukko 20. Teiden 11295 tarkastelujaksojen urakasvunopeuksien 100 metrin keskiarvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ojaosuuksia.

$U_{kasvunopeus}$ **100 m keskiarvo (mm/vuosi)**	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200*	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500*
2019–2022	pl 800–900: 0,466	pl 1400–1500: 0,118	pl 3100–3200: 0,262	pl 5000–5100: 0,547
	pl 900–1000: 0,464	pl 1500–1600: 0,364	pl 3200–3300: 0,380	pl 5200–5300: 0,665
	pl 1000–1100: 2,08	pl 1600–1700: 0,471	pl 3300–3400: 0,413	pl 5300–5400: 0,256
2023–2026	pl 800–900: 0,447	pl 1400–1500: 0,088	pl 3100–3200: 1,32	pl 5000–5100: 0,429
	pl 900–1000: 1,49	pl 1500–1600: 0,792	pl 3200–3300: 1,48	pl 5200–5300: 0,620
	pl 1000–1100: 3,60	pl 1600–1700: 0,689	pl 3300–3400: 1,75	pl 5300–5400: 0,523

Taulukon 20 tiejaksojen 100 metrin keskiarvoista nähdään paremmin urakasvunopeuden kehitys kunnostettujen ja kunnostamattomien ojien välillä. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 paaluvälistä 1400–1500 nähdään selvästi, että urakasvunopeus on laskenut ojituksen jälkeen. Sama lasku havaitaan tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 paaluväleillä 5000–5100 ja 5200–5300. Kunnostamattomia tieosuuksia tarkasteltaessa huomataan, että tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 paaluväliä 800–900 lukuun ottamatta urakasvunopeudet ovat kasvaneet. Kasvu on kunnostettuihin osuuksiin verrattuna huomattavasti suurempaa. Näiden 100 metrin keskiarvojen perusteella voidaan siten todeta, että kuivatusparannuksella on ollut positiivinen vaikutus urautumiskehityksen hidastumiseen.

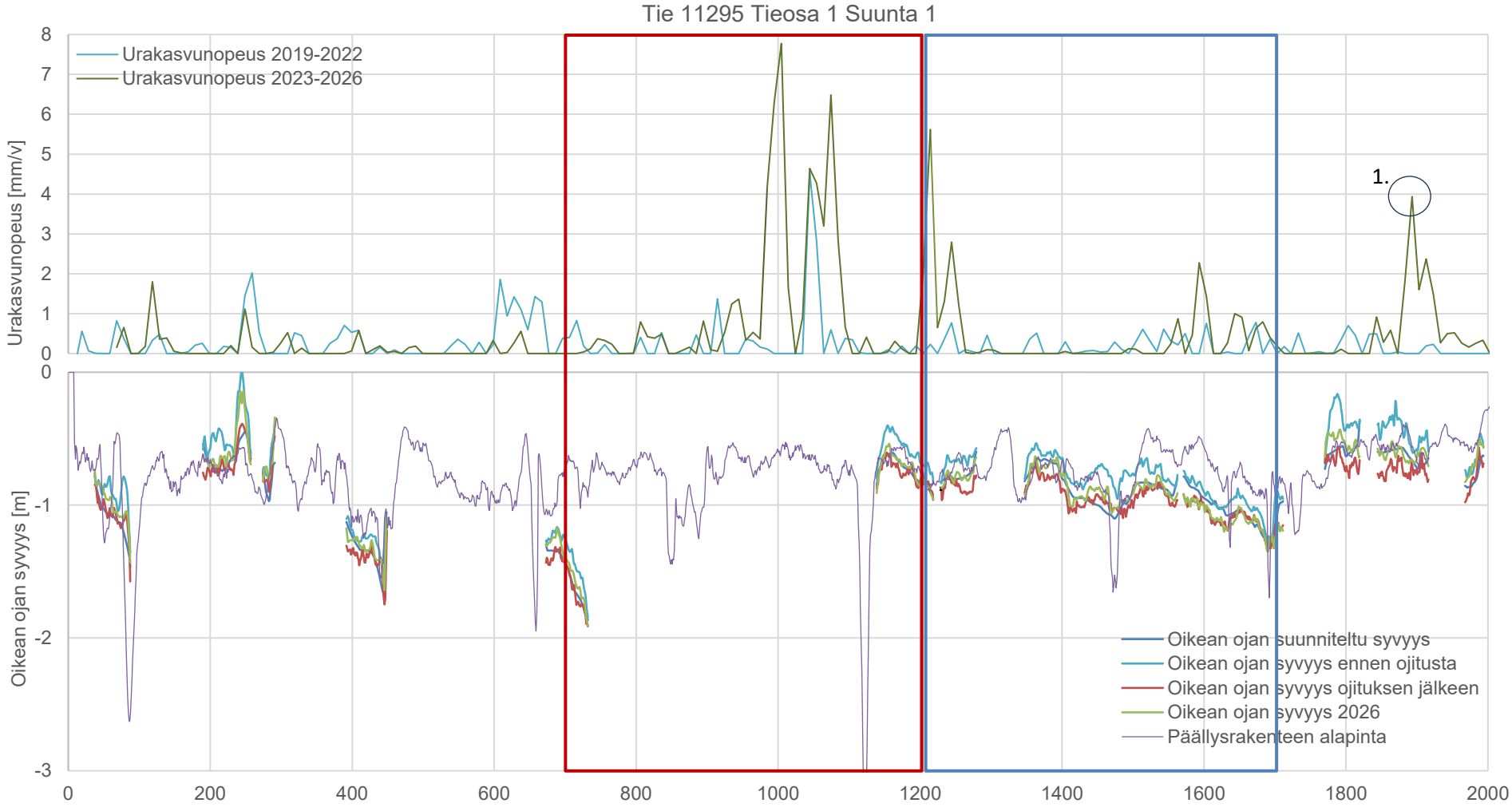
Tietä 11321 (taulukko 19) tarkasteltaessa huomataan, että urakasvunopeus on koko tieosalla molemmissa suunnissa lähes puolittunut jälkimmäisellä tarkastelujaksolla. Rajatuilla alueilla suunnan 1 paaluvälillä 2000–2500 vuosien 2023–2026 urakasvunopeus on noin neljännes vuosien 2019–2022 urakasvunopeudesta. Koska tien kantavaa kerrosta on vahvistettu vaahtobitumistabiloinnilla, sen tuloksia on luotettavinta verrata saman tien eri osuuksien välillä eikä tien 11295 tuloksiin, sillä kyseisen tien päällyste on vanhempi ja vaurioituneempi.

Kuvissa 26, 27 ja 28 on esitetty tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 urakasvunopeudet ja ojien pohjien sijainnit samassa kuvaajassa. Vastaavasti kuvat 29, 30 ja 31 esittävät tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 urakasvunopeuksia ja ojanpohjien sijainteja. Kuvat 32 ja 33 puolestaan kuvaavat tien 11321 suunnan 1 ja suunnan 2 urakasvunopeuksia sekä ojanpohjien sijainteja. Taulukkoon 21 on koottu mahdolliset syyt kuvissa 26–33 havaittuihin urakasvunopeuksien poikkeamakohtiin. Taulukossa 21 esitettyjen selitysten perusteella urakasvunopeuksien poikkeamia aiheuttavat erityisesti liittymät, rummut ja päällystevauriot.

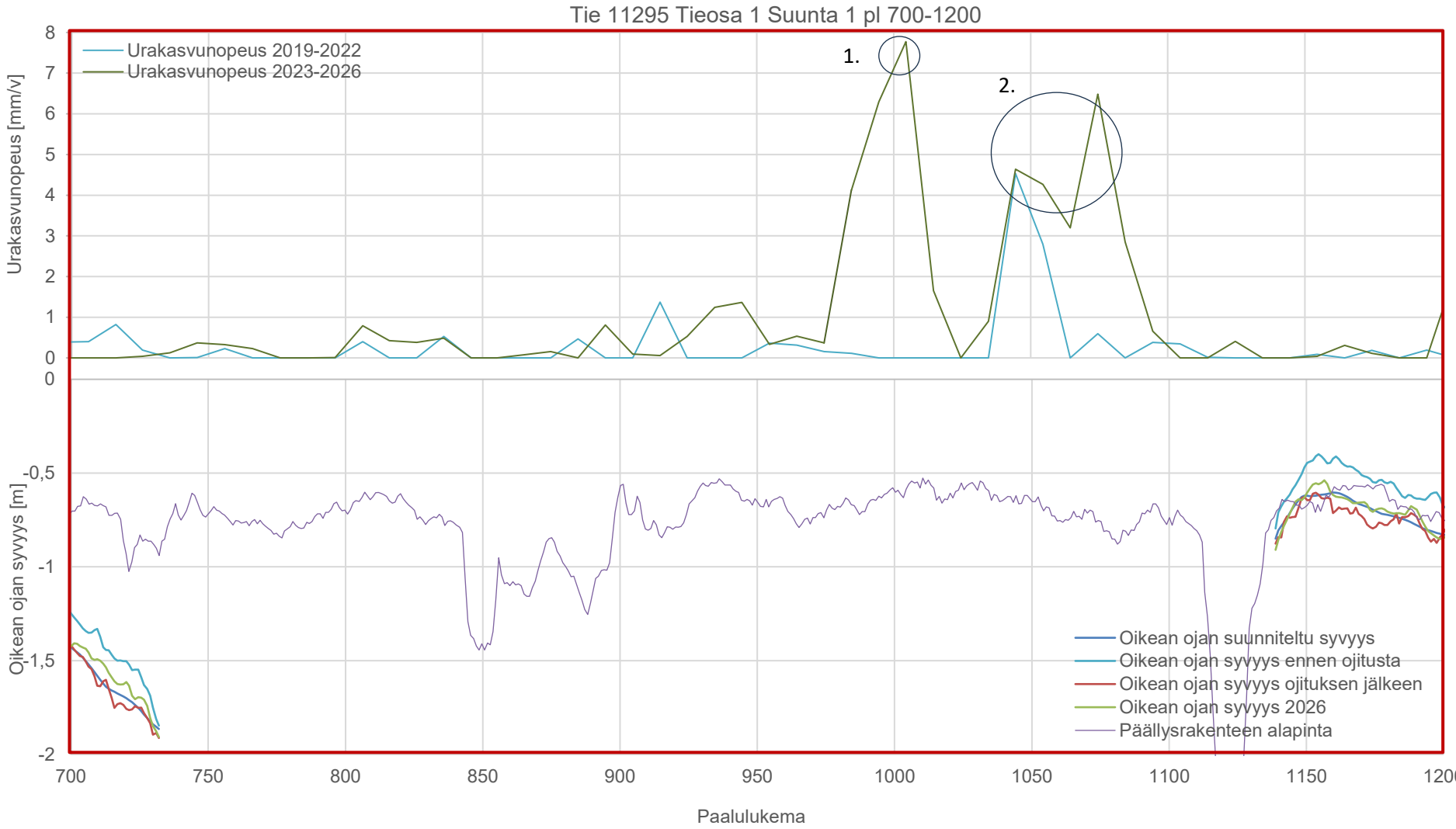
Taulukko 21. Teiden 11295 ja 11321 kuvissa 26–33 esitettyjen urakasvunopeuksien poikkeamakohtien selitykset.

merkinnät	*Kuva 26*	*Kuva 27*	*Kuva 28*	*Kuva 29*	*Kuva 30*	*Kuva 32*	*Kuva 33*
1.	leveä pituushalkeama	liittymä ja rumpu	purkauma	verkkohalkeama	reikä ja paikkaus	liittymä, rumpu ja verkkohalkeama	ajouran verkkohalkeama
2.		rumpu		leveä pituushalkeama	laajamittainen purkauma ja useampi reikä		liittymä ja rumpu
3.							pohjamaa liejuista savea
4.							rumpu ja liittymä

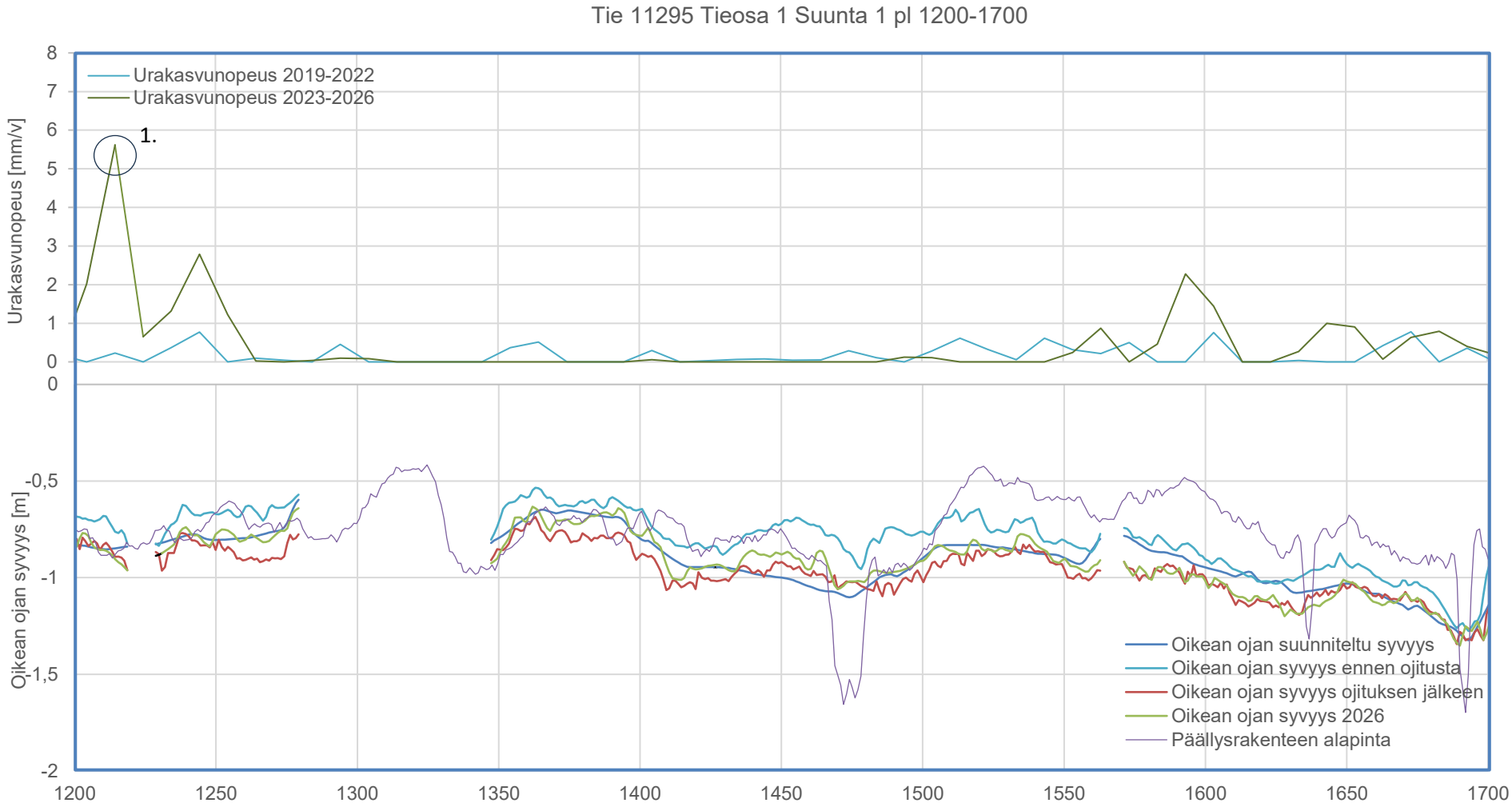
Tie 11321 on toiminut KUNDI-hankkeen pääkohteena, minkä vuoksi useat hankkeen yhteydessä tehdyt johtopäätökset liittyvät tähän kohteeseen. Kuvien 32 ja 33 kuvaajista havaitaan, että ojien kunnostusvälit ovat huomattavasti tiheämmät kuin tiellä 11295. Päällysteen kunnon perusteella tie 11321 on paremmassa kunnossa kuin tiet 11295 ja 11297.



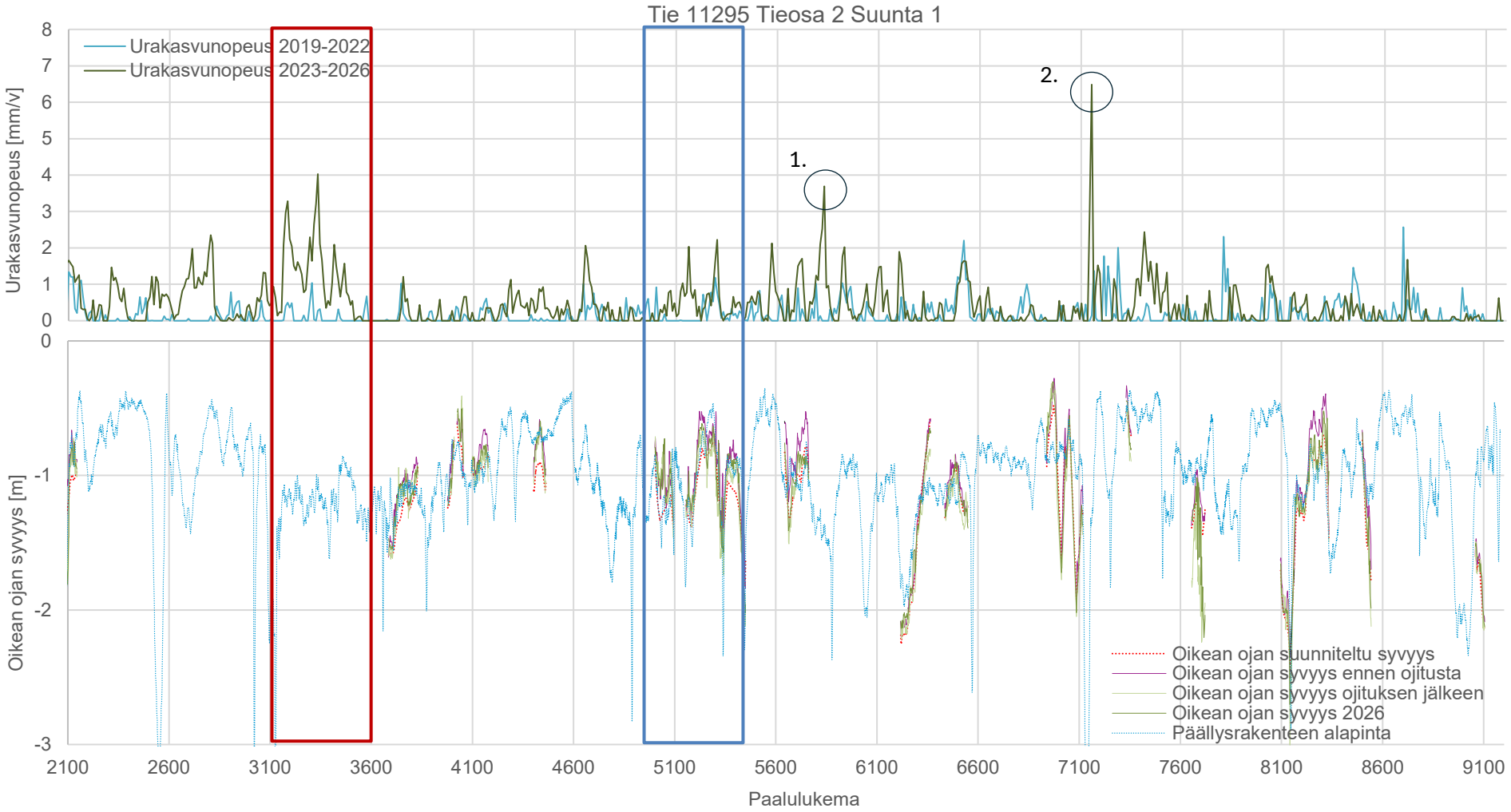
Kuva 26. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 urakasvunopeudet ja ojasyvyydet. Punaisella rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostamatonta ja sinisellä rajattu kunnostettua ojaosuutta.



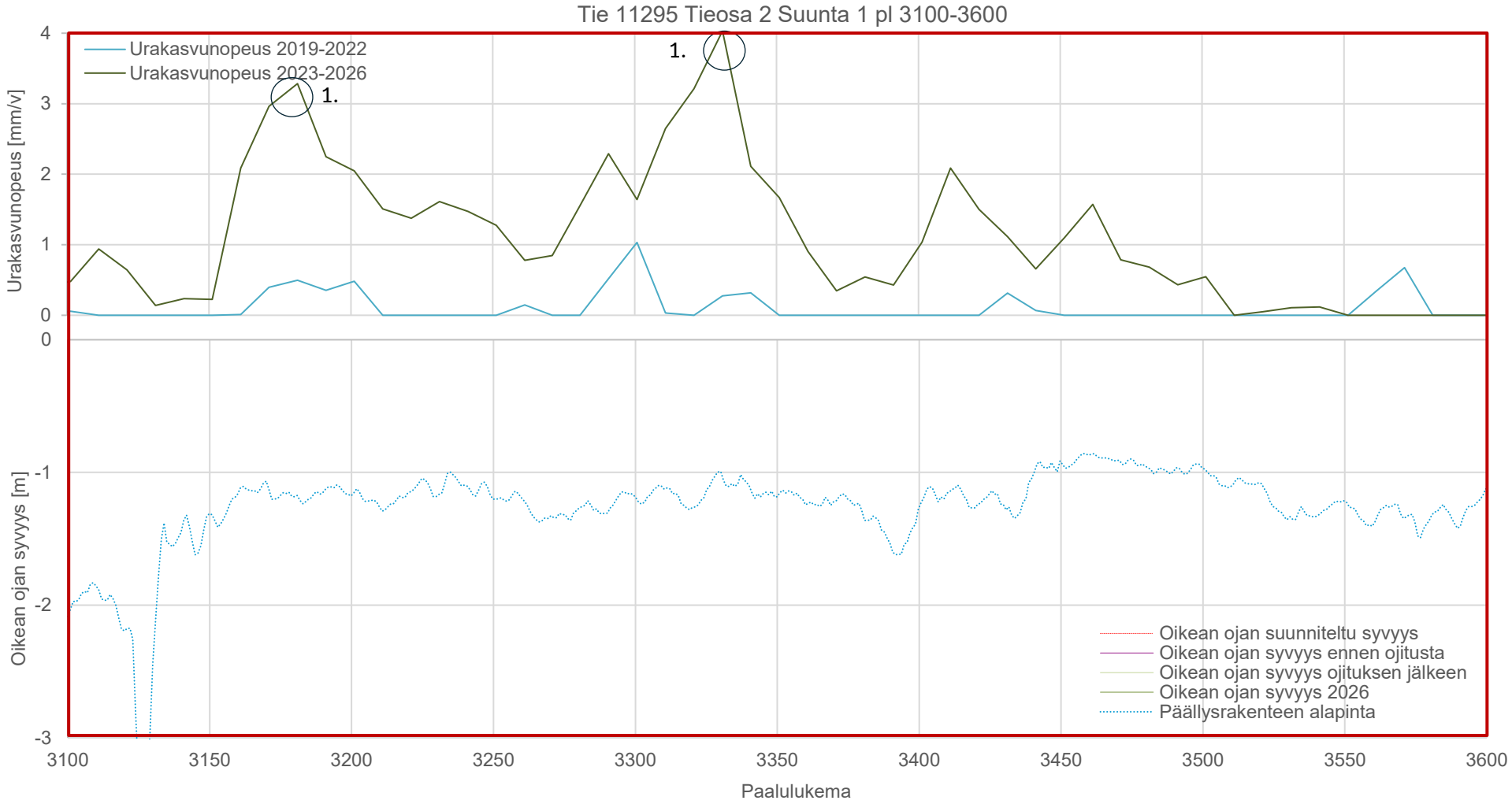
Kuva 27. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 urakasvunopeudet ja ojasyvyydet paaluvälillä 700–1200. Tarkastelujakso edustaa kunnostamatonta ojaosuutta.



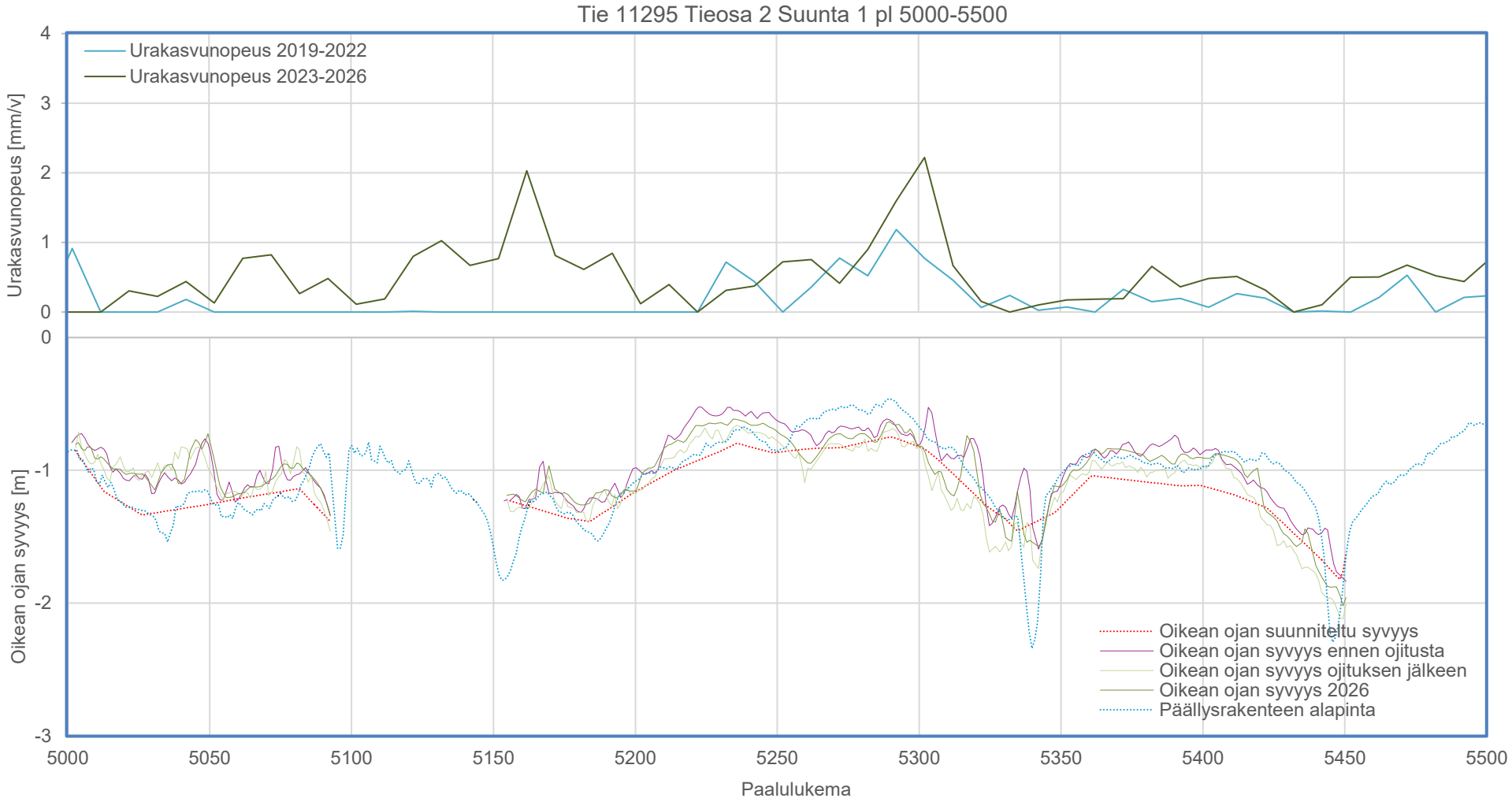
Kuva 28. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 urakasvunopeudet ja ojasyvyydet paaluvälillä 1200–1700. Tarkastelujakso edustaa kunnostettua ojaosuutta.



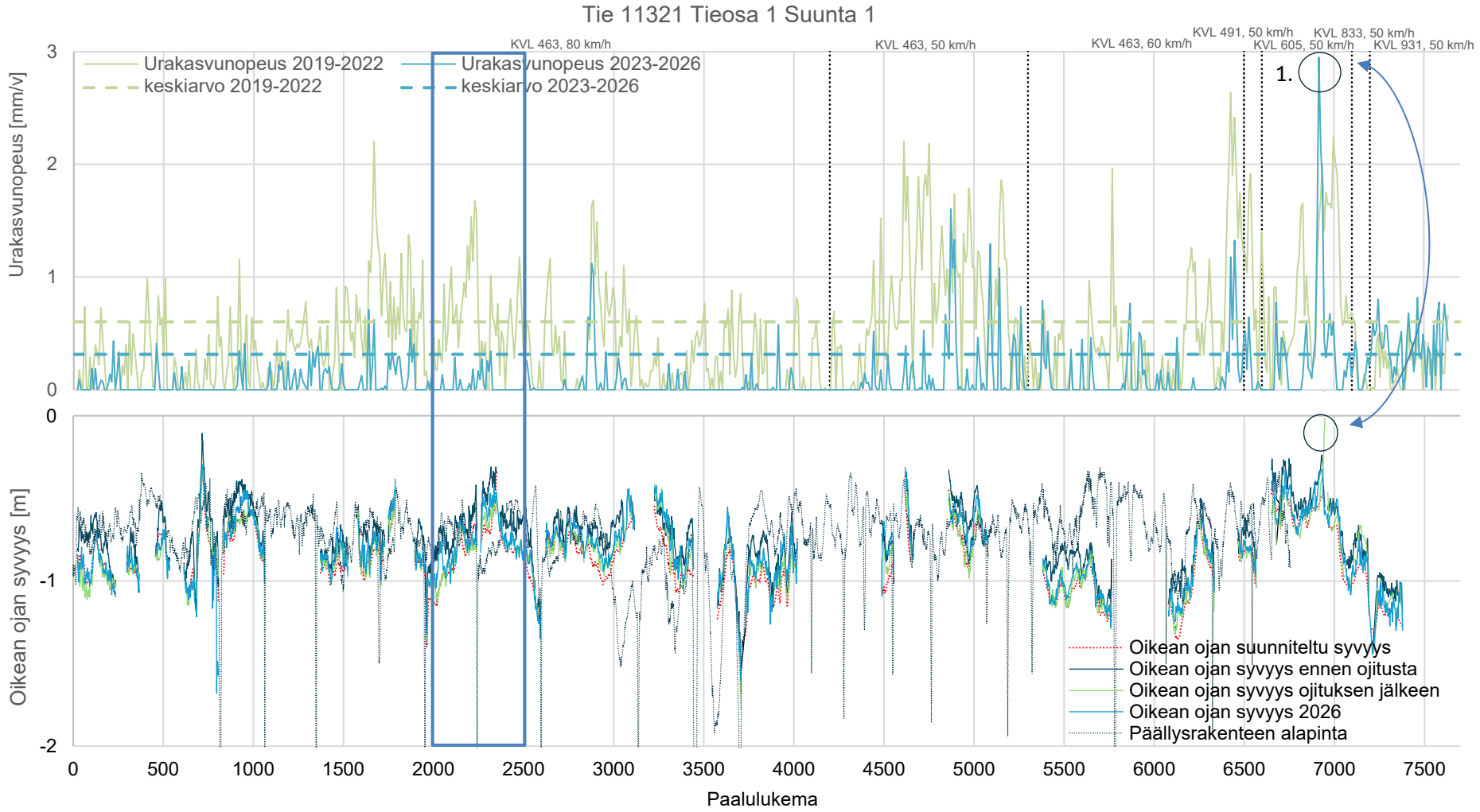
Kuva 29. Tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 urakasvunopeudet ja ojasyvyydet. Punaisella rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostamatonta ja sinisellä rajattu kunnostettua ojaosuutta.



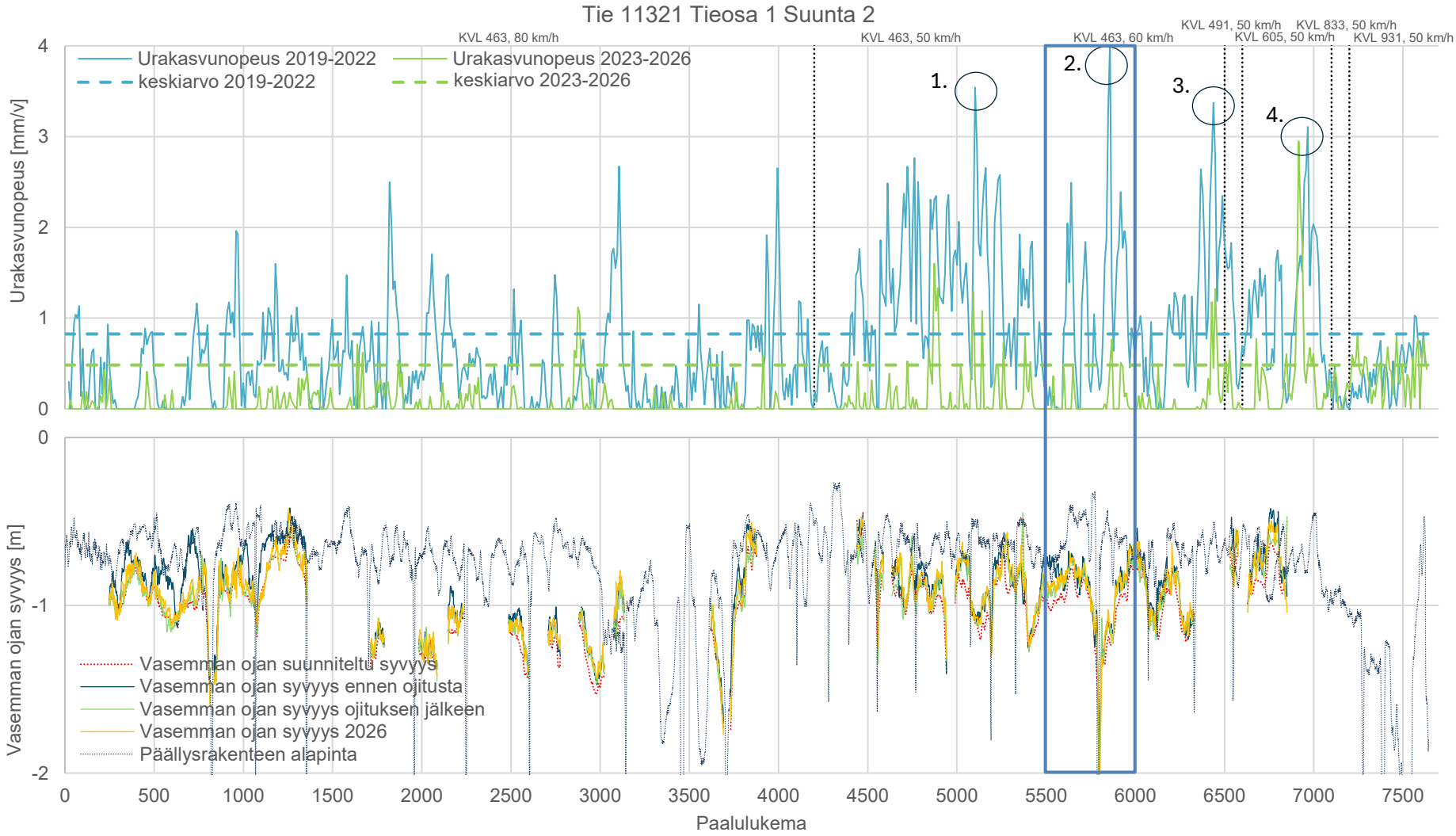
Kuva 30. Tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 urakasvunopeudet ja ojasyvyydet paaluvälillä 3100–3600. Tarkastelujakso edustaa kunnostamatonta ojaosuutta.



Kuva 31. Tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 urakasvunopeudet ja ojasyvyydet paaluvälillä 5000–5500. Tarkastelujakso edustaa kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 32. Tien 11321 tieosan 1 suunnan 1 urakasvunopeudet ja ojasyvyydet. Sinisellä rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 33. Tien 11321 tieosan 1 suunnan 2 urakasvunopeudet ja ojasyvyydet. Sinisellä rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostettua ojaosuutta.

5.2 Pituussuuntaiset epätasaisuudet

Pohjamaan maalajien ja maaston korkeuserojen tarkastelu IRI-arvojen yhteydessä on olennaista, koska pohjamaa vaikuttaa tien rakenteen kantavuuteen ja routivuuteen. Hienorakeiset maalajit ovat routivia, minkä vuoksi niillä sijaitsevilla tieosuuksilla voi esimerkiksi esiintyä enemmän painumia, routanousuja ja muita epätasaisuuksia. Nämä rakenteelliset muutokset heijastuvat tien pituussuuntaiseen tasaisuuteen ja siten IRI-arvoon. Maastokäynnin yhteydessä on havaittu, että tiet kulkevat osin mäkimaastossa. Taulukossa 22 on esitetty teiden 11295 ja 11321 tarkastelualueiden pohjamaan maalajit 100 metrin tiejaksoittain. Maaperäkarttojen maalajin hiesun voidaan arvioida lähinnä edustavan geoteknisen maalajiluokituksen silttiä.

Taulukko 22. Teiden 11295 ja 11321 tarkastelujaksojen pohjamaan maalajit. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ojaosuuksia.

pohjamaan maalaji	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200*	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 1 pl 2000–2500*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 2 pl 5500–6000*
	pl 700–800: Sa	pl 1200–1300: Sa, Mr	pl 3100–3200: Ht	pl 5000–5100: Hs	pl 2000–2100: HHt/Sa	pl 5500–5600: LjSa
	pl 800–900: Hs	pl 1300–1400: Sa	pl 3200–3300: Ht, Hs/Sa	pl 5100–5200: Hs, Mr	pl 2100–2200: HHt/Sa	pl 5600–5700: LjSa
	pl 900–1000: Hs	pl 1400–1500: Sa	pl 3300–3400: Hs/Sa, Mr	pl 5200–5300: Mr	pl 2200–2300: HHt/Sa	pl 5700–5800: LjSa
	pl 1000–1100: Hs	pl 1500–1600: Sa	pl 3400–3500: Mr, Hs/Sa	pl 5300–5400: Mr	pl 2300–2400: HHt/Sa	pl 5800–5900: LjSa
	pl 1100–1200: Sa	pl 1600–1700: Sa	pl 3500–3600: Hs/Sa, Mr	pl 5400–5500: Mr	pl 2400–2500: HHt/Sa	pl 5900–6000: LjSa

Kuvien 34,35 ja 36 IRI-arvot edustavat 10 metrin keskiarvostettuja arvoja. Koska analyysin tavoitteena on selvittää kuivatusparannuksen vaikutukset tien pituussuuntaiseen epätasaisuuteen, IRI-arvot keskiarvoistetaan 500 metrin tarkastelujaksoittain. IRI-arvoja voidaan verrata taulukon 7 raja-arvoihin. KL3 raja-arvon ylittävät poikkeamakohdat voidaan selvittää yksityiskohtaisemmin video- ja laserkeilausaineistosta (taulukko 24).

Taulukossa 23 on esitetty tarkastelualueiden IRI-arvojen keskiarvot taulukon 7 raja-arvojen mukaisesti värikoodattuina. Taulukosta 23 havaitaan, että tien 11321 keskiarvot sijoittuvat kuntoluokkaan KL4 ja osin jopa KL5, kun tarkastelu siirtyy koko tien keskiarvosta rajattujen alueiden keskiarvoihin. Tien 11321 kohdalla erityisesti tarkastelujaksojen keskiarvot ovat paaluvälillä 2000–2500 lähes samat kaikkina tarkasteluvuosina. Paaluvälillä 5500–6000 keskiarvojen välillä on taas havaittavissa vain hyvin pieniä muutoksia. Kuvasta 36 havaitaan, että IRI-arvojen poikkeamat kohdistuvat toistuvasti samoihin kohtiin, mikä saattaa osaltaan johtua tien vaihtelevasta maastosta.

Taulukko 23. Teiden 11295 ja 11321 tarkastelujaksojen IRI-keskiarvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ojaosuuksia. Värikoodit kuntoluokittain: KL5 = turkoosi, KL4 = sininen, KL3 = violetti ja KL2 = punainen.

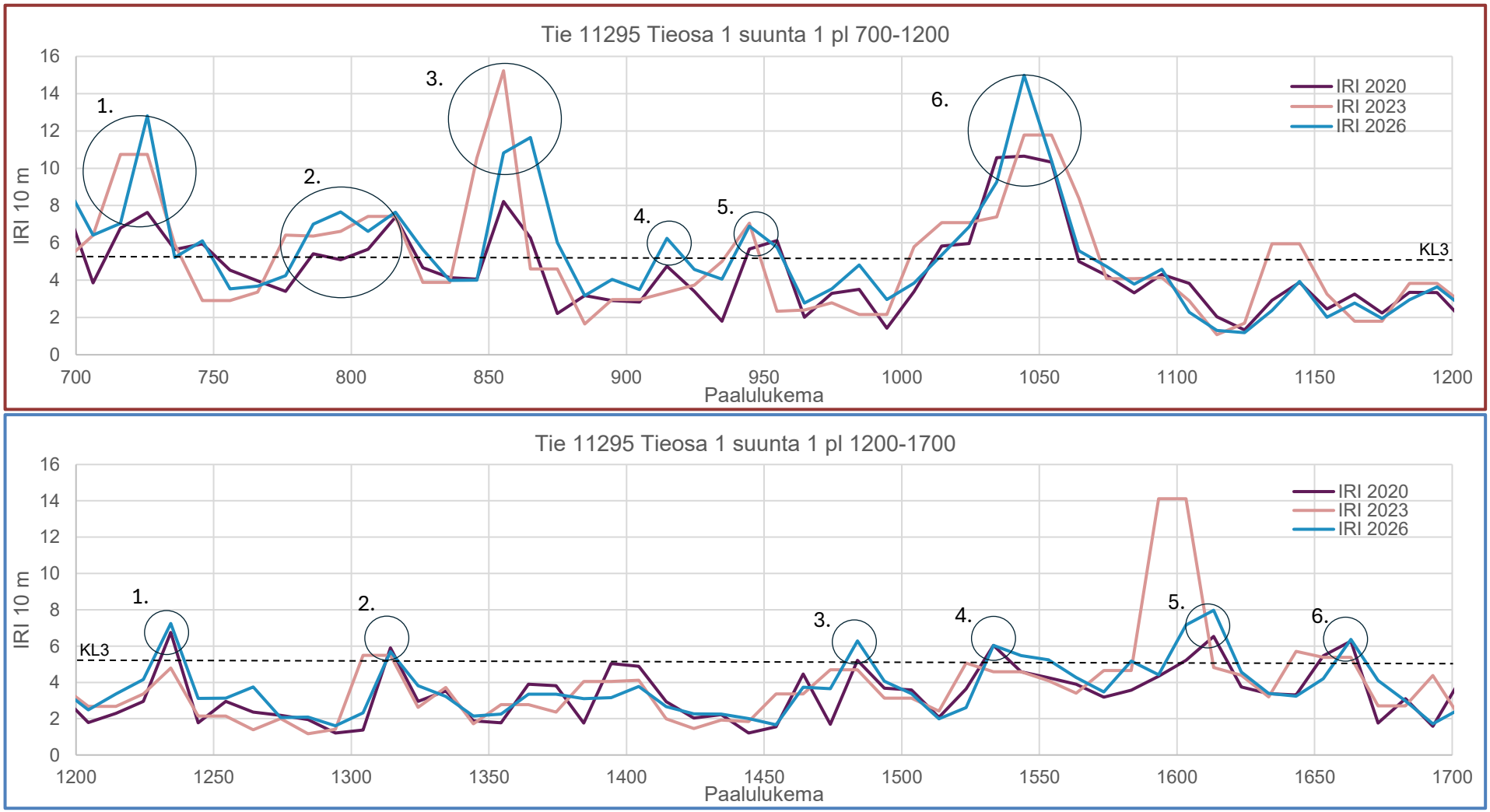
IRI-arvojen keskiarvo (mm/m)	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200*	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 1 pl 2000–2500*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 2 pl 5500–6000*
2020	4,56	3,35	1,90	2,50	2,60	1,72
2023	5,25	3,86	2,67	3,04	2,59	1,86
2026	5,32	3,71	2,90	3,18	2,59	1,77
	Tie 11295 tieosa 1 suunta 1		*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1*		*Tie 11321 tieosa 1 suunta 1*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 2*
2020	4,22		2,58		2,46	2,61
2023	4,72		3,06		2,65	2,95
2026	4,89		3,31		2,57	2,83

Kuvasta 36 nähdään, että tarkastelujaksoilla yksittäiset IRI-arvot eivät ole kovin korkeita muutamia poikkeamakohtia lukuun ottamatta. Tarkastelujakson 5500–6000 pituussuuntainen tasaisuus (vuonna 2026 1,77 mm/m) on parempi kuin tieosuudella keskimäärin (vuonna 2026 2,83 mm/m) (taulukko 23). Kuten taulukosta 24 nähdään, IRI-arvojen poikkeamat sijoittuvat suurimmaksi osaksi liittymien, pihateiden tai rumpujen läheisyyteen. Tien 11295 pituussuuntaiseen epätasaisuuteen vaikuttavat myös päällystevauriot, kun taas tiellä 11321 niiden vaikutus on päällysteen paremman kunnon ja nuoremman iän vuoksi vähäinen. Tien 11321 videoaineistoja tarkastellessa havaitaan, että ajoradan keskelle on muodostunut saumahalkeama. Taulukosta 20 nähdään, että tarkastelujaksojen kohdalla pohjamaa on routivaa (Sa) ja kohtalaisesti routivaa (HHt) maalajia. Routa voi osaltaan edistää saumahalkeaman syntymistä, koska sauma on päällysteen heikoin kohta. Tällöin jo pienetkin routanousuerot voivat aiheuttaa halkeilua.

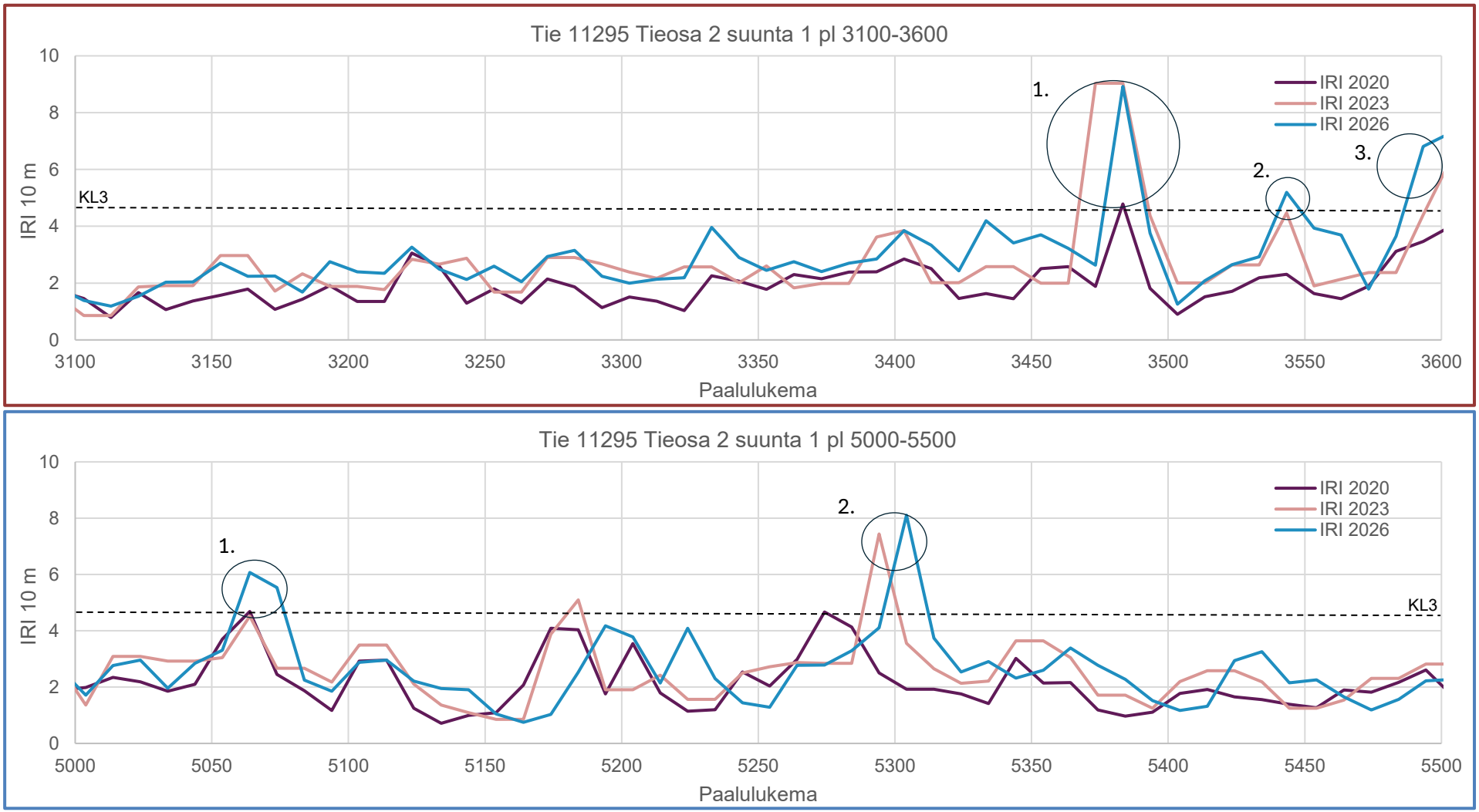
Taulukko 24. Teiden 11295 ja 11321 kuvissa 34–36 esitettyjen IRI-arvojen poikkeamakohtien selitykset. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ojaosuuksia.

merkinnät	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200* ***Kuva 34 1/2***	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700* ***Kuva 34 2/2***	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600* ***Kuva 35 1/2***	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500* ***Kuva 35 2/2***	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 1 pl 2000–2500* ***Kuva 36 1/2***
1.	pihatie	useampi päällystevaurio ja syvempi ura	liittymä ja mäen huippukohta	pakkaskatko	rumpu
2.	useampi päällystevaurio	liittymä	-	liittymä ja syvempi ura	rumpu ja liittymä
3.	liittymä tien molemmin puolin	poikkihalkeama	-		liittymä
4.	leveä poikkihalkeama	useampi päällystevaurio			
5.	liittymä ja rumpu	poikkihalkeama ja paikattu muu vaurio			
6.	useampi päällystevaurio	poikkihalkeama			

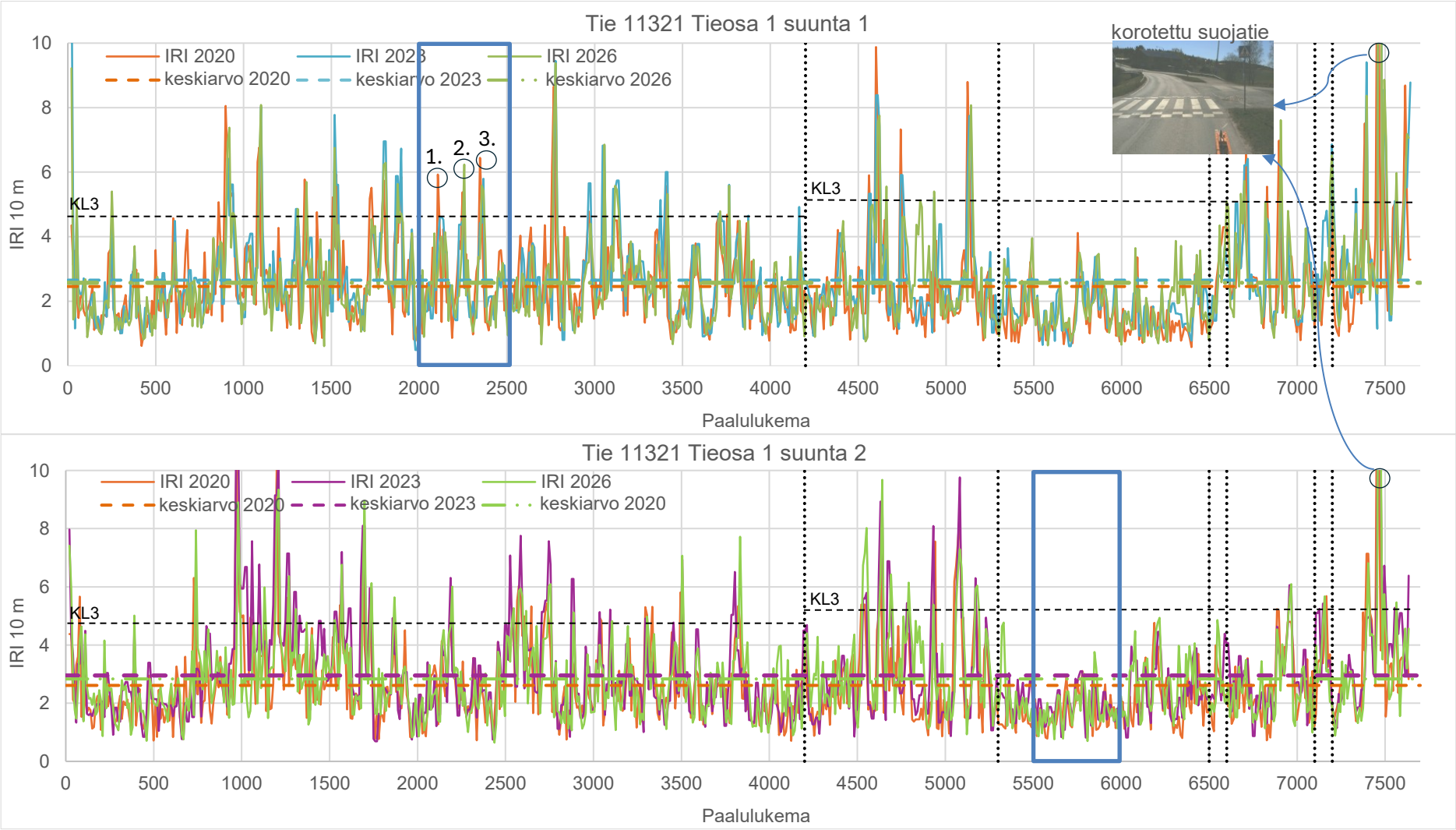
Tarkasteltaessa tien 11295 IRI-keskiarvoja (taulukko 23) havaitaan niiden sijoittuvan kuntoluokkiin KL3 ja KL4. Kuten myös kuvasta 34 voidaan havaita, suuremmat IRI-arvojen poikkeamat sijoittuvat tien 11295 tieosan 1 paaluvälille 700–1200. Videoaineistosta nähdään, että päällysteen kunto on erittäin heikko ja vaurioita esiintyy tiheästi sekä monimuotoisesti. Taulukosta 24 havaitaan, että pituussuuntaista epätasaisuutta aiheuttavat erityisesti poikkihalkeamat ja pakkaskatkot. Kuvan 35 tien 11295 tieosan 2 paaluvälillä 3100–3600 sijaitsevilla kohdilla 2 ja 3 päällysteessä ei ole havaittavissa vaurioita, eikä urautuminenkaan ole merkittävää. Kohde sijaitsee hiesuisella/savisella pohjamaalla, joten pituussuuntainen epätasaisuus saattaa tässä tapauksessa johtua roudan aiheuttamista tien pinnan muodonmuutoksista.



Kuva 34. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 paaluvälien 700–1200 ja 1200–1700 IRI-arvot. Paaluväli 700–1200 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 1200–1700 kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 35. Tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 paaluvälien 3100–3600 ja 5000–5500 IRI-arvot. Paaluväli 3100–3600 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 5000–5500 kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 36. Tien 11321 tieosan 1 suuntien 1 ja 2 IRI-arvot. Sinisellä rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostettuja ojaosuuksia.

5.3 Päällystevauriot

Arvioitaessa päällysteen kunnon ja vaurioitumisen kehitystä ennen ojitustoimenpiteitä ja niiden jälkeen teille 11295 ja 11321 laskettiin vauriosummat vuosilta 2020, 2023 ja 2026. Vauriosummat on laskettu koko tien leveydeltä jokaiselle tieosuudelle 100 metrin tiejaksoissa. Päällystevauriot on inventoitu ja paikannettu kyseisten tarkasteluvuosien videoaineistosta hyödyntäen vaurioinventointilomaketta (liite 2). Vauriosummalaskennan tulokset on esitetty kuvissa 37, 39 ja 41. Kuvissa punaisella merkityt paaluvälit ovat sellaisia tiejaksoja, joista joko auringon tai puiden varjojen takia ei ole voitu tulkita päällysteen kuntoa. Nämä kohdat on jätetty kokonaan pois tarkastelusta.

Vauriosumman laskennan yhteydessä teille 11295 ja 11321 on laskettu vaurioitumisnopeus. Vaurioitumisnopeuden vakavuutta voidaan verrata Tiehallinnon (2005b) raja-arvoihin (kappaleessa 2.6), jotka on määritetty päällystetyyppikohtaisesti. Lasketut vaurioitumisnopeudet on esitetty kuvissa 38, 40 ja 42. Tielle 11321 ei ole laskettu vuoden 2020 vaurioitumisnopeutta, koska ohjeen mukaan alle 5-vuotiaille päällysteille ei vaurioitumisnopeutta lasketa.

Tarkasteltaessa kuvia 37 ja 39 yleisellä tasolla huomataan, että päällysteen kunto on huonoimmillaan tien 11295 tieosalla 1. Tien 11295 tieosan 2 päällyste on nähtävästi paremmassa kunnossa kuin tieosan 1. Kuten taulukosta 14 huomataan, tien 11295 tieosan 1 päällystetyyppi on PAB-B ja tieosan 2 PAB-V. Yksinään päällystetyyppi ei riitä selittämään päällysteen kuntoa, vaan myös tien nopeusrajoitus, KVL, ikä sekä ympäristöolosuhteet on huomioitava. Verrattaessa näitä tekijöitä keskenään huomataan, että tieosan 1 KVL on yli kaksi kertaa suurempi kuin tieosan 2. Lisäksi tieosan 2 päällyste on kahdeksan vuotta nuorempi kuin tieosan 1.

Tien 11295 tieosan 1 päällystevaurioista yleisimmät ovat pituushalkeamat. Inventoinneissa nähdään, että useat pituushalkeamat on vuoden 2020 inventoinneissa luokiteltu kapeiksi, kun taas vuoden 2023 inventoinneissa osa näistä kapeista halkeamista on muuttunut leveiksi. Inventointien perusteella on havaittu, että vuosien välillä ei niinkään ole kehittynyt uusia vakavia vaurioita, vaan olemassa olevien päällystevaurioiden vakavuusaste ja pinta-ala ovat kasvaneet. Vakavimmat vauriot sijoittuvat pääasiassa reunoihin sekä ajourien kohdalle. Kuvassa 37 havaittava vuosien 2020–2023 välinen suurempi muutos johtuu pääosin tästä ilmiöstä.

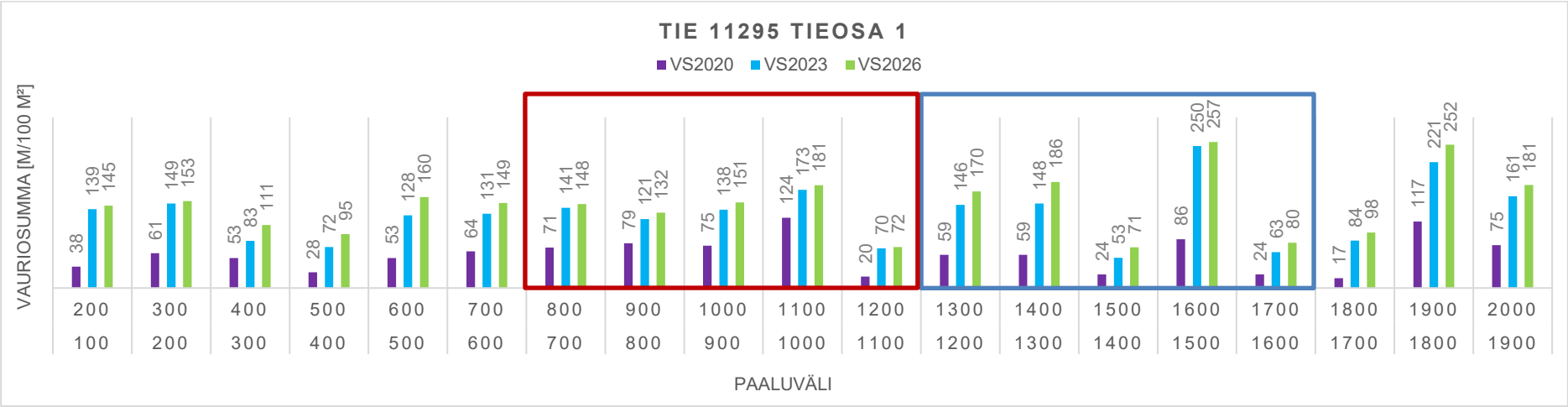
Tarkasteltaessa vuosien 2023–2026 vauriosummia huomataan, että kasvu on pienempää verrattuna vuosien 2020–2023 väliseen muutokseen. Muutos näkyy myös kuvan 38

vaurioitumisnopeuksissa. Esimerkiksi paaluvälillä 1300–1400 vaurioitumisnopeus on ollut vuonna 2020 nolla, vuonna 2023 yksi ja vuonna 2026 jälleen yksi. Tämä viittaa siihen, että vuosien 2023–2026 välillä päällysteen kunnossa ei ole tapahtunut merkittävää heikkenemistä, kun päällysteen ikä otetaan huomioon. Paaluvälillä 1500–1600 korkein vaurioitumisnopeus havaitaan vuonna 2023. Verrattaessa vuosien 2023–2026 tuloksia huomataan, että vuoden 2026 vaurioitumisnopeus on pienempi kuin vuonna 2023. Tämä selittyy sillä, että vauriosummat vuosina 2023–2026 ovat lähes samat, mutta päällysteen ikä on vuonna 2026 kolme vuotta vanhempi. Tämän seurauksena vaurioitumisnopeus laskee arvoon kaksi. Tien 11295 tieosan 1 vaurioitumisnopeudet ovat kuitenkin kappaleessa 2.6 esitettyjen sallittujen raja-arvojen puitteissa (PAB-B: > 5 $m^2/v^{1\cdot4}$).

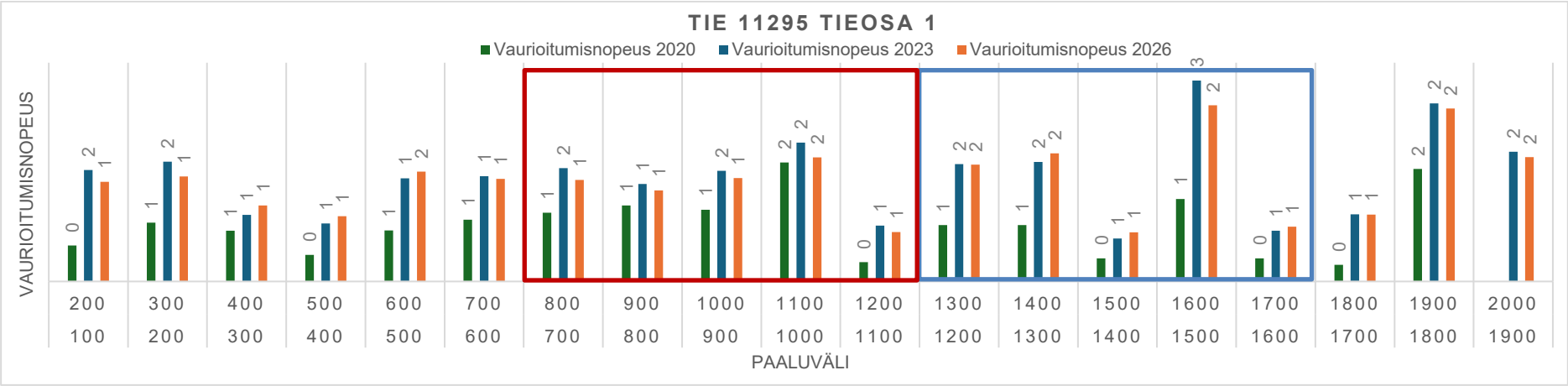
Tarkasteltaessa tien 11295 tieosan 2 vauriosummia (kuva 39) havaitaan, että tieosan alkupäässä päällystevaurioita esiintyy hyvin vähän. Paaluvälillä 3500–3600 havaitaan hieman korkeampi vaurioitumisnopeus vuosien 2020–2023 välillä (kuva 40). Korkea vauriosumma selittyy pituushalkeamilla, joista osa on vuoden 2020 inventoinnin jälkeen kehittyneet siten, että ne on vuoden 2023 inventoinnissa luokiteltu leveiksi. Tarkastelujaksolla 5000–5500 vauriosummaa kasvattavat ajourien kohdalla esiintyvät purkaumat ja reiät. Tien 11295 tieosalla 2 osalla ei myöskään ylity vaurioitumisnopeuden raja-arvo missään kohdassa (PAB-V: > 6 $m^2/v^{1\cdot4}$).

Vuonna 2022 toteutetun kuivatusparannuksen vaikutusta on tulosten perusteella hieman vaikea arvioida. Tien 11295 tieosan 1 kunnostetun ojaosuuden ja kunnostamattoman osan tulokset ovat melko samankaltaisia. Molemmilla tarkastelujaksoilla (paaluvälit 700–1200 ja 1200–1700) vauriosumma kasvaa selvästi vuosien 2020–2023 välillä. Vuosien 2023–2026 välillä muutos on kuitenkin selvästi vähäisempi. Tämän perusteella voidaan arvioida, että ojien parannuksella on ollut jonkinlainen vaikutus päällystevaurioiden kehittymisen hidastumiseen, sillä tarkastelluilla tiejaksoilla ei ole tehty paikkauksia eikä muita kunnossapitotoimenpiteitä tarkasteluajanjakson aikana.

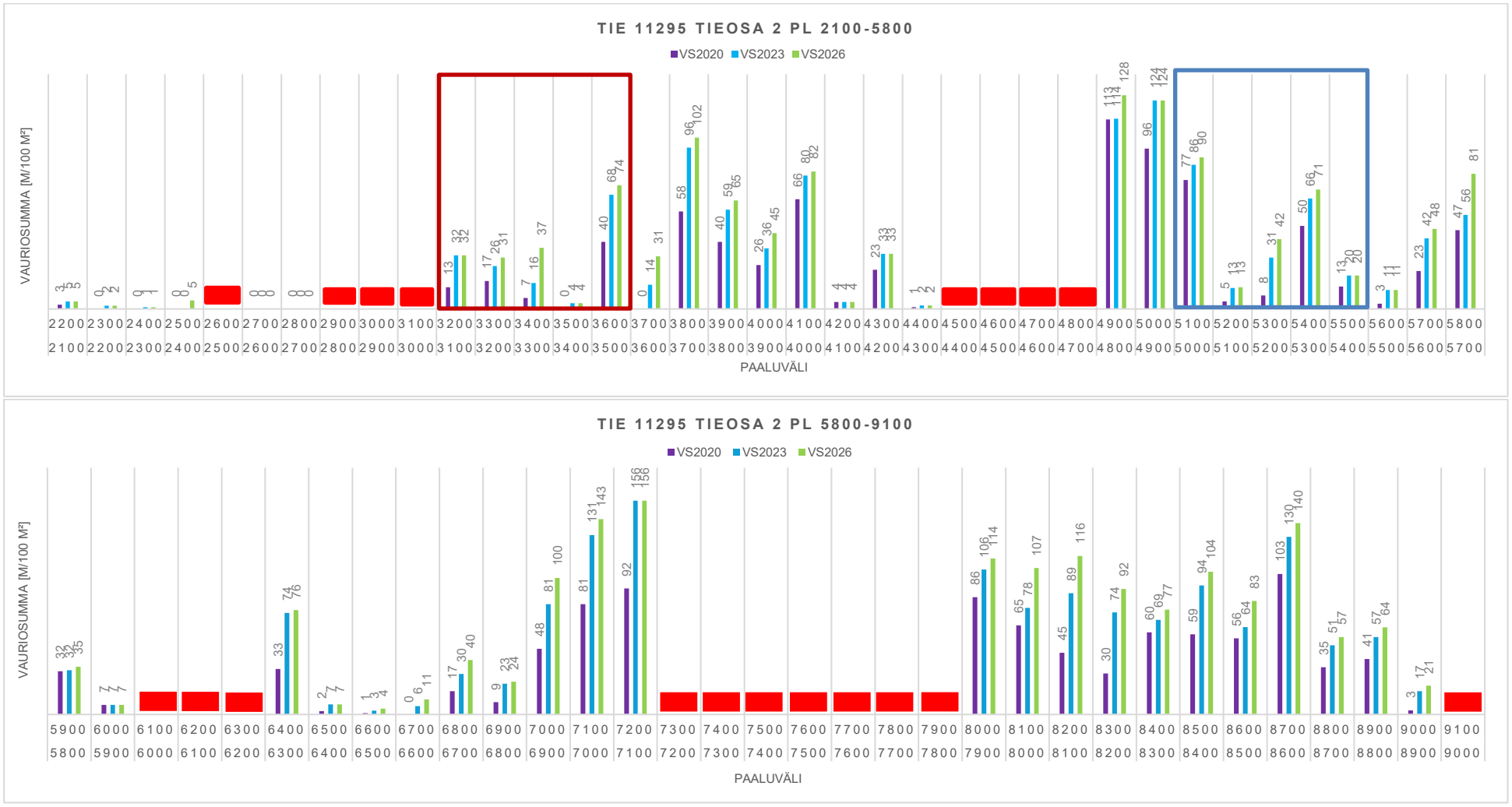
Vaurioitumisnopeudet ovat myös raja-arvojen sisällä. Tarkasteltaessa tien 11321 vauriosummia (kuva 41) havaitaan, että ne ovat selvästi pienempiä verrattuna tien 11295 vaurioihin. Kohteen päällyste on säilynyt erittäin hyväkuntoisena, ja vaurioita esiintyy lähinnä kapeina saumahalkeamina sekä yksittäisinä kapeina pituushalkeamina. Yhtenä syynä tähän voidaan pitää vuonna 2018 toteutettua vaahtobitumistabilointia, joka on tämän luokan tielle epätavanomainen toimenpide. Myös vaurioitumisnopeudet ovat pysyneet hyvin alhaisina ja selvästi raja-arvojen alapuolella (kuva 42). Tässä kohteessa kuivatusparannuksen vaikutuksia onkin päällystevaurioiden näkökulmasta vaikea arvioida.



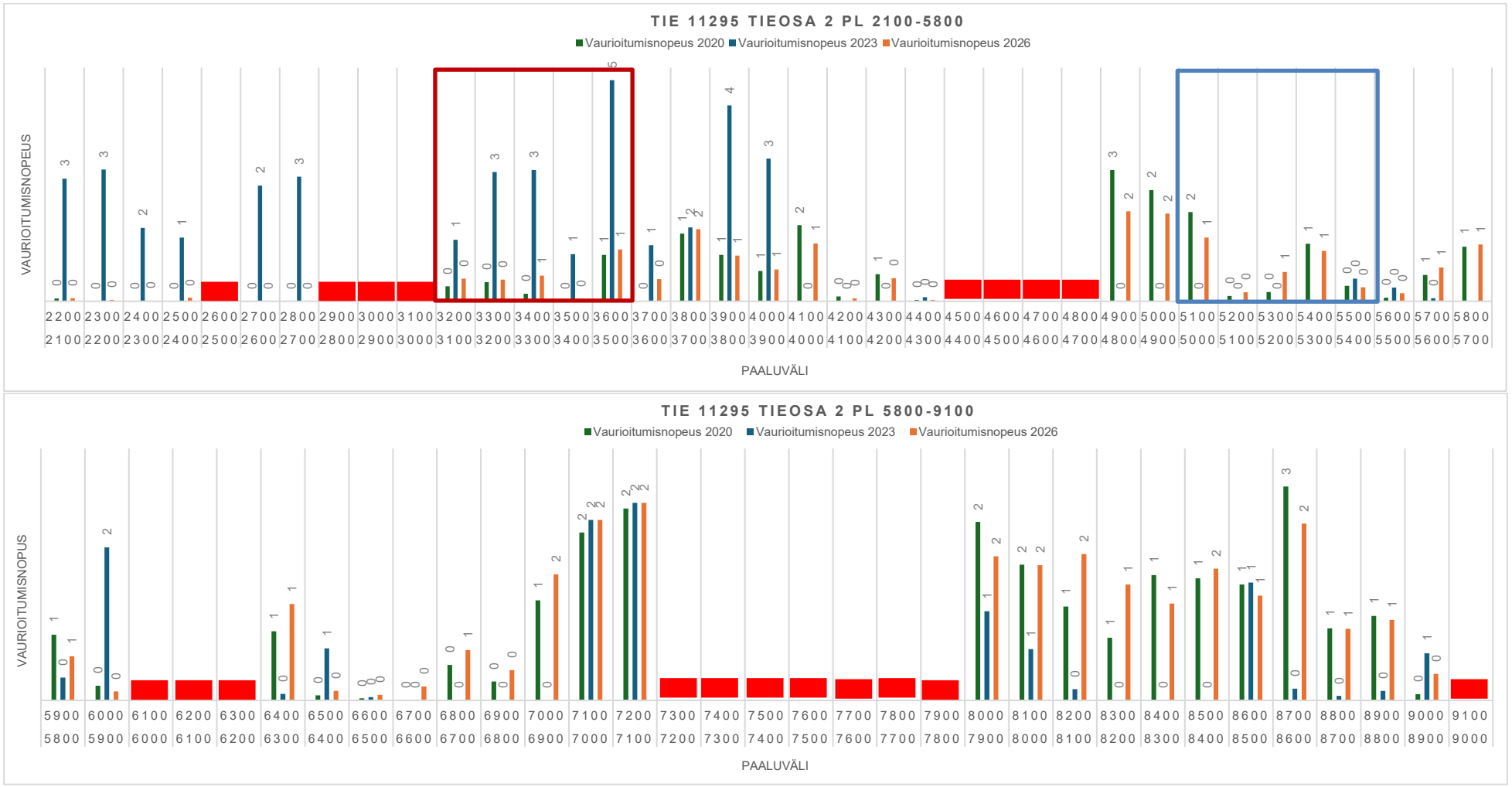
Kuva 37. Tien 11295 tieosan 1 vauriosummalaskennan tulokset. Punaisella rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostamatonta ja sinisellä rajattu kunnostettua ojaosuutta.



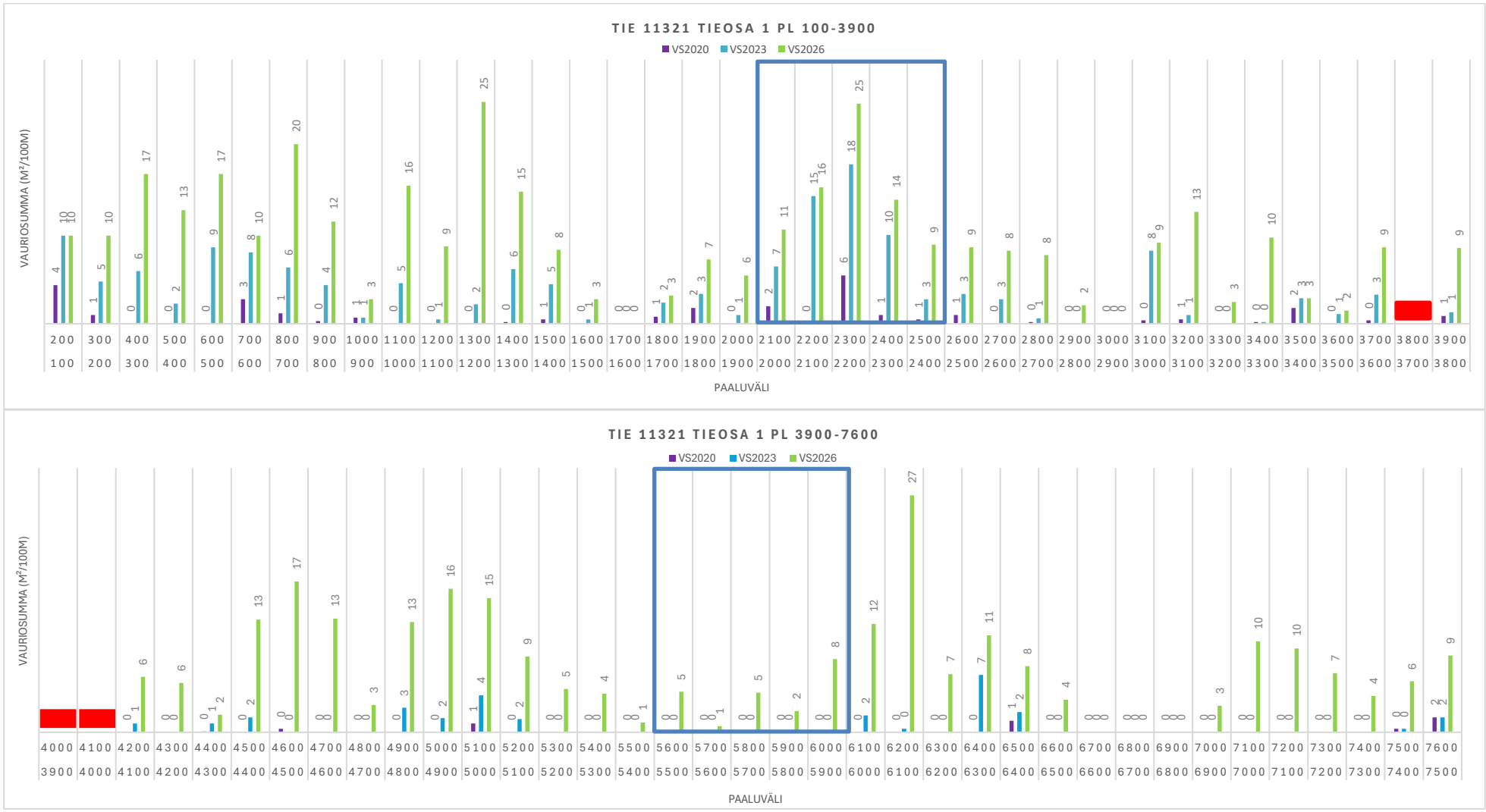
Kuva 38. Tien 11295 tieosan 1 vaurioitumisnopeuslaskennan tulokset. Punaisella rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostamatonta ja sinisellä rajattu kunnostettua ojaosuutta.



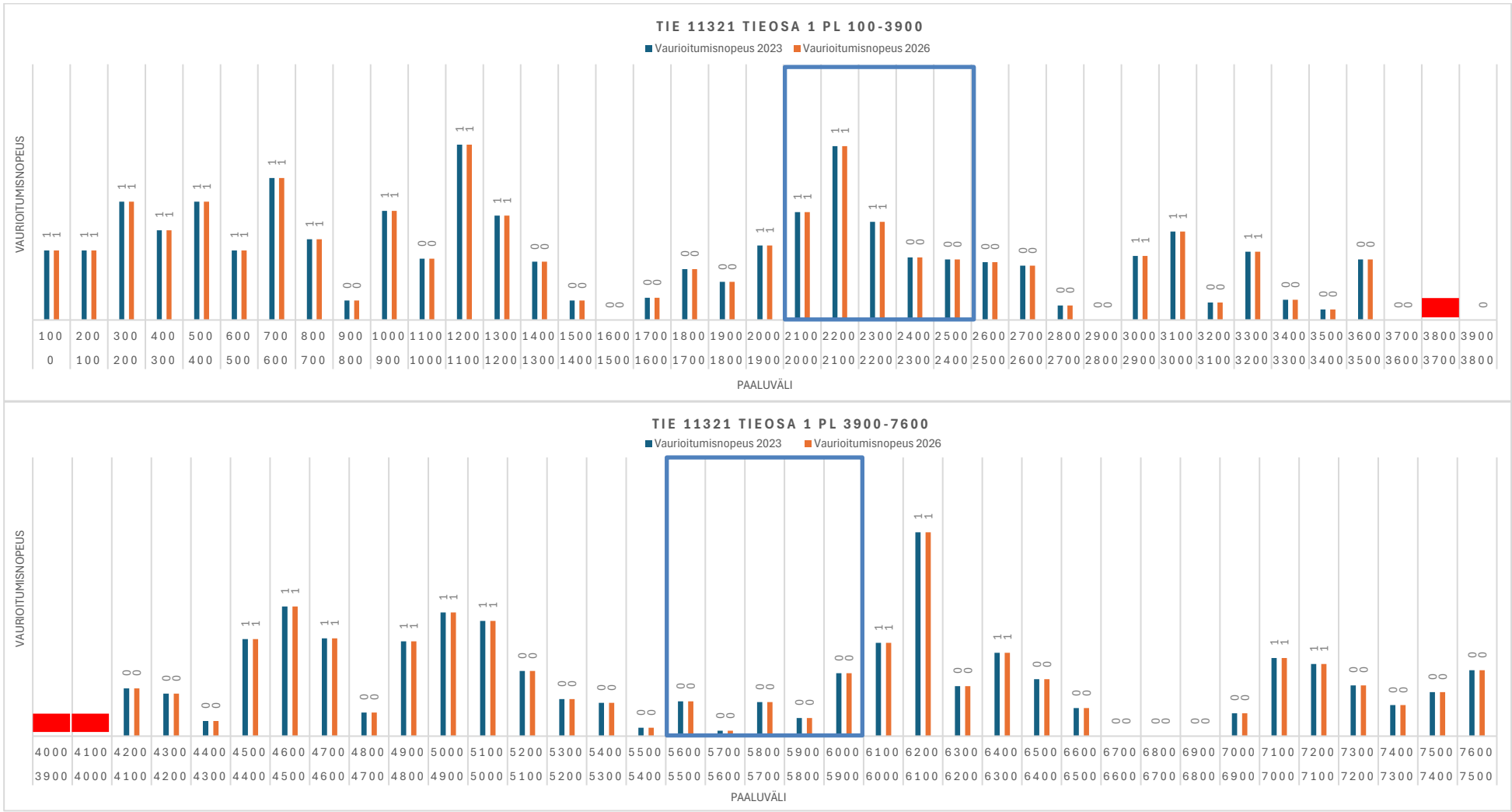
Kuva 39. Tien 11295 tieosan 2 vauriosummalaskennan tulokset. Punaisella rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostamatonta ja sinisellä rajattu kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 40. Tien 11295 tieosan 2 vaurioitumisnopeuslaskennan tulokset Punaisella rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostamatonta ja sinisellä rajattu kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 41. Tien 11321 tieosan 1 vauriosummalaskennan tulokset. Sinisellä rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostettuja ojaosuuksia.



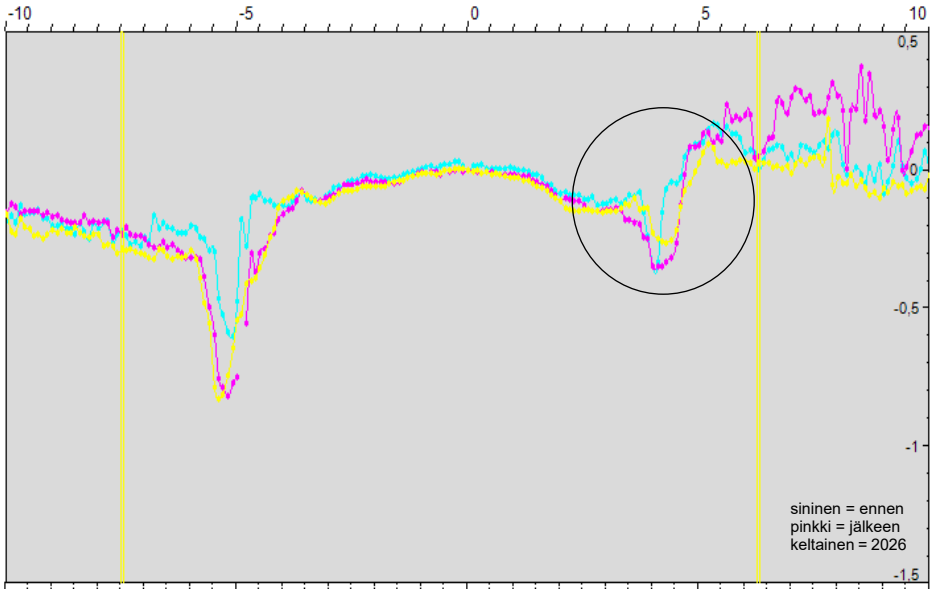
Kuva 42. Tien 11321 tieosan 1 vaurioitumisnopeuslaskennan tulokset. Sinisellä rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostettuja ojaosuuksia.

5.4 Muutokset sivuojien syvyydessä ja luiskissa

Ojasyvyyksien muutoksia tarkasteltaessa on tärkeää huomioida myös luiskien muutokset. Jyrkät luiskakaltevuudet lisäävät maa-aineksen valumisen ja kertymisen todennäköisyyttä ojan pohjalle. Toinen merkittävä ojien tukkeutumiseen vaikuttava tekijä on ojakasvillisuus. Kun ojien kunnostuksia suunniteltiin alun perin, tarkoituksena oli tosiaan sijoittaa ojan pohja 20–30 cm päällysrakenteen alapinnan alapuolelle, jotta ojissa olevan veden kulkeutuminen takaisin tierakenteeseen estyisi. Siksi tarkastellessa ojasyvyyksien muutoksia on tärkeää kiinnittää huomiota etenkin sellaisiin kohtiin, joissa toimenpiteen jälkeisen ojasyvyyden ja vuoden 2026 ojasyvyyden ero on suurempi kuin 20 cm.

Kuvassa 48 on esitetty tien 11295 suunnan 1 oikeanpuoleisen ojan syvyyden muutokset vuoden 2022 perusparannustoimenpiteen jälkeisen tilanteen ja vuoden 2026 välillä. Kuvassa 49 puolestaan on esitetty tien 11321 suunnan 1 eli oikeanpuoleisen ojan sekä suunnan 2 eli vasemmanpuoleisen ojan syvyyserot toimenpiteen jälkeisen tilanteen ja vuoden 2026 välillä. Kuvia tarkasteltaessa havaitaan useita mittauspisteitä, joissa ojan syvyysero on poikkeuksellisen suuri. Useimmissa tapauksissa poikkeamat johtuvat ojakasvillisuuden aiheuttamista häiriöistä laserkeilausaineistossa. Osa poikkeamista liittyy kuitenkin muihin tekijöihin. Esimerkiksi tien 11321 suunnan 1 paalulla 1525 ojan syvyyden muutos näyttää negatiiviselta. Kohdan tarkempi tarkastelu kuitenkin osoittaa, että mittauspiste sijaitsee välittömästi liittymän vieressä. Tässä kohdassa liittymä sijaitsee hieman päätietä korkeammalla, vaikka kuivatusratkaisujen kannalta liittyvän tien olisi edullista sijaita päätietä alempana.

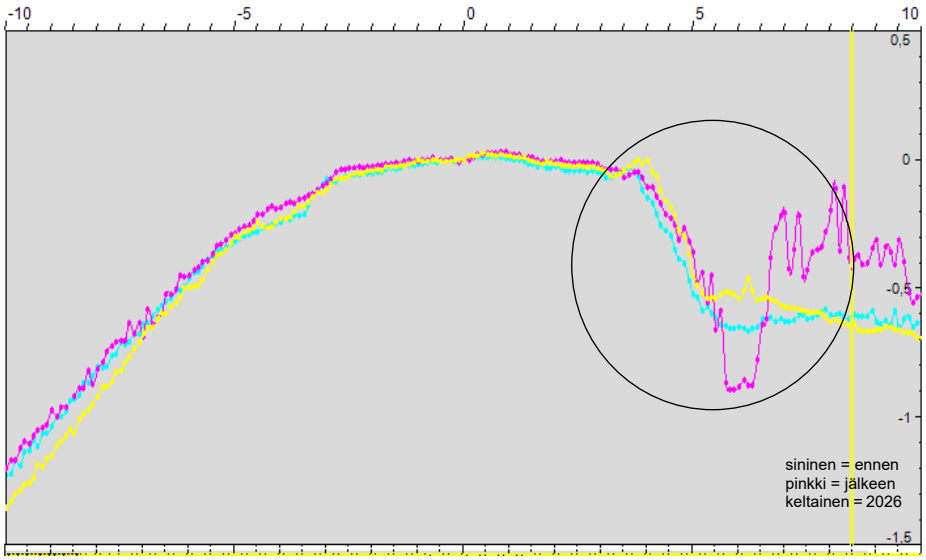
Tien 11295 tieosan suunnan 1 ojasyvyyserojen tarkastelussa havaitaan, että ojasyvyyden muutokset ovat olleet pääosin alle 10 cm (kuva 48). Tieosan alku- ja loppupäässä on kuitenkin mitattu kohtia, joissa ero ylittää 20 cm. Koska ojasyvyyden kasvu on näissä kohdissa merkittävää, on perusteltua tarkastella ojien syvyyksien ja luiskien muutoksia tarkemmin Road Doctor -ohjelmistossa. Kuvassa 43 esitetään Road Doctor -näkymä tien poikkileikkauksesta, johon on mallinnettu ojaprofiilit laserkeilausaineistosta muodostetuista pistepilvistä. Kuvassa sininen käyrä kuvaa alkuperäistä mitattua ojasyvyyttä, pinkki käyrä vuoden 2022 toimenpiteen jälkeistä ojasyvyyttä ja violetti käyrä vuoden 2026 ojasyvyyttä. Koska tarkasteltavana on suunta 1, tarkasteltava oja on oikeanpuoleinen oja.



Kuva 43. Tien 11295 suunnan 1 pl 246 ojanäkymä Road Doctor -ohjelmistossa. (Roadscanners 2026)

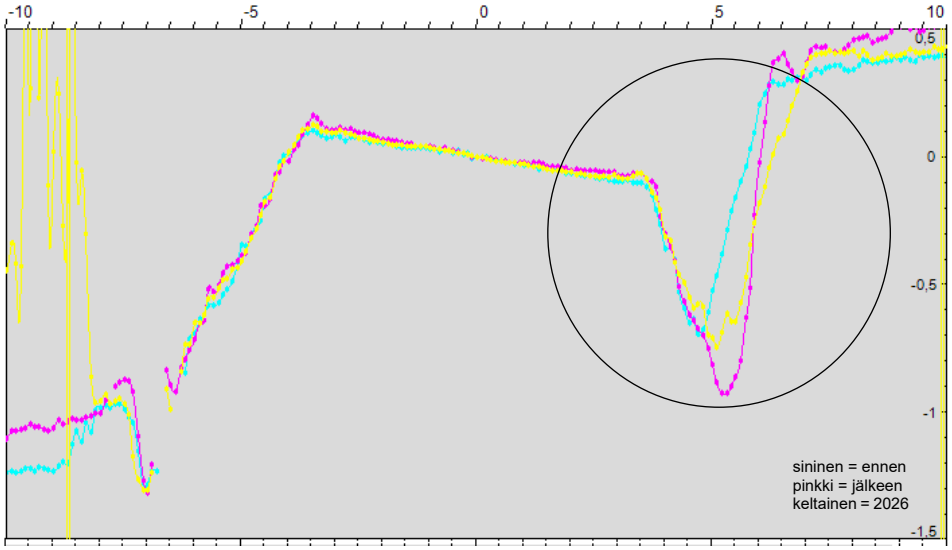
KUNDI-hankkeessa juuri ulkoluiskat jätettiin paikoin jyrkiksi, jotta kaivutyöt eivät olisi ulottuneet viereisille viljelymaille. Kuvan 43 kohta sijaitsee kahden pellon välissä ja, kuvassa peltojen aluerajat on merkitty kuvaan keltaisilla pystyviivoilla. Kuvasta nähdään, että oikeanpuoleisen ojan pohja on vuonna 2026 selvästi korkeammalla kuin heti toimenpiteen jälkeen. Samalla havaitaan muutoksia ulkoluiskassa, jonka yläosasta näyttää valuneen maa-ainesta ojaan. Pinkistä käyrästä voidaan todeta, että ulkoluiska on ollut toimenpiteen jälkeen varsin jyrkkä, mikä osaltaan selittää luiskan sortumista.

Tien 11295 tieosan 2 ojasyvyyden eroja tarkastellessa huomataan, että poikkeamakohtia on koko tieosan matkalta vaihtelevasti (kuva 48). Tarkastellessa paalun 8325 suurta poikkeamaa nähdään, että ainoastaan ulkoluiska on sortunut ajan kuluessa, vaikka sekä sisä- että ulkoluiska ovat olleet jyrkkiä toimenpiteen jälkeen (kuva 44). Lisäksi tarkasteltava kohta sijaitsee mäen alaosassa, mikä voi viitata siihen, että valumavedet kuljettavat maa-ainesta rinteen yläosista mäen juurelle. Tämän seurauksena maa-ainesta voi kertyä juuri kyseiseen kohtaan koko mäen pituudelta, mikä osaltaan selittää ojan pohjan madaltumista ja ojasyvyyden muutoksia.



Kuva 44. Tien 11295 suunnan 1 pl 8325 poikkileikkaus ja ojanäkymä Road Doctor -ohjelmistossa. (Roadscanners 2026)

Erityisen jyrkkä ja korkea ulkoluiska sijaitsee tien 11321 oikeanpuoleisessa ojassa paalulla 2035, minkä seurauksena luiska on sortunut (kuva 45). Kuvasta 45 nähdään, että vaikka ulkoluiskan vuoden 2026 profiili ei vielä vastaa toimenpidettä edeltänyttä tilannetta, ovat ojan syvyydet jo lähes palautuneet toimenpidettä edeltäneelle tasolle. Samasta kuvasta voidaan tarkastella myös vasemmanpuoleisen ojan ja sen luiskien muutoksia. Vasemman ojan pohja on säilynyt lähes ennallaan koko tarkastelujakson ajan, vaikka ulkoluiskan kohdalla on havaittavissa vähäisiä muutoksia. Tämä viittaa siihen, että luiskassa tapahtuneista muutoksista huolimatta ojan pohjan korkeusasema on pysynyt pääosin vakaana.



Kuva 45. Tien 11321 suunnan 1 pl 2035 ojanäkymä Road Doctor -ohjelmistossa. (Roadscanners 2026)

Tehdyn maastokäynnin yhteydessä havaittiin, että tien 11321 ojat ovat säilyttäneet muotonsa paremmin kuin tien 11295 ojat. Vaikka molempien teiden kunnostetuissa ojissa esiintyi ojakasvillisuutta, oli kasvillisuuden määrä selvästi suurempi tiellä 11295. Kuvassa 46 on noin paalun 5600 kohdalta otettu valokuva ojasta. Kuvan perusteella ojan profiili on säilynyt hyvin ennallaan, eikä ojan pohjalle ole kertynyt merkittävästi maa-ainesta. Kyseisessä kohdassa sisäluiska näyttäisi olevan ulkoluiskaa jyrkempi. Kohdan Road Doctor -ohjelmiston poikkileikkausnäkymää tarkasteltaessa havaitaan kuitenkin, että myös sisäluiska on säilynyt hyvin alkuperäisessä muodossaan.



Kuva 46. Tien 11321 pl 5600 oikeanpuoleinen oja. (Ilaf Rashid 5.6.2026)

Maastokäynnin yhteydessä tarkasteltiin myös tien 11321 rumpujen sijaintia ojissa sekä niiden liettymistä. Yhdessä tarkastelukohdassa rumpu sijaitsi noin 10 cm ojan pohjan yläpuolella (kuva 47). Rumpujen liettymisaste ei vaikuttanut korkealta, vaikka osa rummuista oli osittain kasvillisuuden peitossa.



Kuva 47. Eräs tien 11321 sivuojarumpu, joka sijaitsee suositeltua korkeammalla ojan pohjaan nähden. (Pauli Kolisoja 5.6.2026)



Kuva 48. Tien 11295 suunnan 1 ojasyvyyden muutokset parannustoimenpiteen jälkeisen ajankohdan ja vuoden 2026 välillä.



Kuva 49. Tien 11321 ojasyvyyden muutokset parannustoimenpiteen jälkeisen ajankohdan ja vuoden 2026 välillä.

5.5 Muutokset tierakenteen taipumaindekseissä

Teille 11295 ja 11321 on tehty TSD-mittauksia, joista voidaan laskea SCI_{200}-, SCI_{300} ja BCI-arvot. TSD-mittauksia on saatavilla vuosilta 2018 ja 2024. Tarkasteluissa keskitytään SCI_{200}-arvojen tarkasteluun SCI_{300}-arvojen sijaan. Tarkastelussa on päädytty käyttämään SCI_{200}-indeksin raja-arvojen osalta taulukkoa 9 ja BCI- ja D_0-indeksien raja-arvojen osalta taulukkoa 10. Koska pohjamaan laatua (tasa- vai sekalaatuinen) ei tunneta, taipumaindeksejä tarkastellaan 100 metrin jaksoissa, jotta pohjamaaolosuhteiden mahdollinen paikallinen vaihtelu voidaan huomioida mahdollisimman tarkasti. Sekalaatuisella pohjamaalla kantavuus voi vaihdella merkittävästi jo lyhyillä matkoilla, jolloin myös taipumaindeksiarvoissa voi esiintyä huomattavaa vaihtelua saman 100 metrin tarkastelujakson sisällä. Koska pohjamaan laatu vaikuttaa olennaisesti rakenteen kantavuuteen, heijastuvat pohjamaaolosuhteiden muutokset suoraan myös mitattuihin taipumaindeksiarvoihin.

Tien 11295 taipumaindeksien perusteella tien rakenteellisessa kunnossa ei ole havaittavissa yleistä paranemista vuosien 2018 ja 2024 välillä (kuvat 50–53). SCI_{200}-, SCI_{300}-, BCI- ja D_0-indeksien arvot kasvavat lähes kaikilla tarkastelujaksoilla, mikä viittaa rakenteen jäykkyyden heikkenemiseen. Vuosien 2018 ja 2024 välillä useimmat indeksit kasvavat sekä kunnostetuilla että kunnostamattomilla osuuksilla (taulukko 25).

Taulukko 25. Tien 11295 tarkastelujaksojen taipumaindeksien keskiarvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ojaosuuksia. Värikoodit: hyvä tai kohtalainen = turkoosi, ongelmallinen tai huono = sininen, erittäin huono = violetti.

SCI_{200} keskiarvot (µm)	*Tie 11295 tieosa 1 pl 700–1200*	*Tie 11295 tieosa 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 pl 5000–5500*
2018	pl 800–900: 283	pl 1400–1500: 245	pl 3100–3200: 296	pl 5000–5100: 261
	pl 900–1000: 399	pl 1500–1600: 424	pl 3200–3300: 315	pl 5200–5300: 303
	pl 1000–1100: 297	pl 1600–1700: 290	pl 3300–3400: 410	pl 5300–5400: 272
2024	pl 800–900: 381	pl 1400–1500: 264	pl 3100–3200: 308	pl 5000–5100: 288
	pl 900–1000: 401	pl 1500–1600: 469	pl 3200–3300: 328	pl 5200–5300: 284
	pl 1000–1100: 329	pl 1600–1700: 360	pl 3300–3400: 318	pl 5300–5400: 281
BCI keskiarvot (µm)	*Tie 11295 tieosa 1 pl 700–1200*	*Tie 11295 tieosa 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 pl 5000–5500*
2018	pl 800–900: 54,9	pl 1400–1500: 58,4	pl 3100–3200: 25,7	pl 5000–5100: 26,1
	pl 900–1000: 41,0	pl 1500–1600: 40,6	pl 3200–3300: 24,2	pl 5200–5300: 12,8
	pl 1000–1100: 27,8	pl 1600–1700: 51,1	pl 3300–3400: 17,8	pl 5300–5400: 19,2
2024	pl 800–900: 59,5	pl 1400–1500: 60,6	pl 3100–3200: 54,1	pl 5000–5100: 52,1
	pl 900–1000: 54,9	pl 1500–1600: 62,8	pl 3200–3300: 61,6	pl 5200–5300: 45,3
	pl 1000–1100: 50,0	pl 1600–1700: 76,9	pl 3300–3400: 60,8	pl 5300–5400: 47,0
D_0 keskiarvot (µm)	*Tie 11295 tieosa 1 pl 700–1200*	*Tie 11295 tieosa 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 pl 5000–5500*

2018	pl 800–900: 797	pl 1400–1500: 775	pl 3100–3200: 601	pl 5000–5100: 553
	pl 900–1000: x 949	pl 1500–1600: 1040	pl 3200–3300: 622	pl 5200–5300: 567
	pl 1000–1100: 669	pl 1600–1700: 816	pl 3300–3400: 731	pl 5300–5400: 529
2024	pl 800–900: 962	pl 1400–1500: 778	pl 3100–3200: 774	pl 5000–5100: 748
	pl 900–1000: 983	pl 1500–1600: 1231	pl 3200–3300: 840	pl 5200–5300: 731
	pl 1000–1100: 808	pl 1600–1700: 1033	pl 3300–3400: 825	pl 5300–5400: 729

Koska tarkastelujaksojen taipumaindeksien keskiarvoista ei voida havaita selkeää yhteyttä kunnostettujen ja kunnostamattomien ojaosuuksien välillä (taulukko 25), tarkastelua voidaan kohdistaa yksittäisiin poikkeamakohtiin, joissa taipumaindeksit ja urautumista kuvaavat tunnusluvut poikkeavat ympäristöstään tai ylittävät niille asetetut rajaarvot. Uramaksimien ja urautumisnopeuksien avulla voidaan tarkastella urautumisen kehittymistä. Taipumaindeksit SCI_{200} ja BCI toimivat urautumisen rakenteellisen luonteen indikaattoreina. SCI_{200} kuvaa erityisesti päällysteen ja kantavan kerroksen yläosan tilaa, kun taas BCI kuvaa syvempien rakennekerrosten ja pohjamaan käyttäytymistä. Näiden tunnuslukujen avulla voidaan arvioida, liittyykö urautuminen ensisijaisesti ylempien rakennekerrosten vai syvempien rakenneosien muodonmuutoksiin. Tien 11295 tieosan 1 poikkeamakohtien uramaksimien, urautumisnopeuksien sekä SCI_{200}- ja BCI-arvojen vertailu on esitetty taulukossa 26.

Taulukko 26. Tien 11295 tieosan 1 taipumaindeksien ja urautumisen poikkeamakohtien vertailu ennen ja jälkeen ojien parannusta. Punaisella rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostamatonta ojaosuutta.

	pl 1050	*pl 1060*	*pl 1550*	*pl 1560*
Uramaksimi 2018 (mm)	24,9	41	44,7	29,6
Uramaksimi 2024 (mm)	28,8	44,5	53	33,1
2018: SCI_{200} (µm)	283	259	519	334
2024: SCI_{200} (µm)	368	481	766	637
2018: BCI (µm)	20	30	41	43
2024: BCI (µm)	51	54	58	57
Urakasvunopeus 2018–2019 (mm/vuosi)	-	-	1,18	1,04
Urakasvunopeus 2023–2024 (mm/vuosi)	0,162	5,48	1,5	1,46

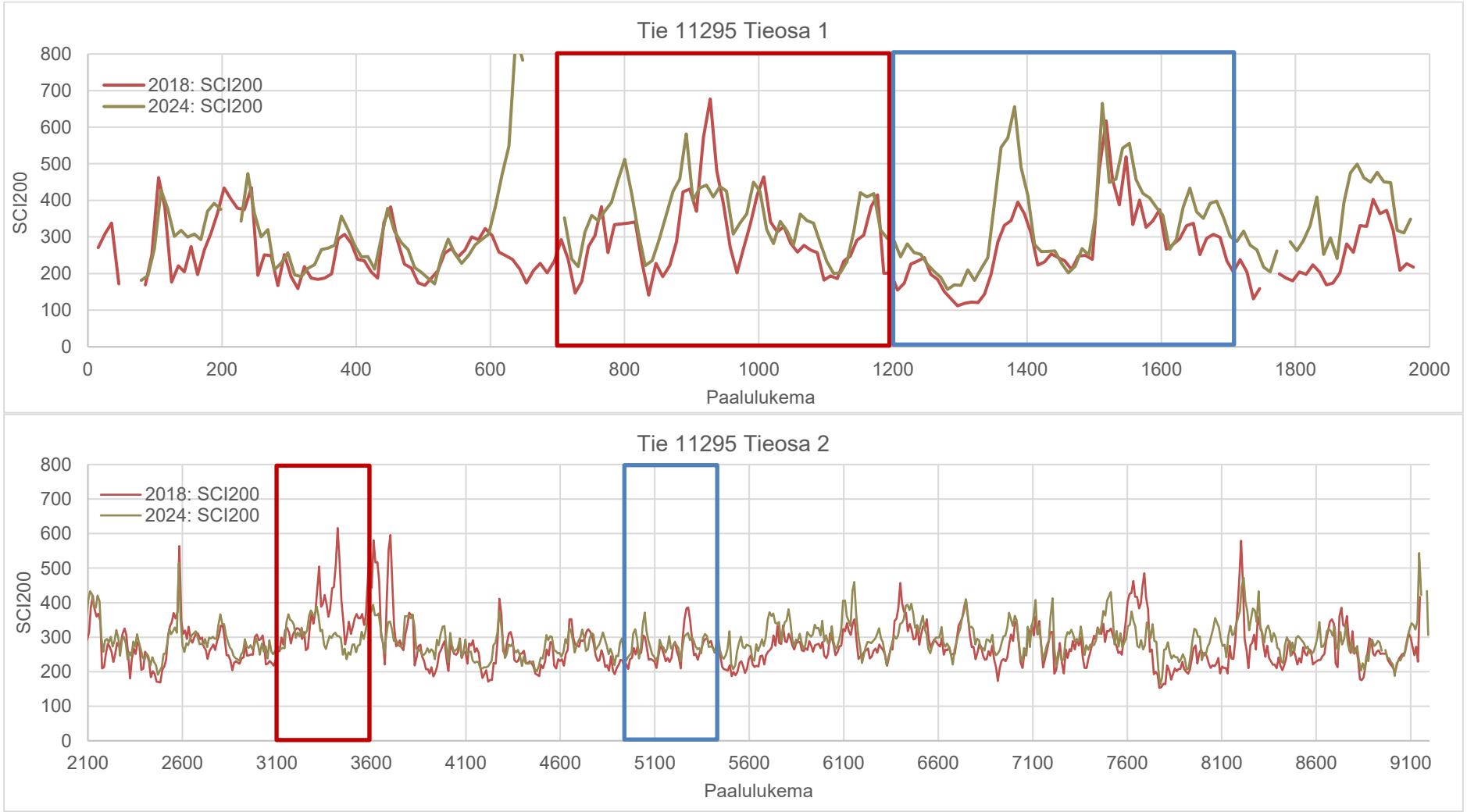
Taulukkoa 26 tarkasteltaessa havaitaan, että uramaksimiarvot ovat suuria ja ovat kasvaneet tarkasteluvuosien aikana. Vastaava kehitys näkyy myös urautumisnopeudessa paaluvälillä 1550–1560. Uramaksimin kasvun myötä myös tarkasteltujen taipumaindeksien arvot ovat kasvaneet. Lisäksi liitteen 3 kuvista 1–3 voidaan havaita, että erityisesti paaluvälillä 1550–1560 myös tierakenteen MDI-arvot ovat kasvaneet.

Vuoden 2018 mittausten aikaan tien 11321 päällystystyö oli vielä kesken. Tämän vuoksi kyseisen vuoden mittaustulokset edustavat tien alkupäässä tuoretta päällystettä ja loppupäässä vanhaa päällystettä. Tarkasteltaessa tien 11321 taipumaindeksituloksia (kuvat 54–57) havaitaan, että tuoreen päällysteen alueella taipumaindeksiarvot ovat poikkeuksellisen korkeita. Korkeat arvot eivät tässä tapauksessa viittaa tien heikkoon rakenteelliseen kuntoon, vaan johtuvat tuoreesta päällysteestä, minkä vuoksi mittaustulokset eivät vielä kuvaa rakenteen todellista käyttäytymistä luotettavasti.

Lisäksi rakenteen lopullinen kantavuus ei ollut vielä ehtinyt kehittyä, bitumistabilointi on uutena joustavaa, mikä näkyy mittaustuloksissa. Tämän vuoksi kohteella tehtiin vuonna 2019 PPL-mittaukset. PPL-mittauksissa mittauspisteitä on vähemmän verrattuna TSD-mittaukseen. Kuvista 54, 55 ja 56 havaitaan, että alhaisimmat taipumaindeksiarvot on mitattu vuonna 2024, jolloin päällyste on ollut käytössä jo useita vuosia. Sama ilmiö on havaittavissa myös taulukon 27 tuloksista. Koska vuosien 2018 ja 2019 mittaustulokset eivät tuoreen päällysteen vuoksi kuvaa kohteen todellista rakenteellista tilaa luotettavasti, vuoden 2024 tuloksia ei voida perustellusti verrata niihin. Näin ollen tien 11321 osalta taipumaindeksien muutoksista ei voida tehdä luotettavia johtopäätöksiä ojien kunnossapitotoimenpiteiden vaikutuksista ennen–jälkeen-tarkastelun perusteella.

Taulukko 27. Tien 11321 tarkastelujaksojen taipumaindeksien keskiarvot. Tarkastelujaksot edustavat kunnostettuja ojaosuuksia. Värikoodit: erittäin hyvä= vihreä, hyvä tai kohtalainen = turkoosi, ongelmallinen tai huono = sininen, erittäin huono = violetti.

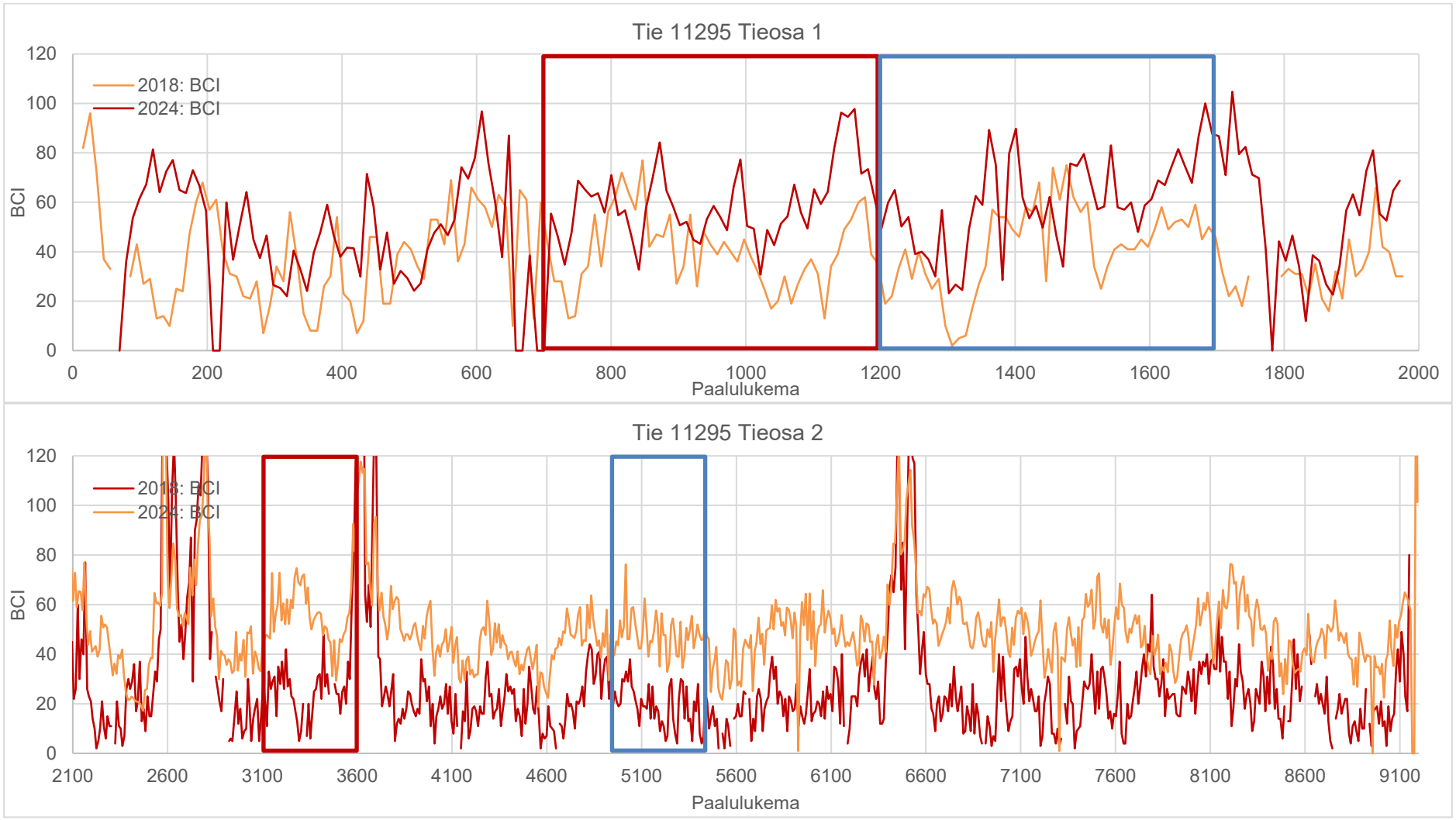
SCI_{200} keskiarvot (µm)	Tie 11321 tieosa 1 pl 2000–2500	Tie 11321 tieosa 1 pl 5500–6000
TSD: 2018	623	-
PPL: 2019	378	272
TSD: 2024	147	252
SCI_{300} keskiarvot (µm)	Tie 11321 tieosa 1 pl 2000–2500	Tie 11321 tieosa 1 pl 5500–6000
TSD: 2018	623	-
PPL: 2019	378	449
TSD: 2024	211	360
BCI keskiarvot (µm)	Tie 11321 tieosa 1 pl 2000–2500	Tie 11321 tieosa 1 pl 5500–6000
TSD: 2018	41,8	-
PPL: 2019	49,7	77,5
TSD: 2024	50,3	59,1
D_0 keskiarvot (µm)	Tie 11321 tieosa 1 pl 2000–2500	Tie 11321 tieosa 1 pl 5500–6000
TSD: 2018	1055	-
PPL: 2019	799	1037
TSD: 2024	551	811



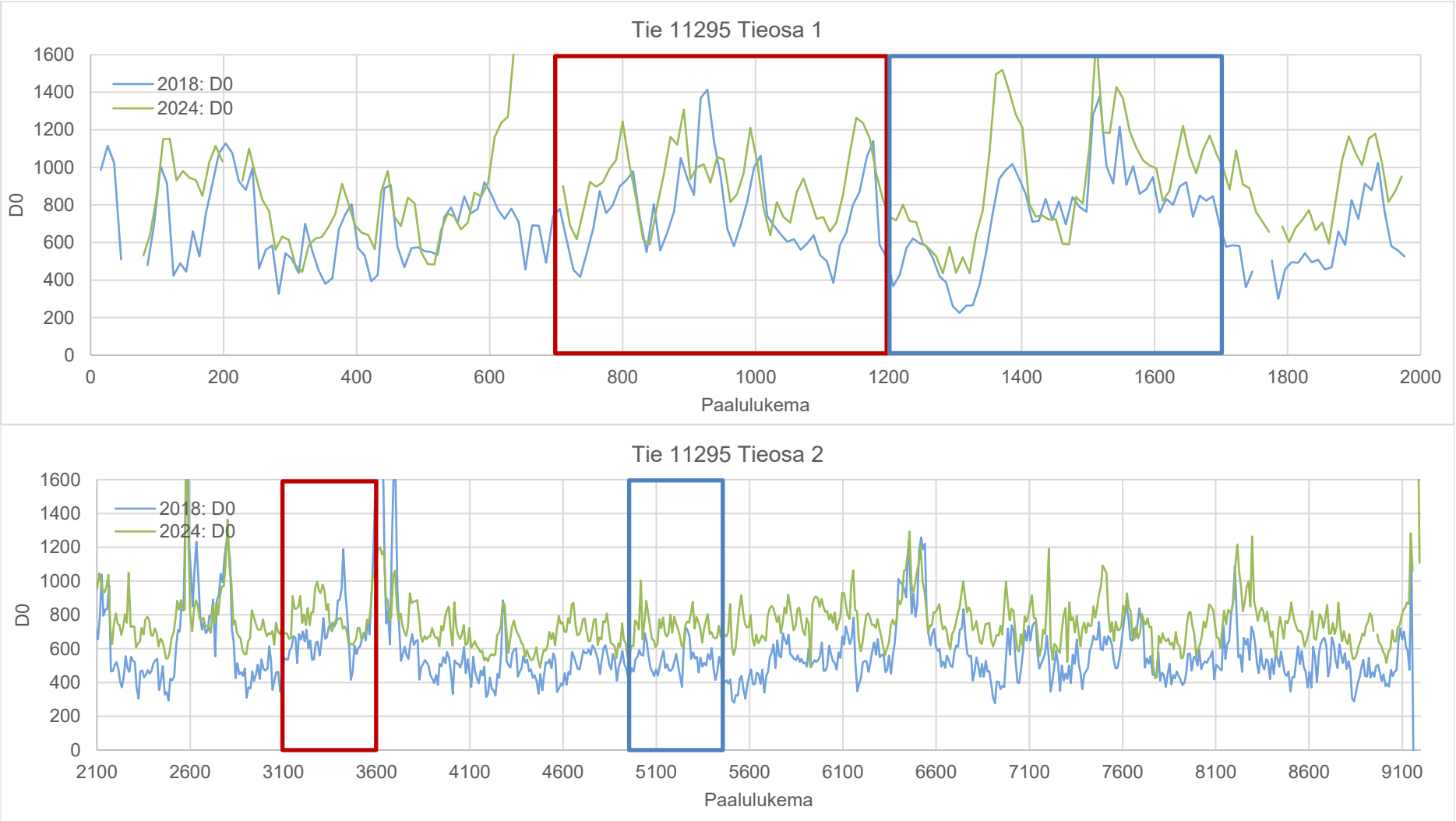
Kuva 50. Tien 11295 SCI_{200}-arvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ja sinisellä rajatut kunnostettuja ojaosuuksia.



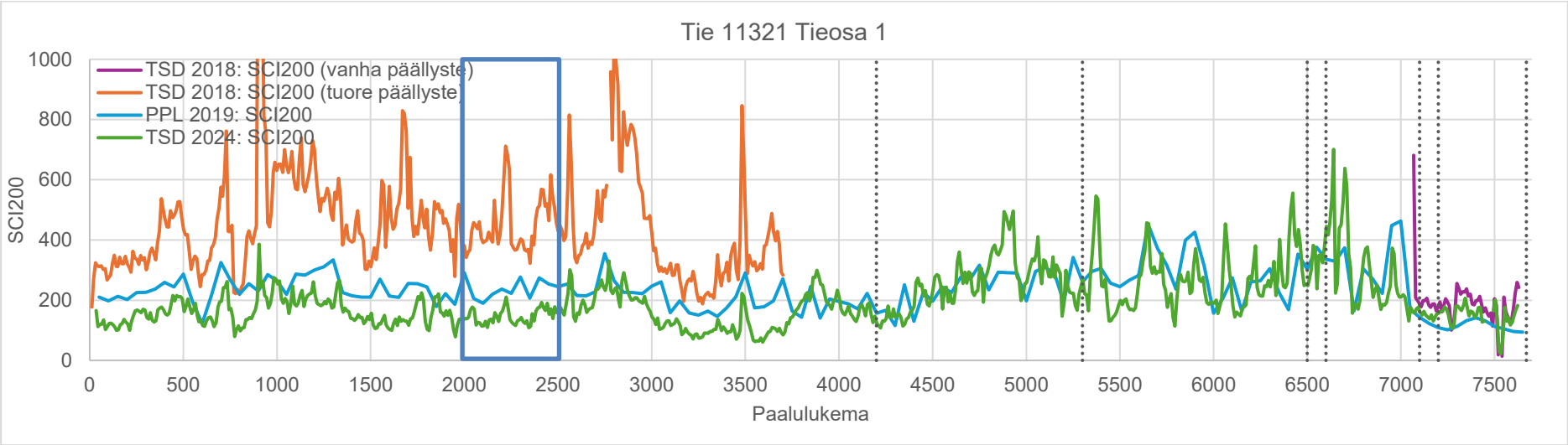
Kuva 51. Tien 11295 SCI_{300}-arvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ja sinisellä rajatut kunnostettuja ojaosuuksia.



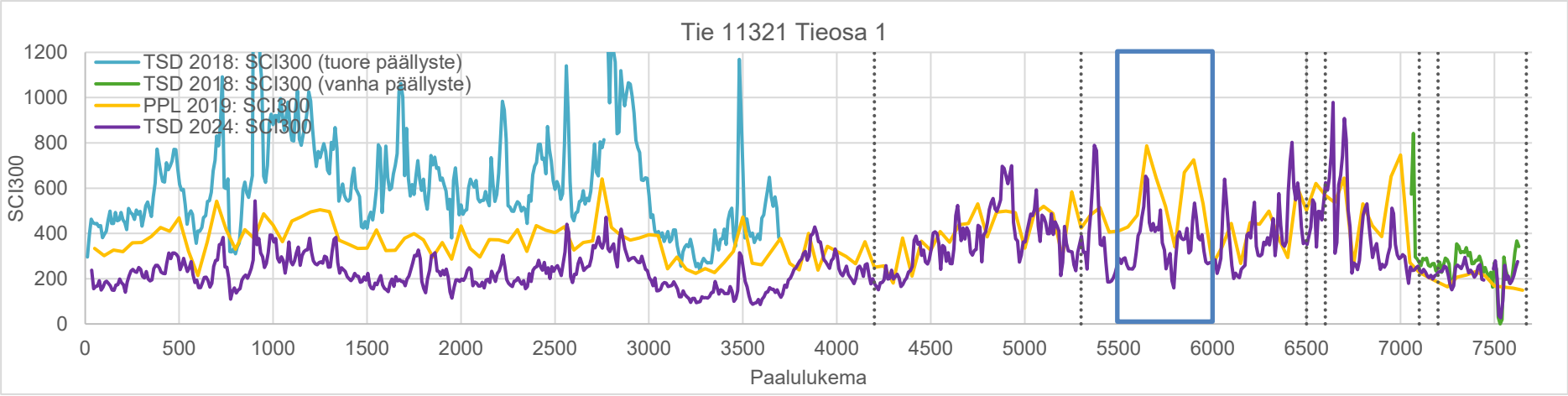
Kuva 52. Tien 11295 BCI-arvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ja sinisellä rajatut kunnostettuja ojaosuuksia.



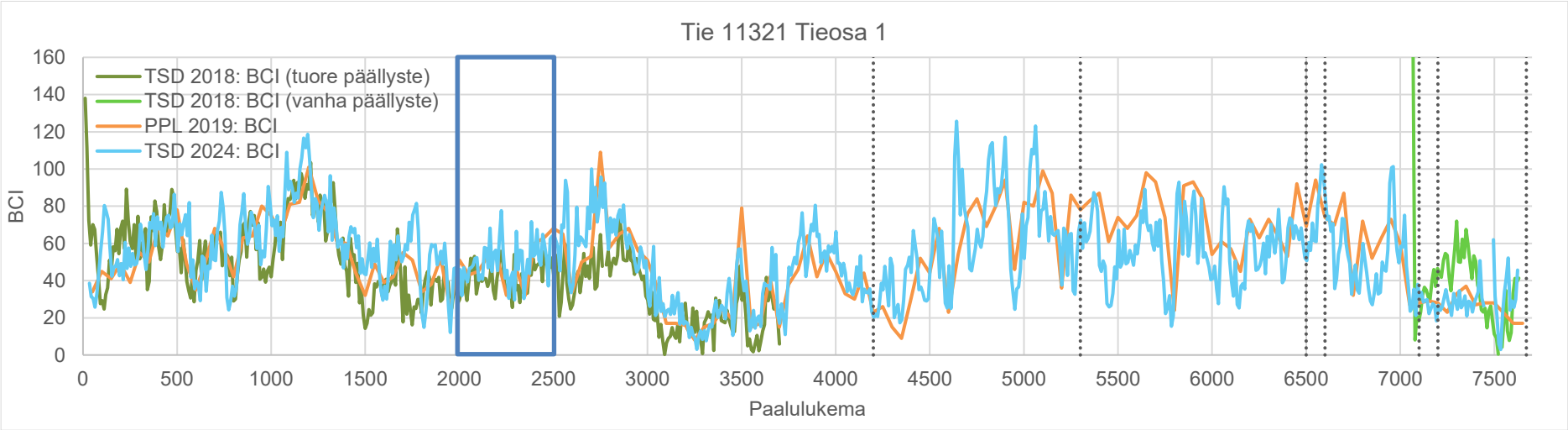
Kuva 53. Tien 11295 D_0-arvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ja sinisellä rajatut kunnostettuja ojaosuuksia.



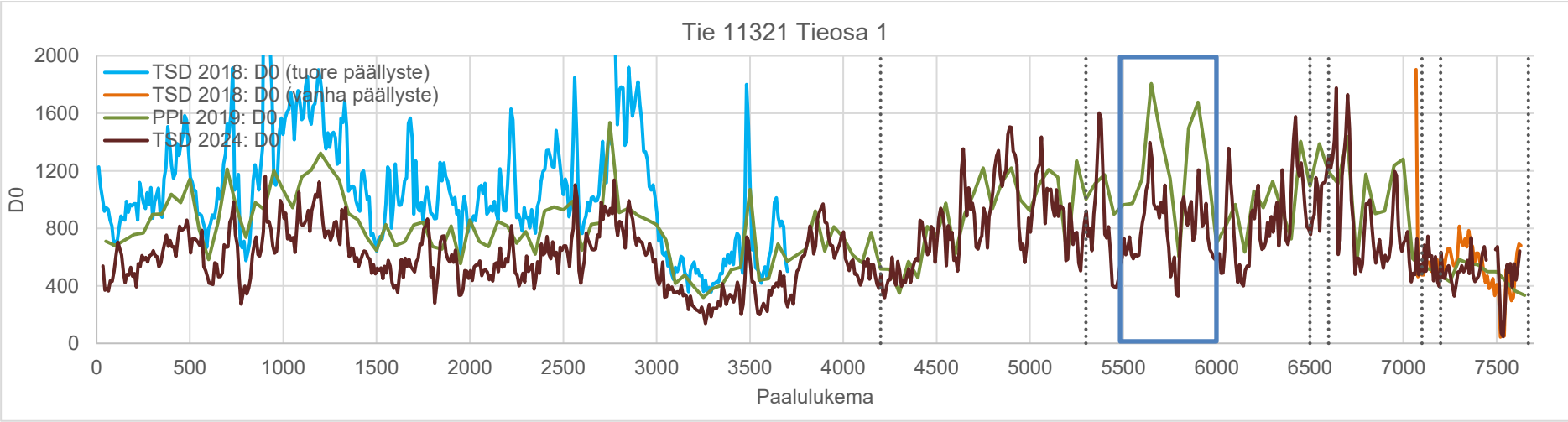
Kuva 54. Tien 11321 SCI_{200}-arvot. Sinisellä rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 55. Tien 11321 SCI_{300}-arvot. Sinisellä rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 56. Tien 11321 BCI-arvot. Sinisellä rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 57. Tien 11321 D_0-arvot. Sinisellä rajattu tarkastelujakso edustaa kunnostettua ojaosuutta.

5.6 Muutokset tierakenteen kosteustilassa

Tierakenteen kosteustilan muutoksia tarkastellaan kosteuslaskentatulosten ja MDI-arvojen perusteella. Analysoimalla kosteusnäkymiä Road Doctor -ohjelmistossa voidaan paikantaa tierakenteen kosteita kohtia, mutta eri vuosien kosteuslaskentojen vertailua ei voida tehdä, sillä mittauslaitteistot poikkeavat toisistaan. MDI-arvojen tulkinnassa on lisäksi huomioitava, että poikkeamakohdat voivat viitata korkeampaan kosteuspitoisuuteen, mutta tuloksiin vaikuttavat myös monet muut tekijät, kuten sääolosuhteet, sadanta, talviolosuhteet, lumen sulamisajankohta, mittausajankohta sekä käytetty antenni. Näin ollen mahdolliset muutokset MDI-arvoissa eivät yksiselitteisesti kuvaa kuivatusolosuhteiden muutoksia. Teiden 11295 ja 11321 MDI-kuvaajat on esitetty liitteen 3 kuvissa.

MDI-arvoille lasketaan keskiarvot 100 metrin tiejaksoilta. MDI-arvoja verrataan taulukossa 13 esitettyihin raja-arvoihin. Tarkasteltaessa tien 11295 tarkastelujaksojen MDI-keskiarvoja havaitaan, että tien ylä-, keski- ja alaosan MDI-arvot ovat suurimmilta osin pysyneet raja-arvojen sisällä lähes koko tarkastelujakson ajan (taulukko 28). Kuitenkin taulukosta nähdään, että MDI-arvot kasvavat jokaisessa rakenneosassa vuosi vuodelta.

Taulukko 28. Tien 11295 tarkastelujaksojen MDI-keskiarvot. Punaisella rajatut tarkastelujaksot edustavat kunnostamattomia ojaosuuksia. Värikoodit: lähes kuiva = turkoosi ja kostea = sininen.

MDI	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200*	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500*
2018: yläosa	pl 800–900: 16,7	pl 1400–1500: 12,7	pl 3100–3200: 7,25	pl 5000–5100: 11,2
	pl 900–1000: 19,1	pl 1500–1600: 16,5	pl 3200–3300: 10,6	pl 5200–5300: 16,0
	pl 1000–1100: 22,8	pl 1600–1700: 14,2	pl 3300–3400: 9,8	pl 5300–5400: 8,4
2022: yläosa	pl 800–900: 27,2	pl 1400–1500: 25,1	pl 3100–3200: 18,2	pl 5000–5100: 17,9
	pl 900–1000: 29,8	pl 1500–1600: 31,4	pl 3200–3300: 21,1	pl 5200–5300: 24,6
	pl 1000–1100: 35,0	pl 1600–1700: 31,8	pl 3300–3400: 17,5	pl 5300–5400: 16,8
2026: yläosa	pl 800–900: 44,3	pl 1400–1500: 34,3	pl 3100–3200: 19,2	pl 5000–5100: 23,1
	pl 900–1000: 35,5	pl 1500–1600: 39,5	pl 3200–3300: 26,7	pl 5200–5300: 40,1
	pl 1000–1100: 48,1	pl 1600–1700: 41,9	pl 3300–3400: 23,6	pl 5300–5400: 21,2
	Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500*
2018: keskiosa	pl 800–900: 23,0	pl 1400–1500: 15,1	pl 3100–3200: 18,9	pl 5000–5100: 17,6
	pl 900–1000: 23,1	pl 1500–1600: 24,9	pl 3200–3300: 14,9	pl 5200–5300: 18,8
	pl 1000–1100: 19,9	pl 1600–1700: 18,9	pl 3300–3400: 17,2	pl 5300–5400: 16,8
2022: keskiosa	pl 800–900: 36,1	pl 1400–1500: 42,6	pl 3100–3200: 23,1	pl 5000–5100: 29,2
	pl 900–1000: 32,9	pl 1500–1600: 33,5	pl 3200–3300: 26,2	pl 5200–5300: 29,6
	pl 1000–1100: 29,9	pl 1600–1700: 29,9	pl 3300–3400: 25,0	pl 5300–5400: 21,2
2026: keskiosa	pl 800–900: 50,8	pl 1400–1500: 59,4	pl 3100–3200: 46,8	pl 5000–5100: 45,8
	pl 900–1000: 55,2	pl 1500–1600: 46,5	pl 3200–3300: 40,5	pl 5200–5300: 46,1
	pl 1000–1100: 46,6	pl 1600–1700: 49,1	pl 3300–3400: 41,2	pl 5300–5400: 42,7
	Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 700–1200	*Tie 11295 tieosa 1 suunta 1 pl 1200–1700*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 3100–3600*	*Tie 11295 tieosa 2 suunta 1 pl 5000–5500*
2018: alaosa	pl 800–900: 17,8	pl 1400–1500: 20,9	pl 3100–3200: 16,4	pl 5000–5100: 18,1
	pl 900–1000: 19,1	pl 1500–1600: 12,9	pl 3200–3300: 21,4	pl 5200–5300: 29,8
	pl 1000–1100: 19,3	pl 1600–1700: 27,7	pl 3300–3400: 20,5	pl 5300–5400: 25,7
2022: alaosa	pl 800–900: 33,7	pl 1400–1500: 24,7	pl 3100–3200: 27,6	pl 5000–5100: 35,1
	pl 900–1000: 29,8	pl 1500–1600: 45,9	pl 3200–3300: 32,1	pl 5200–5300: 48,2
	pl 1000–1100: 34,8	pl 1600–1700: 43,0	pl 3300–3400: 36,6	pl 5300–5400: 41,5
2026: alaosa	pl 800–900: 41,6	pl 1400–1500: 28,1	pl 3100–3200: 37,8	pl 5000–5100: 50,5
	pl 900–1000: 39,9	pl 1500–1600: 59,8	pl 3200–3300: 50,5	pl 5200–5300: 63,1
	pl 1000–1100: 39,0	pl 1600–1700: 69,5	pl 3300–3400: 50,6	pl 5300–5400: 69,4

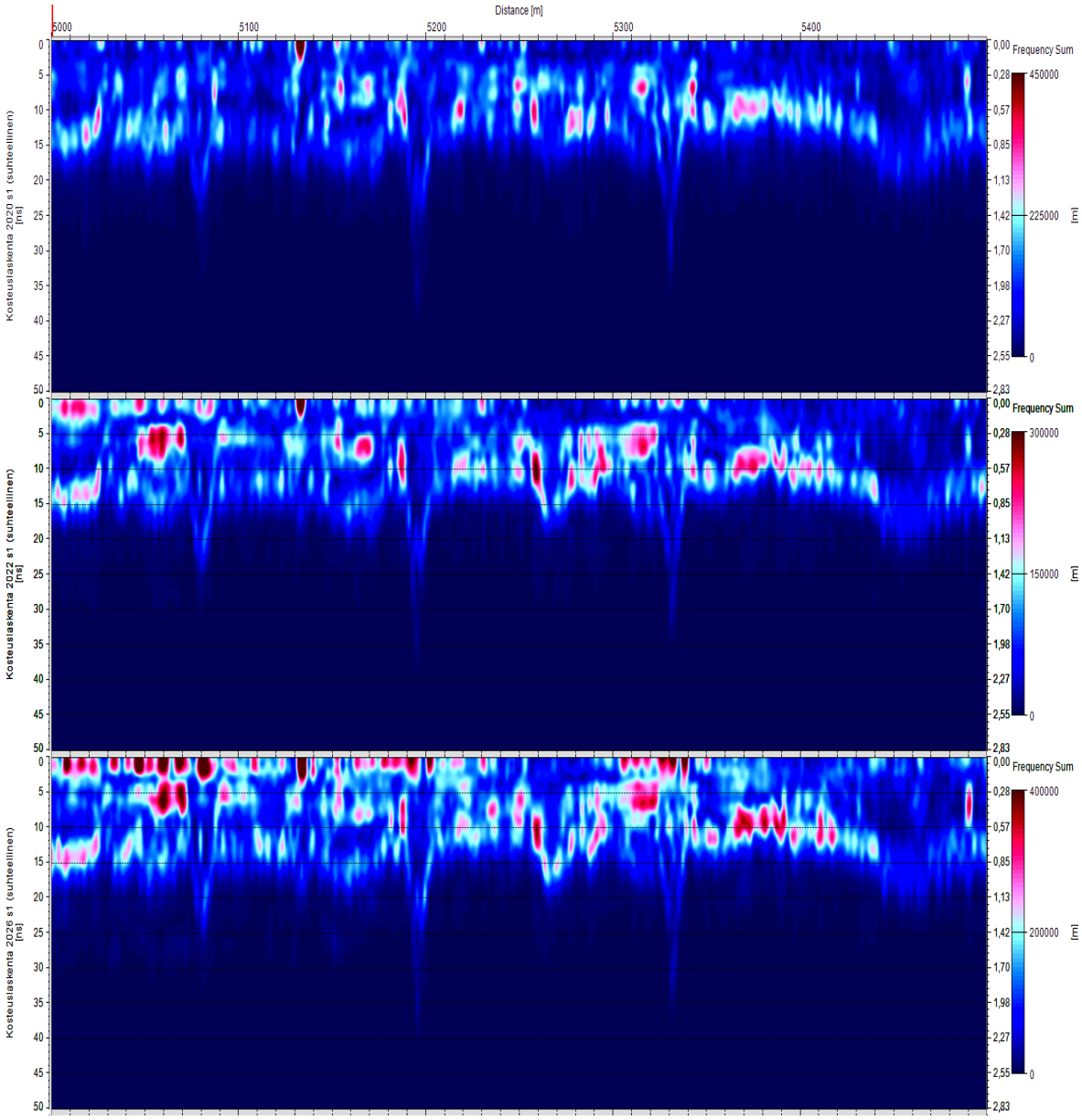
Ojien pohjien syventämisen voidaan olettaa vaikuttavan ensisijaisesti päällysrakenteen alaosan kosteuteen. Rakenteen eri osia tarkasteltaessa havaitaan, että kostein osa on johdonmukaisesti tierakenteen alaosa, jota seuraa keskiosa ja kuivimpana yläosa. Tämä johtuu sidotun kerroksen vettä heikosti läpäisevästä pinnasta, joka rajoittaa kosteuden siirtymistä ylempiin rakennekerroksiin. Vastaavasti ojien vedenpinnan noustessa kosteutta voi imeytyä esimerkiksi päällysrakenteen alaosaan.

Tämän vuoksi rakenteen alaosan MDI-arvojen tarkastelun yhteydessä tulee arvioida myös ojien syvyyksiä. Erityisesti on varmistettava, toteutuuko vaatimus, jonka mukaan ojan pohjan tulee sijaita 20–30 cm päällysrakenteen alapinnan alapuolella. Mikäli vaatimus täyttyy, on lisäksi tarpeen tarkastella ojasyvyyden muutoksia ennen ja jälkeen toimenpiteen.

Tien 11295 paaluvälillä 5000–5500 vuoden 2026 alaosan MDI-keskiarvo on taulukon 28 perusteella luokiteltu kosteaksi. Kohdan tarkempaa arviointia varten tarkastellaan kuvissa 31 ja 48 esitettyjä ojasyvyyksien muutoksia sekä Road Doctor -näkymiä. Näkymistä nähdään, että tarkastelujaksolla sijaitsee liittymä ja liittymärumpu paalulla 5120 sekä maantierumpu paalulla 5330. Kuvan 31 perusteella ojien syvyydet on suunniteltu suurimmalla osalla tarkastelujaksoa siten, että 20–30 cm vaatimus täyttyy. Laadunvarmistusmittaukset osoittavat kuitenkin, että toteutunut ojan pohja on paikoin jäänyt suunniteltua tasoa ylemmäksi. Lisäksi kuvasta 48 nähdään, että tarkastelujaksolla tapahtuneet ojasyvyyden muutokset ovat tien 11295 tieosan 1 suunnassa 1 poikkeuksellisen suuria juuri paaluvälillä 5000–5500.

Tarkastelujakso sijaitsee pääosin peltoalueella, jossa ojien ulkoluiskat ovat paikoin jääneet jyrkiksi kiinteistörajojen asettamien rajoitteiden vuoksi. Kuten aikaisemmin todettiin, näissä kohdissa on havaittu myös luiskien sortumia. Suunniteltujen ja toteutuneiden ojasyvyyksien väliset erot johtuvat osittain rummuista ja liittymistä. Kuten KUNDI-hankkeessa havaittiin, kaivinkoneen kuljettaja joutui juuri rumpujen kohdalla mukauttamaan toteutusta maasto-olosuhteiden mukaan.

Yhdessä nämä tekijät selittävät paaluvälillä 5000–5500 päällysrakenteen alaosassa havaitun kohonneen kosteuden. Kuvasta 58 nähdään, että kosteimmat kohdat sijoittuvat pääosin liittymien ja rumpujen läheisyyteen, mikä viittaa siihen, että rumpujen ja liittymien aiheuttamat paikalliset kuivatusongelmat voivat olla merkittävä tekijä alueella havaittujen korkeiden MDI-arvojen taustalla. Lisäksi tarkastellessa kuvaa 35 havaitaan, että IRI-arvojen poikkeamakohdat sijoittuvat nimenomaan rumpujen kohdalla, mikä puolestaan viittaa siihen, että kosteuden lisääntyminen tierakenteessa lisää tien pituussuuntaista epätasaisuutta.



Kuva 58. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 paaluvälin 5000–5500 suhteelliset kosteuslaskennat Road Doctor -näkymässä. (Roadscanners 2026)

Tarkasteltaessa tien 11321 tarkastelualueiden MDI-arvoja (taulukko 29) havaitaan, että rakenteen alaosan MDI-arvot viittaavat paaluvälillä 2000–2500 kosteaan tai vedellä kyllästyneeseen rakenteeseen. Korkeiden MDI-arvojen taustalla olevia syitä voidaan arvioida tarkastelemalla jälleen ojasyvyyksiä sekä päällysrakenteen alapinnan sijaintia (kuva 32). Paaluvälillä 2000–2500 ojien suunniteltu syvyys vastaa hyvin toteutunutta tilannetta. Lisäksi kuvasta 48 nähdään, että ojasyvyyksien muutokset toimenpiteen jälkeisen tilan teen ja vuoden 2026 välillä ovat vähäisiä muutamia yksittäisiä kohtia lukuun ottamatta.

Taulukko 29. Tien 11321 tarkastelujaksojen MDI-keskiarvot. Värikoodit: lähes kuiva = turkoosi, kostea = sininen ja kyllästynyt tai lähes kyllästynyt = violetti.

MDI	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 1 pl 2000–2500*	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 2 pl 5500–6000*
2020: yläosa	pl 2000–2100: 22,4	pl 5500–5600: 23,5
	pl 2100–2200: 25,0	pl 5600–5700: 20,0
	pl 2200–2300: 23,6	pl 5700–5800: 36,8
2022: yläosa	pl 2000–2100: 18,0	pl 5500–5600: 13,4
	pl 2100–2200: 14,0	pl 5600–5700: 13,8
	pl 2200–2300: 14,1	pl 5700–5800: 23,5
2023: yläosa	pl 2000–2100: 39,6	pl 5500–5600: 28,6
	pl 2100–2200: 33,2	pl 5600–5700: 40,5
	pl 2200–2300: 34,8	pl 5700–5800: 54,7
2026: yläosa	pl 2000–2100: 30,9	pl 5500–5600: 24,9
	pl 2100–2200: 33,4	pl 5600–5700: 22,2
	pl 2200–2300: 26,9	pl 5700–5800: 37,4
	Tie 11321 tieosa 1 suunta 1 pl 2000–2500	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 2 pl 5500–6000*
2020: keskiosa	pl 2000–2100: 47,0	pl 5500–5600: 25,1
	pl 2100–2200: 45,1	pl 5600–5700: 51,3
	pl 2200–2300: 38,9	pl 5700–5800: 54,1
2022: keskiosa	pl 2000–2100: 29,6	pl 5500–5600: 22,4
	pl 2100–2200: 33,9	pl 5600–5700: 42,3
	pl 2200–2300: 30,6	pl 5700–5800: 42,7
2023: keskiosa	pl 2000–2100: 57,0	pl 5500–5600: 47,3
	pl 2100–2200: 67,6	pl 5600–5700: 72,5
	pl 2200–2300: 55,1	pl 5700–5800: 66,5
2026: keskiosa	pl 2000–2100: 48,8	pl 5500–5600: 32,0
	pl 2100–2200: 53,0	pl 5600–5700: 65,4
	pl 2200–2300: 38,0	pl 5700–5800: 58,5
	Tie 11321 tieosa 1 suunta 1 pl 2000–2500	*Tie 11321 tieosa 1 suunta 2 pl 5500–6000*
2020: alaosa	pl 2000–2100: 54,0	pl 5500–5600: 137,2
	pl 2100–2200: 51,6	pl 5600–5700: 28,1
	pl 2200–2300: 67,7	pl 5700–5800: 26,3
2022: alaosa	pl 2000–2100: 49,1	pl 5500–5600: 100,1
	pl 2100–2200: 37,5	pl 5600–5700: 24,2
	pl 2200–2300: 59,5	pl 5700–5800: 22,6
2023: alaosa	pl 2000–2100: 66,0	pl 5500–5600: 142,6
	pl 2100–2200: 56,5	pl 5600–5700: 27,4
	pl 2200–2300: 94,9	pl 5700–5800: 27,8
2026: alaosa	pl 2000–2100: 73,7	pl 5500–5600: 126,6
	pl 2100–2200: 48,9	pl 5600–5700: 49,4
	pl 2200–2300: 91,7	pl 5700–5800: 30,6

Pelkästään ojien syvyyksien perusteella tarkastelujakson korkeita MDI-arvoja ei voida selittää. Kuvasta 32 havaitaan kuitenkin, että päällysrakenteen alapinta sijaitsee tarkastelujaksolla pääosin ojan pohjan yläpuolella kaikkina tarkasteluhetkinä, myös suunnitelmissa. Tämä voi osaltaan selittää rakenteen alaosassa havaittuja korkeita MDI-arvoja, sillä alempana sijaitseva rakenne on alttiimpi kosteuden kertymiselle. Rakenteen geometrialla näyttäisi siten olevan merkittävä vaikutus tarkastelujakson kosteustilaan. Tien 11321 rakenteen keskiosan MDI-arvojen tarkastelu osoittaa, että kosteustaso on laskenut vuosien 2023 ja 2026 välillä (taulukko 29). Tämä voi viitata siihen, että toteutetuilla ojien kunnossapitotoimenpiteillä on ollut myönteinen vaikutus rakenteen kuivumiseen. Vaikutus näyttäisi kuitenkin kohdistuneen selvemmin rakenteen keskiosaan kuin alaosaan. Tarkastelujaksolla sijaitsee yksi rumpu paalulla 2250 sekä yksi liittymä paalulla 2350, minkä vuoksi niiden läheisyydessä havaittuja kosteita kohtia tulee tarkastella yhdessä kuivatusrakenteiden toimivuuden kanssa.

Kuvasta 33 nähdään, että tien 11321 suunnan 2 paaluvälillä 5500–6000 ojan pohja sijaitsee selvästi päällysrakenteen alapinnan alapuolella. Lisäksi kuvasta 49 havaitaan, että ojanpohjien syvyydet ovat säilyneet pääosin ennallaan toimenpiteen jälkeisen tilanteen ja vuoden 2026 välillä. Tarkastelujakson Road Doctor -näkymästä nähdään, että paalulla 5780 sijaitsee liittymä ja rumpu.

Kuvaa 33 tarkasteltaessa havaitaan kuitenkin, että toteutunut ojasyvyys on jäänyt koko tarkastelujaksolla suunniteltua ojasyvyyttä pienemmäksi. Vaikka alkuperäisen tilanteen ja toteuman välillä ei ole suurta eroa, toteuma ei täysin vastaa suunnitelmaa. Tämä voi osaltaan heikentää kuivatusjärjestelmän toimivuutta tarkastelujaksolla.

Taulukon 29 alaosan MDI-arvoja tarkasteltaessa havaitaan, että rakenteen kosteustilanne on vuosina 2023 ja 2026 pysynyt samalla tasolla. Rakenteen alaosan MDI-arvot viittaavat siihen, että rakenne on edelleen kostea tai paikoin jopa vedellä kyllästynyt. Keskiosassa havaitaan kuitenkin paaluvälin 2000–2500 tavoin kosteuden vähentyneen vuosien 2023 ja 2026 välillä. Tämä voi viitata siihen, että ojien kunnossapitotoimenpiteet ovat parantaneet rakenteen kuivumista ainakin rakenteen ylemmissä osissa, vaikka vaikutus ei näy yhtä selvästi alaosassa.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Tulosten yhteenveto

Kuivatuspuutteiden vaikutukset tierakenteeseen

Tutkimustulosten perusteella kuivatuspuutteet näkyvät ennen kaikkea tierakenteen kohonneena kosteutena, päällystevaurioiden lisääntymisenä sekä urautumisen ja epätasaisuuksien kasvuna. MDI-tarkastelut osoittivat, että erityisesti päällysrakenteen alaosan kosteus korostuu kohdissa, joissa ojan pohja sijaitsee lähellä päällysrakenteen alapintaa, jossa ojan pohja ei ole 20–30 cm tierakenteen alapinnan syvemmällä, tai joissa veden virtaaminen on estynyt esimerkiksi rumpujen virheellisen korkeusaseman vuoksi.

Tien 11295 tarkastelujaksoilla havaittiin erittäin korkeita homogeenisuuskertoimia, jotka viittaavat vakavasti vaurioituneeseen päällysteeseen. Sama ilmiö näkyy myös vaurioosummalaskennan tuloksista. Korkeat SCI_{200}-arvot sijaitsivat osittain vakavien päällystevaurioiden, kuten leveiden pituushalkeamien kohdalla. Halkeamien kautta vettä pääsee imeytymään rakenteeseen, mikä kasvattaa päällysrakenteen yläosan kosteutta ja heikentää sen rakenteellista toimintaa.

SCI_{200}-arvon ja suurempien uramaksimiarvojen välillä havaittiin jonkinlainen yhteys. SCI_{200} kuvaa kuormituksen jakautumista päällysteeseen ja kantavaan kerrokseen, minkä vuoksi korkeat arvot viittaavat rakenteellisiin ongelmiin päällysrakenteen yläosissa. BCI-arvojen havaittiin puolestaan olevan korkeita erityisesti kohdissa, joissa myös päällysrakenteen alaosan MDI-arvot olivat suuria. Tämä viittaa siihen, että korkea kosteus heikentää alempien rakennekerrosten ja pohjamaan kantavuutta sekä lisää tyypin 2 urautumisen riskiä.

Pohjamaan maalajilla havaittiin olevan vaikutusta erityisesti BCI-arvoihin. Korkeimmat arvot sijaitsivat pääasiassa savi- ja silttialueilla. Hienorakeisissa korkean vesipitoisuuden omaavissa maalajeissa riski huokosvedenpaineen kasvulle kuormituksen aikana kasvaa, jolloin materiaalin kyky vastustaa pysyviä muodonmuutoksia heikkenee.

Kuivatuksen kunnossapidon vaikutus tierakenteen kuntoon

Tutkimustulokset osoittavat, että kuivatuksen kunnossapidolla on ollut myönteinen vaikutus tarkasteltujen tieosuuksien kuntokehitykseen. Selkeimmät vaikutukset havaittiin

teiden 11321 ja 11295 urakasvunopeuksissa, jotka pienenivät kuivatusparannusten jälkeen. Urakasvunopeus osoittautui tulosten perusteella tunnusluvuksi, joka kuvaa parhaiten kunnostettujen ojien vaikutusta tien kuntotilaan.

Lisäksi tiellä 11295 kuivatusparannusten vaikutukset näkyivät päällystevaurioiden kehityksen hidastumisena. Vuosien 2020 ja 2023 välillä vauriosummien kasvu oli voimakasta, kun taas vuosien 2023 ja 2026 välillä kasvu jäi huomattavasti pienemmäksi ja paikoin lähes olemattomaksi. Tämän perusteella kuivatusparannusten voidaan arvioida hidastavan päällystevaurioiden kehittymistä.

Toimivan kuivatuksen vaikutus tien kuntotilaan

Tutkimuksen perusteella toimiva kuivatus on tärkeä tekijä tien rakenteellisen kunnon säilymisessä. Kuivatusparannukset hidastivat päällystevaurioiden kehittymistä, vähensivät urautumisen kasvunopeutta sekä tasoittivat kuntomuutosten kehitystä. Tulokset osoittavat, että tehokas kuivatus vähentää tierakenteen kosteutta, mikä puolestaan hidastaa päällysteen vaurioitumista.

Kuivatuksen kunnossapidon hyötyjen saavuttaminen edellyttää kuitenkin koko kuivatusjärjestelmän toimivuutta. Pelkkä ojien kunnostaminen ei riitä, mikäli rumpujen korkeusasemia ei tarkasteta tai niiden toimivuutta ei varmisteta. Erityistä huomiota tulisi kiinnittää kohtiin, joissa ojan pohja nousee lähelle päällysrakenteen alapintaa, MDI-arvot ovat korkeita tai maasto-olosuhteet suosivat veden kertymistä.

Tulosten perusteella kuivatus on merkittävä tekijä etenkin hienorakeisilla pohjamailla, joissa rakenteen kantavuus on herkkä kosteuden muutoksille. Toimiva kuivatus ehkäisee veden kertymistä tierakenteeseen, vähentää sekä tyypin 1 että tyypin 2 urautumisen riskiä ja hidastaa päällystevaurioiden syntymistä. Siten kuivatus voidaan nähdä yhtenä keskeisimmistä tien pitkäaikaiseen kuntoon vaikuttavista kunnossapitotekijöistä.

Kuivatuksen muutokset pilottikohteissa

Pilottikohteilla toteutetut kuivatusparannukset muuttivat ojien geometriaa ja paransivat veden poisjohtamista useilla tieosuuksilla. Monissa kohdissa ojan pohja saatiin suunniteltuun asemaan siten, että se sijaitsi noin 20–30 cm päällysrakenteen alapinnan alapuolella. Näissä kohdissa kuivatus toimii lähtökohtaisesti suunnitellulla tavalla ja veden virtaus ojista takaisin tierakenteeseen estyi.

Kaikilla tieosuuksilla ojien kunto ei kuitenkaan ollut säilynyt ennallaan toimenpiteiden jälkeen. KUNDI-hankkeessa viljelysmaita oli pyritty säästämään, minkä vuoksi ojituksen

toteutuksessa oli jouduttu paikoin poikkeamaan suunnitelmasta. Tämän seurauksena ulkoluiskat olivat jääneet jyrkiksi. Jyrkät ulkoluiskat olivat paikoin sortuneet, minkä seurauksena maa-ainesta oli kulkeutunut ojan pohjalle. Tämän seurauksena ojan pohjan syvyys oli paikoin palautunut lähes toimenpiteitä edeltäneelle tasolle. Useassa kohdassa jyrkät ulkoluiskat sijaitsivat kiinteistörajojen kohdilla. Siksi viljelysmaiden omistajien kanssa käytävät neuvottelut ovat keskeisessä asemassa, ja ne tulisi aloittaa hyvissä ajoin, vähintään vuotta ennen ojien kaivutöiden aloittamista. Mäkisillä tieosuuksilla ojan pohjien madaltuminen vaikutti liittyvän myös maa-aineksen kulkeutumiseen rinteiltä ojiin.

Kuivatuksen toimivuuden kannalta havaittiin lisäksi ongelmia rumpujen korkeusasemissa. Joissakin kohdissa rumpu sijaitsi ojan pohjaa korkeammalla, jolloin veden virtaus estyy ja vettä voi jäädä seisomaan ojaan. Tällöin kuivatusjärjestelmä ei toimi kokonaisuutena suunnitellulla tavalla, vaikka itse oja olisi kunnostettu. Kuten myös päällysrakenteen alaosan MDI-arvoista havaittiin, rumpujen korkeusasemalla on merkittävä vaikutus tierakenteen kosteustilaan.

6.2 Tulosten luotettavuus

Videoaineistojen tulkintaan liittyvät epävarmuudet

Tieosuuksilla, joilla ei ole havaittuja päällystevaurioita, asfalttipinta näyttää pääosin yhtenäiseltä ja hyväkuntoiselta. Pinnassa esiintyy normaalia karkeutta sekä vähäistä sävyvaihtelua, jotka ovat päällysteelle tyypillisiä ominaisuuksia eivätkä viittaa vaurioihin. Kuvien keskialueella havaittavat hieman tummemmat kohdat eivät kuvan tarkkuuden perusteella näyttäydy purkaumina tai muina päällystevaurioina. Lisäksi tienpinnassa ei ole havaittavissa selviä kuoppia, halkeamia, reunavaurioita tai muita rakenteellisia puutteita. Havaitut lajittumat saattavat pikemminkin viitata urautumiseen. Vaikka varsinaisia päällystevaurioita ei esiinny, päällysteen ikä näkyy paikoin uramaksimin syvyytenä ja tien pituussuuntaisena epätasaisuutena myös silmämääräisesti tarkasteltuna.

Videoaineistojen tulkittavuus vaihtelee eri mittausvuosien välillä kuvausolosuhteiden vuoksi. Esimerkiksi tien 11295 vuoden 2020 videoaineistossa pitkiä tiejaksoja jää puuston aiheuttamien varjojen peittoon, mikä vaikeuttaa päällystevaurioiden havaitsemista. Vastaavat kohdat ovat vuoden 2023 aineistossa paremmin tulkittavissa. Tulkittavuuteen vaikuttavat muun muassa mittausajankohta, vuodenaika, vuorokaudenaika ja sääolosuhteet. Aurinkoisella säällä puuston varjot voivat peittää merkittäviä osia päällysteestä, kun taas pilvisissä olosuhteissa tien pinta on havaittavissa tasaisemmin koko tiejaksolta. Koska päällystevaurioiden luotettava vertailu eri vuosien välillä ei ole mahdollista heikosti

näkyvillä osuuksilla, kyseiset kohdat on jätetty vauriosummalaskennan ulkopuolelle. Sen sijaan urasyvyys- ja IRI-tarkastelut voidaan toteuttaa koko aineistolle, sillä videoaineiston tulkittavuuteen vaikuttavat tekijät eivät heikennä mittalaitteistolla tuotettujen mittaustulosten luotettavuutta.

Lisäksi videoaineistoihin perustuvissa tarkasteluissa on huomioitava, että voimakas auringonpaiste, varjostus sekä tienvarsien runsas puusto voivat vaikeuttaa päällystevaurioiden havaitsemista ja aiheuttaa paikallisia tulkintahaasteita. Tämän vuoksi videoaineistoista tehtyjä havaintoja on verrattu mahdollisuuksien mukaan myös muihin mittausaineistoihin sekä Road Doctor -ohjelmiston aineistoihin.

Päällystevaurioiden inventointiin liittyvät epävarmuudet

Tarkastelujakso vuosien 2020–2026 välillä on suhteellisen pitkä, minkä vuoksi päällystevauriot ovat ehtineet kehittyä tarkasteluvuosien välillä. Kapeat halkeamat voivat ajan myötä leventyä, ja purkaumat voivat edelleen kehittyä rei'iksi. Tämän tyyppistä vaurioitumiskehitystä on havaittavissa erityisesti vuosien 2020–2023 aineistoissa. Koska leveät halkeamat ja reiät heikentävät ajomukavuutta sekä voivat aiheuttaa vaaraa liikenteelle, osa vakavimmista vaurioista on paikattu ennen vuoden 2026 mittauksia. Tämä vaikeuttaa eri vuosien välistä suoraa vertailua, sillä alkuperäiset vauriot eivät ole enää havaittavissa myöhemmässä aineistossa.

Tielaitoksen (1994) ohjeiden mukaan paikattuja vaurioita ei huomioida vauriosummalaskennassa vaurioina. Tässä tutkimuksessa on kuitenkin päädytty tarkastelemaan paikattuja vaurioita niiden edellisen inventointivuoden mukaisina vaurioina. Menettelyn tarkoituksena on kuvata mahdollisimman hyvin tien todellista vaurioitumiskehitystä ja estää tilanne, jossa kunnossapitotoimenpiteet peittäisivät rakenteellisen kunnon heikkenemisen. Tällainen menettely mahdollistaa myös kuivatusratkaisujen vaikutusten arvioinnin paremmin kuin pelkästään inventointihetkellä näkyvien vaurioiden tarkastelu.

Vauriosummalaskennan tuloksia tarkasteltaessa on lisäksi huomioitava, että vauriotyyppien tulkinta voi poiketa inventoijan mukaan. Tuloksiin tuo epävarmuutta myös se, että havainnot on tehty videoaineistoista, jolloin vaurioiden sijainti, koko ja vakavuus eivät välttämättä täysin vastaa todellista tilannetta. Lisäksi eri vuosien aineistojen väliset kuvanlaatu- ja sävyerot voivat vaikuttaa vaurioiden tulkintaan.

Päällystepaikkausten vaikutus tuloksiin

Tien 11295 vuoden 2020 videoaineistosta havaitaan, että tieosuudella on tehty paikallisia päällystepaikkauksia. Paikkaukset eivät kuitenkaan ole olleet riittäviä korjaamaan kaikkia vaurioita, sillä päällysteessä esiintyy edelleen paikoin purkaumia ja reikiä. Lisäksi vuosien 2023–2026 välillä tiellä on tehty uusia paikkauksia erityisesti vakavimmin vaurioituneisiin kohtiin. Tämä tulee huomioida tulosten tulkinnassa, sillä esimerkiksi tieosan 2, jolla ojitustoimenpiteitä ei ole toteutettu, vauriosummien suhteellisen pieni muutos vuosien 2023–2026 välillä voi osittain selittyä pahimpien vaurioiden paikkaamisella. Tämän seurauksena vaurioiden kehitys on saattanut hidastua kaikkein heikkokuntoisimmissa kohdissa.

Maatutka-aineistojen tulkintaan liittyvät epävarmuudet

Maatutka-aineistojen osalta dielektrisyysarvoja ei tarkasteltu tässä tutkimuksessa. Dielektrisyysarvojen vertailtavuutta eri mittausvuosien välillä heikentää se, että tulokset ovat osittain antennikohtaisia ja käytetyt antennit ovat vaihtuneet tarkastelujakson aikana. MDI-arvojen tulkinnassa on lisäksi huomioitava, että suuremmat arvot voivat viitata korkeampaan kosteuspitoisuuteen, mutta tuloksiin vaikuttavat myös monet muut tekijät, kuten sääolosuhteet, sadanta, talviolosuhteet, lumen sulamisajankohta, mittausajankohta sekä käytetty antenni.

Kohteiden rakenteelliset erot ja liikenteen vaikutus

Tarkasteltavan tien poikkileikkaus on suhteellisen kapea, vaihdellen noin 5–6 metrin välillä. Vaikka tie on kaksikaistainen, vähäisen liikennemäärän ja raskaan liikenteen käyttötavan vuoksi ajoneuvot kulkevat usein lähellä ajoradan keskiosaa. Tämän seurauksena sisempiin ajouriin kohdistuva kuormitus voi olla suurempi kuin tavanomaisilla kaksikaistaisilla teillä, mikä saattaa osaltaan selittää sisempien ajourien nopeampaa urautumiskehitystä.

Kohteiden välistä vertailua tehdessä on huomioitava myös niiden erilaiset rakenne- ja kuntotekijät. Tie 11321 on uudelleenpäällystetty ja vahvistettu vaahtobitumistabiloinnilla vuonna 2018, minkä vuoksi kohde poikkeaa rakenteeltaan ja kantavuudeltaan tavanomaisista vähäliikenteisistä teistä. Näin ollen sen käyttäytyminen ei välttämättä edusta yleisesti vastaavia tiekohteita. Sen sijaan tiellä 11295 päällyste on tarkastelujaksolla huomattavasti kuluneempi, ja tämän tiejaksoilla esiintyy laajamittaisia purkaumia. Tästä

syystä esimerkiksi urasyvyystietojen ja urautumisnopeuksien luotettavuuteen liittyy tavanomaista enemmän epävarmuutta.

Ojitustoimenpiteiden vaikutusten arvioinnin epävarmuudet

Ojitustoimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa on huomioitava, että vuoden 2022 laadunvarmistusmittausten aikana tieosan 2 ojitustyöt olivat vielä kesken. Videoaineiston perusteella alueella oli mittaushetkellä käynnissä kaivinkonetyö. Siksi osa tien 11295 laadunvarmistusmittauksista ajoittuu vuoden 2023 kesälle.

IRI-arvojen tulkinnan rajoitteet

Myös IRI-arvojen tulkinnassa on huomioitava kohteen vaihteleva maasto. Pituuskaltevuuksien vaihtelut ja mäkisyys voivat vaikuttaa ajoneuvojen dynaamiseen käyttäytymiseen ja siten osaltaan vaikuttaa mitattuihin tasaisuusarvoihin. Tämän vuoksi IRI-arvojen osalta tarkastelu kohdistettiin ensisijaisesti poikkeamakohtiin ja niiden muutoksiin tarkasteluvuosien välillä.

6.3 Jatkotutkimusaiheet

Päällysteen käyttöiän ja kuivatusinvestointien kustannusvaikutukset

Tutkimuksessa havaittiin yhteys päällystevaurioiden kehittymisen ja ojituksen toimivuuden välillä. Tämän vuoksi jatkotutkimuksissa olisi perusteltua tarkastella ojituksen vaikutuksia myös elinkaarikustannusten näkökulmasta. Selvitys voisi olla siitä, kuinka paljon toimiva kuivatus pidentää päällysteen käyttöikää ja ovatko ojien kunnossapitotoimenpiteet taloudellisesti kannattavia pitkällä aikavälillä.

Ennakoivan kuivatuskunnossapidon kohdentaminen

Kuivatuksen toimivuuden varmistamiseksi kunnossapidon tulisi perustua nykyistä enemmän riskikohtien ennakoivaan tunnistamiseen. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että erityisesti mäkien alaosissa ojan pohjat madaltuvat muuta tieympäristöä nopeammin, koska maa-ainesta kulkeutuu valumavesien mukana rinteen yläosista alaosiin. Jatkossa olisi hyödyllistä selvittää, voitaisiinko tällaisilla kohteilla toteuttaa ojien kunnossapitoa muuta tieverkkoa tiheämmin.

Rumpujen vaikutus kuivatuksen toimivuuteen

Tutkimuksen perusteella rumpujen oikealla sijoituksella on keskeinen merkitys kuivatusjärjestelmän toimivuudelle. Maantierummun korkeusaseman muuttaminen on yleensä kallista, minkä vuoksi toimenpiteen tarve on arvioitava tapauskohtaisesti. Tällaiset toimenpiteet voivat kuitenkin olla perusteltuja, mikäli tien alittavan rummun tai liittymärummun virheellisen korkeusaseman arvioidaan lisäävän tierakenteen kosteutta merkittävästi. Liittymärumpujen parantaminen on sen sijaan usein helpompaa ja kustannustehokkaampaa toteuttaa.

Päällystevaurioiden hyödyntäminen kuivatusongelmien tunnistamisessa

Tekoälyn hyödyntäminen vauriosummien tunnistamisen ja laskennan automatisoinnissa voisi tehostaa päällystevaurioiden seurantaa. Lisäksi jatkossa voisi olla hyödyllistä selvittää, voitaisiinko vakavia päällystevaurioita hyödyntää kuivatusongelmien tunnistamisessa. Erityisesti liittymien ja rumpujen läheisyydessä esiintyvät leveät pituushalkeamat, reiät ja muut vakavat vauriot, kuten leveät pituushalkeamat, voivat viitata paikallisiin kuivatuspuutteisiin.

Kuivatusjärjestelmien kunnossapitotoimenpiteiden arvioinnissa voitaisiin hyödyntää vaurioitumisnopeuslaskentoja, joiden avulla olisi mahdollista tunnistaa tiejaksot, joilla päällysteen kunto heikkenee poikkeuksellisen nopeasti. Vaurioitumisnopeuden käyttö voisi soveltua paremmin tieosuuksille, joiden päällyste on vielä suhteellisen nuori, kuitenkin yli kuusi vuotta vanha, eikä vaurioituminen ole edennyt pitkälle. Tällöin päällysteen iän vaikutus vaurioitumisnopeuteen olisi todennäköisesti vähäisempi kuin vanhemmilla tieosuuksilla, kuten tiellä 11295, jossa päällyste oli tarkasteluhetkellä yli 20 vuotta vanha ja vaurioituminen oli edennyt jo pitkälle.

Luiskien sortuminen ja ojageometrian seuranta

Pilottikohteilla ojien pohjien madaltuminen johtui useissa tapauksissa luiskien, erityisesti ulkoluiskien, sortumisesta. KUNDI-hankkeessa ojien geometriaa kuvattiin taitepisteiden avulla, joten eri vuosien mittaustuloksia voitaisiin hyödyntää taitepisteiden sijainnin muutosten seurannassa. Näin mahdolliset sortumakohdat voitaisiin tunnistaa nykyistä nopeammin ja niiden syntymekanismeja voitaisiin tutkia tarkemmin.

Tien tasaisuuden arviointi

Vaikka harjannekorkeutta ei tässä työssä tarkasteltu, se voisi jatkossa toimia urakasvunopeuden rinnalla mahdollisesti käyttökelpoisena tunnuslukuna erityisesti vähäliikenteisillä teillä. Tässä tutkimuksessa tien pituussuuntaisen epätasaisuuden arviointi perustui 10 metrin keskiarvostettuihin IRI-arvoihin. Jatkossa ojien kunnossapitotoimenpiteiden vaikutuksia voitaisiin tarkastella myös muiden tasaisuutta kuvaavien tunnuslukujen, kuten RIDE-arvojen, avulla. Näin voitaisiin arvioida, tarjoavatko ne lisätietoa kuivatusratkaisujen vaikutuksista tien toiminnalliseen kuntoon.

LÄHTEET

Ahmad, T. & Khawaja, H. (2018). Review of low-temperature crack (LTC) developments in asphalt pavements. International Journal of Pavement Research and Technology, 12(2), 169–187.

Aho, S & Saarenketo, T. (2006). Kuivatusratkaisut vähäliikenteisillä teillä: Tiivistelmä. RODEX III: Northern periphery.

Arnold, G., Fon Sing, P., Saarenketo, T. & Saarenpää, T. (2017). Pavement moisture measurement to indicate risk to pavement life. New Zealand Transport Agency research report 611, Wellington: NZ Transport Agency.

Barreiro, J., Ferreira, F., Brito, R.S. & Matos, J.S. (2024). Development of Resilience Framework and Respective Tool for Urban Stormwater Services. Sustainability (Switzerland).

Belt, J., Kolisoja, P., Alatyppö, V. & Valtonen, J. (2006). Tierakenteen rappeutuminen ja kunnon ennustaminen. Oulun yliopiston rakentamisteknologian tutkimusryhmä. Oulu.

Belt, J., Lämsä, V.P., Liimatta, L. & Ehrola, E. (2000). Kevytpäällysteteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet. Tielaitoksen selvitykset 18/2000. Helsinki.

Belt, J., Lämsä, V.-P., Savolainen, M. & Ehrola, E. (2002). Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. Helsinki: Edita Prima Oy.

Bussman, S & West Coast Road Masters Oy. (2026). Ojituksen merkitys kantavuuden vaihtelun lieventämisessä: Havaintoja valtion sorateiltä 2020–2025. Väyläviraston julkaisuja 13/2026.

Butrinov, A.A., Varshavskiy, S.V., Vasiliev, Y.E., Brezhneva, M.A. & Lykashchuk, P.I. (2024). Assessment of the Impact of Materials and Production Technology on the Durability of Asphalt Concrete Structural Layers of Road Clothing. Transportation Infrastructure: Research, Vehicles and Energy Development (TIRVED 2024).

Cepa J. J., Alberti M. G., Pavón R. M. & Calvo J. A. (2024). Integrating BIM and GIS for an existing infrastructure. Applied Sciences (Basel, Switzerland), 14(23), 10962.

Dawson, A. & Kolisoja, P. (2006). Managing rutting in low volume roads: Executive Summary. RODEX III: Northern periphery.

Dawson, A. (2008). Water in road structures: movement, drainage & effects. Springer Science & Business Media.

Ehrola, E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki 1996. Rakennustieto Oy.

Eskola, J. (2020). Päällysteiden ylläpidon kehittäminen – PYKE 2014-2019. Väylävirasto. Helsinki 2020. Väyläviraston julkaisuja 11/2020.

Ghasia, M.A., Shah, Y.U. & Rotte, V. (2019). A Critical Review on Evaluation of Pavement Drainage Systems. pp. 93–101.

Hartikainen, O. (1981). Tietekniikan perusteet 467. Otakustantomo. Espoo. pp. 124–130.

Hartmann, S., Valles, R., Schmitt, A., Al-Zuriqat, T., Dragos, K., Gölzhäuser, P., Jung, J.T., Villinger, G., Varela Rojas, D., Bergmann, M., Pullmann, T., Heimer, D., Stahl, C., Stollewerk, A., Hilgers, M., Jansen, E., Schoenebeck, B., Buchholz, O., Papadakis, I. & Merkle, D.R. (2025). Digital-Twin-Based Management of Sewer Systems: Research Strategy for the KaSyTwin Project. Water, 17(3), 299.

Heilala, A., Herronen, T., Herukka, T., Hiekkalahti, A., Kolisoja, P., Saarenketo, T., Saarenpää, T. & Vaismaa, K. (2023). Kuivatuksen kunnossapidon digitaalisen hallinnan kehittäminen: Projektin raportti 2023. Väyläviraston julkaisuja 76/2023. Helsinki: Väylävirasto.

Herronen, T., Hiekkalahti, A., Saarenketo, T. & Varin, P. (2022). PEHKO-project – using bearing capacity analysis as a tool for. Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields.

Ismiyani, E., Handayani, D., & Hadiani, R.R. (2018). The impact of drainage towards roads in maintenance cost. MATEC Web of Conferences.

Isometsä, J. (2024). Raskaan liikenteen kuormitusvasteiden mallintamien. Diplomityö. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Tampereen ylipisto.

Kalantari, Z., & Folkeson, L. (2013). Road drainage in Sweden: Current practice and suggestions for adaptation to climate change. Journal of Infrastructure Systems.

Karthic, E.S., Shetty, T.S., Kumar, S.R., Prabhakar, K., Goud, P.G., Anvesh, J., Saibaba, C.H.M.H. & Jayakumar, V. (2025). Performance of Concrete Pavements Affected by Subsurface Drainage. 7(1), pp. 11–18.

Kumar, P.S., Eunice, J. & Priya, M.J. (2025). An overview of integrating GIS and BIM for smarter infrastructure development. International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH), 3(5), pp. 2524–2531.

Laitinen, V., Orama, R. & Pellinen, T. (1992). PTM-auton tuottamien tunnuslukujen käyttö- kelpoisuus ja vertailtavuus sekä niiden yhteys laser-mittauksiin (IRI, 1R14, P1/Laser). Tielaitos. Helsinki. Tielaitoksen selvityksiä 78/1992.

Lampinen, A. (1993). Kestopäällysteiden urautuminen. VTT Julkaisuja 781. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. Espoo.

Leonovich, I. & Melnikova, I. (2014). Changing of Technical and Operational Road Parameters Caused by Traffic Load and Climatic Factors. Environmental Engineering.

Liikennevirasto. (2013a). Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 5/2013. Helsinki.

Liikennevirasto. (2013b). Vesilaki väylähankkeissa. Liikenneviraston ohjeita 5/2013. Helsinki.

Liikennevirasto. (2017). Tie- ja ratahankkeiden inframalliohje. Liikenneviraston ohjeita 12/2017.

Liikennevirasto. (2018). Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 38/2018. Helsinki.

Liikka, S. (2026). Päällystettyjen teiden urautuminen roudan sulamiskaudella. Diplomityö. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Tampereen yliopisto.

Lätti, E. (2016). Vaihtoehtoisten maarakennusmateriaalien mekaaniset ominaisuudet. Liikennevirasto. Oppinäytetyö 2/2016. Helsinki.

Mahdy, H.A.H. & Mostafa, S.A. (2012). Minimum Acceptable Cross Slopes of Asphalt Roads for Drainage Consideration. 8(3), pp. 1558–1567.

Malin, F., Luoma, J. & Peltola, H. (2016). Tien kunnon vaikutukset liikenneturvallisuuteen. Liikennevirasto. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 53/2016.

Mallick, R., B. & El-Korchi, T. (2017). Transportation Geotechnics and Pavement Engineering: Drainage, 117–157.

Marienfeld, M.L. (2013). Geosynthetics and Common Sense Give You Design Options. Geo-Congress 2013, 465–477.

Moilanen, L. (2022). Teiden sivuojien kunnostuksen vaikutuksen seuranta laserkeilaintekniikalla. Oppinäytetyö. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Lapin AMK.

Motaei, B., Moghaddasnejad, F. & Zakeri, H. (2020). Presentation of a new surface drainage assessment method based on image processing. Amirkabir Journal of Civil Engineering.

Männistö, V & Saarenketo, T. (2024). PEHKO-projektin tulosten hyödyntäminen päällystettyjen teiden kunnossapidossa. Väylävirasto Helsinki 2024. Väyläviraston julkaisuja 46/2024.

Neelkamal, M., S. & Raja, H., K. (2017). Design of Flexible Pavements by Using Geo Grids, Geo Cells and Geo Membranes. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(4), 2226–2229.

PANK ry. (2017). Asfalttinormit. Päällystealan neuvottelukunta. Helsinki: PANK ry.

Perez-Latorre, F.J., Moral-Erencia, J.D., Garcia-Siles, S. & Bohorquez, P. (2022). The use of 2D Saint-Venant equations to design the drainage system of a forest road by simulating the dynamics of runoff numerically from the catchment to ditches and culverts. Proceedings of the IAHR World Congress.

Respondek, Z. (2017). The problems of maintenance of drainage devices within municipal and district roads. Manag Syst Prod Eng 25(2):100–104.

Roadex Network. (n.d.). Kurssi 3: Teiden kuivatus. Saatavissa (viitattu 26.05.2026): 1. Johdanto, kuivatuksen merkitys - ROADEX Network

Roadscanners. (2020). KUNDI-hankkeen lähtöaineistot. Diplomityöaineisto.

Roadscanners. (2026). KUNDI-hankkeen seurantatutkimuksen aineisot. Diplomityöaineisto.

Saarenketo, T. & Männistö, V. (2021). From Reactive to Proactive Maintenance in Road Asset Management. Proceedings of 18th IRF World Meeting & Exhibition, November 7-10, 2021 – Dubai, UAE, Springer.

Saarenketo, T. & Scullion, T. (2000). Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics, 43(2-4), pp. 119-138.

Saarenketo, T. (2024). Luento 6: Kuivatuksen kunnossapito. RAK.IN.320 Tierakenteen parantaminen ja kunnossapito. Tampereen yliopisto.

Saarenketo, T., Herronen, T. & Männistö, V. (2022). Monitoring Rut Depth Development – What does it Tell Us. In Proceedings of SURF 2022, The 9th Symposium on Pavement Surface Characteristics, Milano, Italy – September 12–14, 2022.

Saarenketo, T., Munro, R. and Matintupa, A. (2012). ROADEX benefits and saving – achieving more with less. ROADEX IV project report.

Selvakumar, P. (2026). Use of BIM and GIS in maintenance and operation of urban infrastructure. Building Information Modeling and Geographic Information Systems for Next-Generation Spatial Intelligence. pp. 1–28. 2026. ISBN 979-8-3373-4058-6.

Shaaban, K. (2022). Challenges and lessons learned from building a new road drainage system in a developing country. Department of Engineering, Utah Valley University, Orem, UT, USA.

Sims, R.C. & Sims, J.L. (2015). Landfarming of petroleum contaminated soils. Teoksessa: Bioremediation of Contaminated Soils.

Spoof, H. & Petäjä, S. (2000). Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus). Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994–2001. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo.

Spoof, H., Petäjä, S. & Ruotoistenmäki, A. (2000). Tien rakenteellinen kunto: Taipumien lämpötilakorjaus ja kuormituskestävyysmallit. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo.

Sreekanthaswamy N., Anitha S., Singh A., Jayadeva S. M., Gupta S., Manjunath T. C & Selvakumar P. (2025). Digital tools and methods. Enhancing School Counseling with Technology and Case Studies (pp. 25–48). IGI Global Scientific Publishing.

STT info. (2024). Milloin ELY-keskus vaihtaa yksityistien liittymän rummun? (Kainuu, Pohjois-Pohjanmaa). ELY-keskukset. Tiedote. Saatavissa (viitatu 6.11.2026): Milloin ELY-keskus vaihtaa yksityistien liittymän rummun? (Kainuu, Pohjois-Pohjanmaa) | ELY-keskukset

Sukur, K.M., Nordin, R.M., Jaluddin, S.N. & Yacob, R. (2023). Influence of Poor Drainage System on Durability of the Road Pavement. AIP Conference Proceedings, 2881(1), Article 060003.

Tie- ja maarakennustekniikan laitos. (1979). Tienrungon vaurioiden korjaus. Teiden ja taajamaväylien kunnossapidon AV-koulutuspakettikokoelma. MEKO-projekti. Oulun yliopisto. Oulu.

Tie- ja maarakennustekniikan laitos. (1980). Katupäällysteiden kunnossapito. Teiden ja taajamaväylien kunnossapidon AV-koulutuspakettikokoelma. MEKO-projekti. Oulun yliopisto. Oulu.

Tie- ja vesirakennuslaitos. (1976). Tien kunnossapito. TVH 3000. Kajaani. Kainuun Sanomain Kirjapaino Oy. ISBN 951-46-1596-4. pp. 80–287.

Tiehallinto. (2002a). Yksityisten teiden parantaminen ja kunnossapito: Pintakuivatus. Saatavissa (viitattu 5.11.2026): sivuojat.pdf

Tiehallinto. (2002b). Yksityisten teiden parantaminen ja kunnossapito: Rummut. Saatavissa (viitattu 7.9.2026): sivuojat.pdf

Tiehallinto. (2005a). Leikkaukset, kaivannot ja avo-ojarakenteet. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Helsinki.

Tiehallinto. (2005b). Rakenteen parantamisen suunnittelu. Helsinki.

Tiehallinto. (2007). Käsikirja päällysteiden pinnan kunnon mittaamiseen. APVM 2006 2007 T&K. Tiehallinnon selvityksiä 21/2007. Helsinki: Tiehallinto.

Tiehallinto. (2009). Kevyen liikenteen väylien vaurioinventointiohje 2008. Helsinki 2009.

Tielaitos. (1993a). Betonipäällysteen valinta ja talous. Tielaitoksen selvityksiä 56/1993. Helsinki: Tielaitos.

Tielaitos. (1993b). Kuivatus. Teiden suunnittelu IV. Tienrakenne 4. Helsinki: Tielaitos.

Tielaitos. (1993c). Tienrakennustöiden yleiset työselitykset ja laatuvaatimukset: Yleiset perusteet. Helsinki: Tielaitos.

Tielaitos. (1994a). Päällystevaurioiden inventointiohje. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 13/1994. Helsinki.

Tielaitos. (1994b). Päällystettyjen teiden heijastushalkeilun esto. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 48/1994. Geokeskus. Oulu.

Vesi.fi. (n.d). Ajankohtaisia katsauksia vesitilanteesta. Saatavissa (viitattu 30.06.2026): Routatilanne | Vesi.fi

Virtala, P., Huuskonen-Snicker, E. & Alanlaatu, P. (2019). Tien urautuminen kesällä ja talvella 2017–2019: Väliraportti 1. Väyläviraston tutkimuksia 23/2019. Helsinki.

Virtala, P., Meriläinen, J. & Huuskonen-Snicker, E. (2025). Tien urautuminen eri vuoden aikoina 2021 2024. Uusien poikkiprofiilitunnuslukujen tarkastelut – Väliraportti 3. Väyläviraston julkaisuja 24/2026. Helsinki.

Vu, V.-T., Chupin, O., Piau, J.-M., Hammoum, F. & Lecontee, P. (2017). Testing and Modeling the Behavior of Water Saturated Asphalt Concrete under Freezing Conditions in Relation to Pavement Damaging. Proceedings of the International Conference on Transportation Infrastructure, 2111–2116.

Vuorimies, N. et al. (2019). Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015–2018. Yhteenvetoraportti. Väyläviraston tutkimuksia 21/2019, Helsinki: Väylävirasto.

Väylävirasto. (2019a). Maanteiden kuivatuksen kunnossapidon hallinta. (2019a). Väyläviraston ohjeita 6/2019. Helsinki.

Väylävirasto. (2019b). Päällysteiden paikkaus. Väyläviraston ohjeita 27/2019. Helsinki.

Väylävirasto. (2022). Päällystettyjen teiden korjauksen toimenpidesuunnittelu. Väyläviraston oppaita 3/2022. Helsinki.

Väylävirasto. (2023a). SILKO 2.832 Päällysteen halkeaman sulkeminen (sisältö vastaa versiota 6/2019). Väyläviraston ohjeita 83/2023. Helsinki.

Väylävirasto. (2023b). Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. Väyläviraston ohjeita 93/2023. Helsinki.

Väylävirasto. (2024). Päällysteiden kunto ja vauriot. Saatavissa (viitattu 30.06.2026): Päällysteiden kunto - Väylävirasto

Väylävirasto. (2026a). Teiden kunnosta huolehtiminen. Saatavissa (viitattu 04.07.2026): Teiden kunnosta huolehtiminen - Väylävirasto

Väylävirasto. (2026b). Päällystettyjen teiden korjauksen toimintalinjat. Väyläviraston ohjeita 34/2026. Helsinki.

Väylävirasto. (n.d). Suomen väylät -karttapalvelu. Saatavissa (viitattu 17.9.2026): Suomen väylät

Wang, Y., Li, M., Li, H., Wu, J., Ye, M. & Liang, C. (2025). Research Progress on Aggregate Loss in Asphalt Pavement. AIP Conference Proceedings, 15(10), Article 100701.

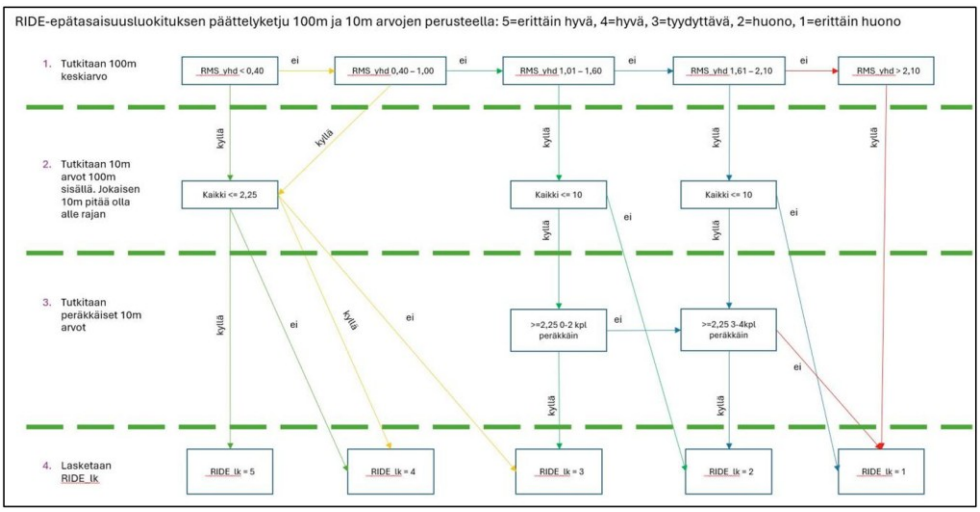
LIITE 1: VÄYLÄVIRASTON (34/2026) PÄÄLLYSTEIDEN KORJAUKSEN KUNTOLUOKITUS JA KUNTOMUUTTUJIEN RAJA-ARVOT

Taulukko 1. Skannerilla mitatun urasyvyyden (mm) raja-arvot eri kuntoluokille. (Väylävirasto 2026b)

KVL (ajon./vrk)	Nopeus (km/h)	Kuntoluokka urasyvyyden (mm) perusteella				
		KL 5	KL 4	KL 3	KL 2	KL1
350–1 499	≤ 60	≤ 8	8,1–14	14,1–23	23,1–28	> 28
	70–80	≤ 8	8,1–13	13,1–16	16,1–21	> 21
	≥ 100	≤ 7	7,1–11	11,1–15	15,1–20	> 20
1 500–5 999	≤ 60	≤ 7	7,1–13	13,1–21	21,1–28	> 28
	70–80	≤ 7	7,1–12	12,1–16	16,1–20	> 20
	100	≤ 7	7,1–11	11,1–16	16,1–20	> 20
	120	≤ 7	7,1–9	9,1–14	14,1–18	> 18
≥ 6 000	≤ 60	≤ 6	6,1–12	12,1–20	20,1–28	> 28
	70–80	≤ 6	6,1–11	11,1–16	16,1–20	> 20
	100	≤ 6	6,1–10	10,1–15	15,1–19	> 19
	120	≤ 6	6,1–10	10,1–15	15,1–19	> 19

Taulukko 2. Päällystevaurioiden (m/100) raja-arvot eri kuntoluokille. (Väylävirasto 2026b)

KVL (ajon./vrk)	Kuntoluokka päällystevaurioiden (m/100 m) perusteella				
	KL 5	KL 4	KL 3	KL 2	KL1
< 350	0	1–50	51–75	76–90	91–100
350–1 499	0	1–35	36–60	61–80	81–100
1 500–6 000	0	1–35	36–60	61–80	81–100
≥ 6 000	0	1–20	21–40	41–70	71–100



Kuva 1. Tien epätasaisuutta kuvaavan tunnusluvun (RMS_{yhd}) perusteella tehtävän RIDE-kuntoluokittelun päättelyketju, jossa tutkitaan ensin 100 metrin keskiarvo ja sitten 10 metrin arvoja. (Väylävirasto 2026b)

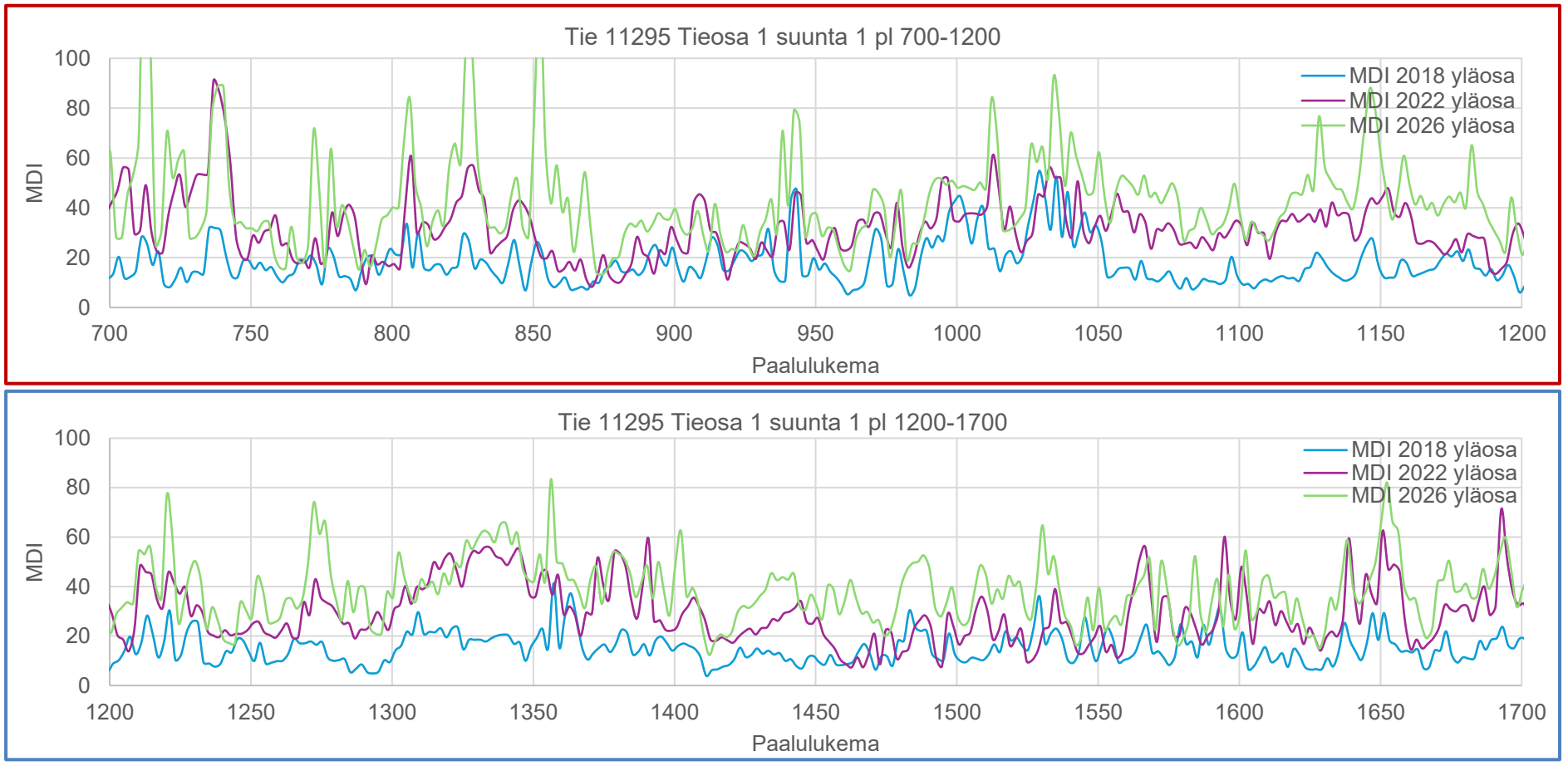
LIITE 2: VAURIOINVENTOINTILOMAKE

Tie Tieosa

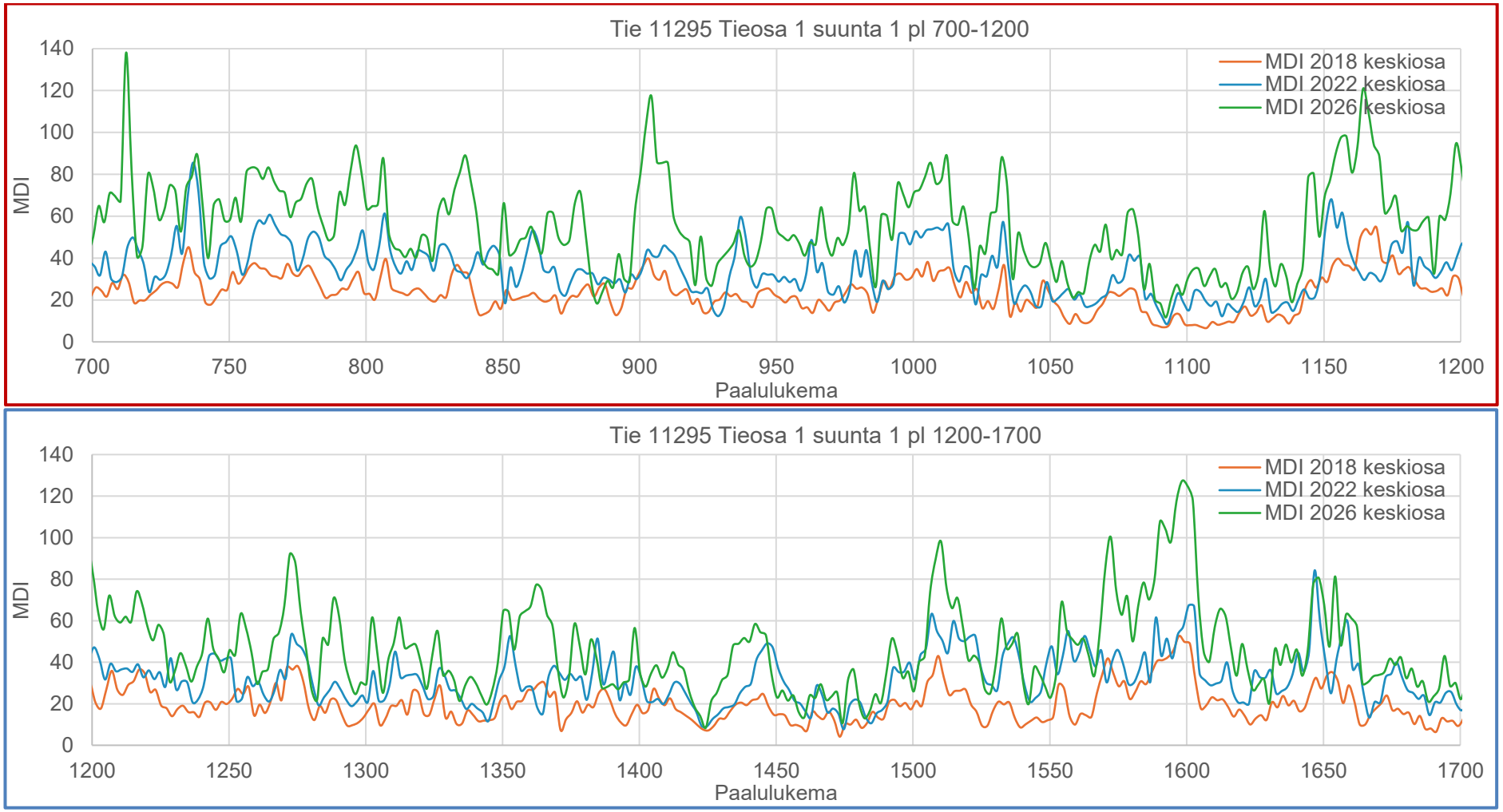
Alkupaalu	Loppupaalu	Alkupaalu	Loppupaalu
KVL, KVL_{raskas}	Nopeusrajoitus	KVL, KVL_{raskas}	Nopeusrajoitus
$Päällyste_{lev}$, $Ajorata_{lev}$	Päällystetyyppi	$Päällyste_{lev}$, $Ajorata_{lev}$	Päällystetyyppi

10	10
20	20
30	30
40	40
50	50
60	60
70	70
80	80
90	90

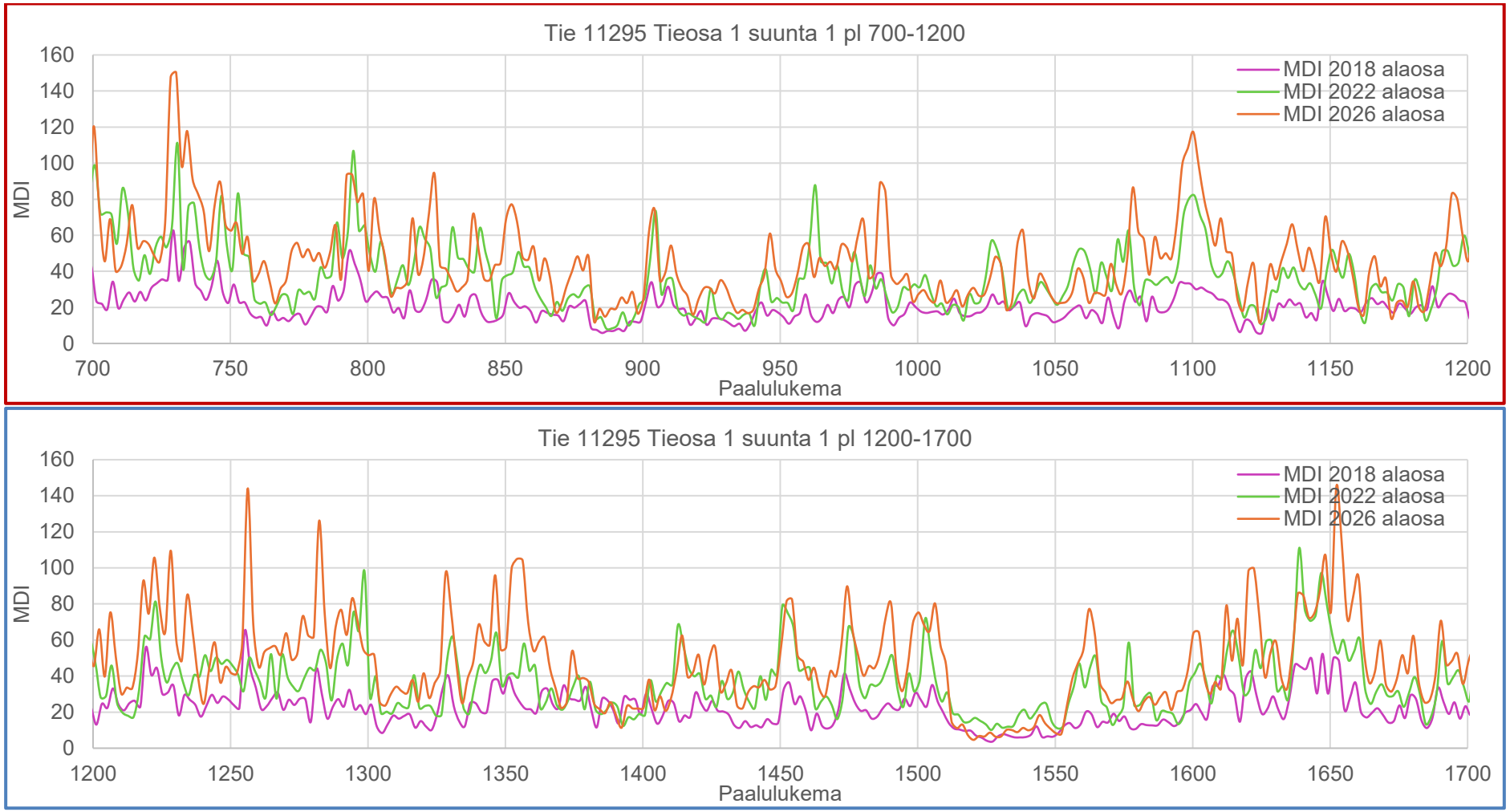
LIITE 3: TEIDEN 11295 JA 11321 TARKASTELUJAKSOJEN MDI-KUVAAJAT



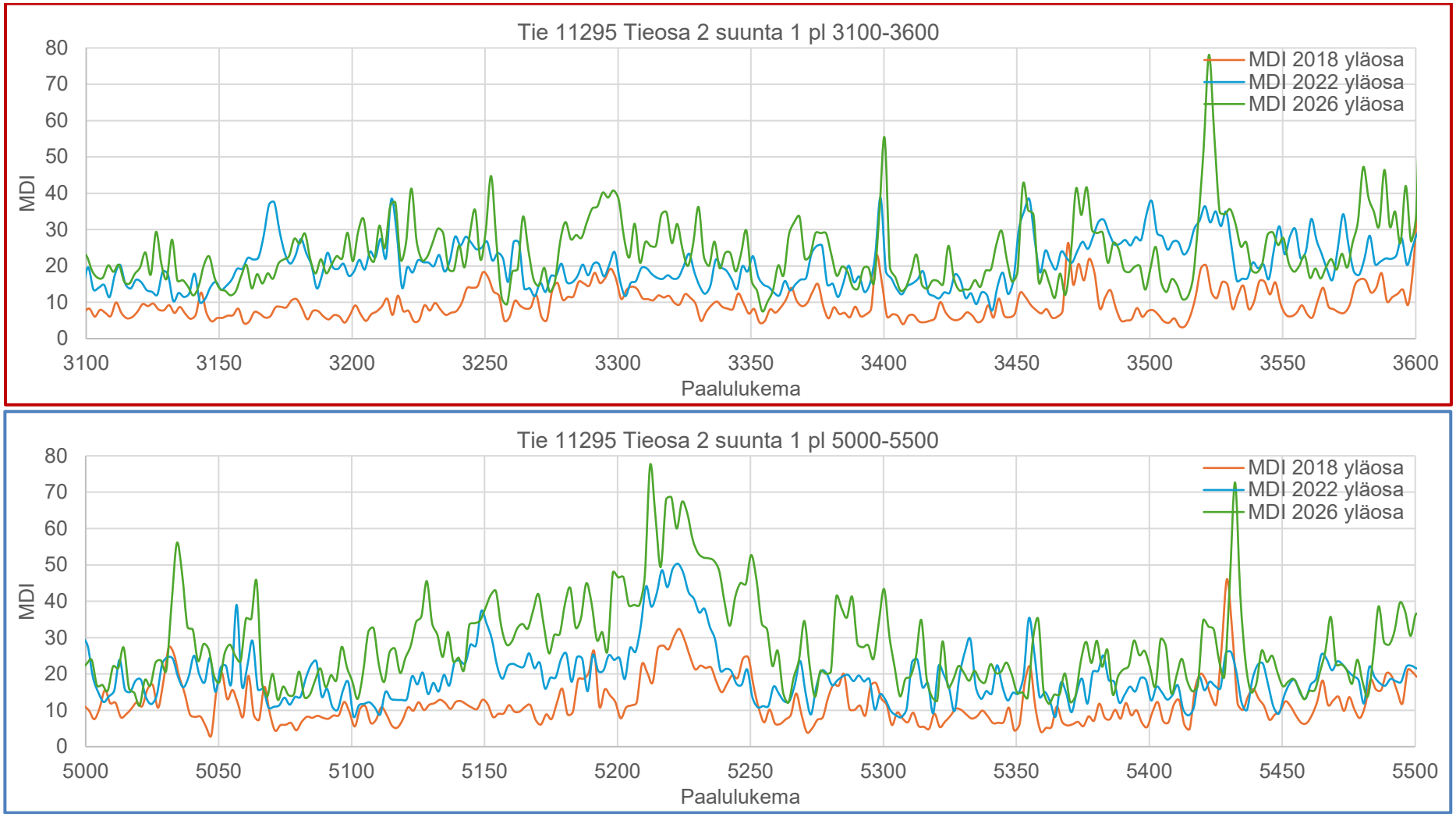
Kuva 1. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 päällysrakenteen yläosan MDI-arvot. Paaluväli 700–1200 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 1200–1700 kunnostettua ojaosuutta.



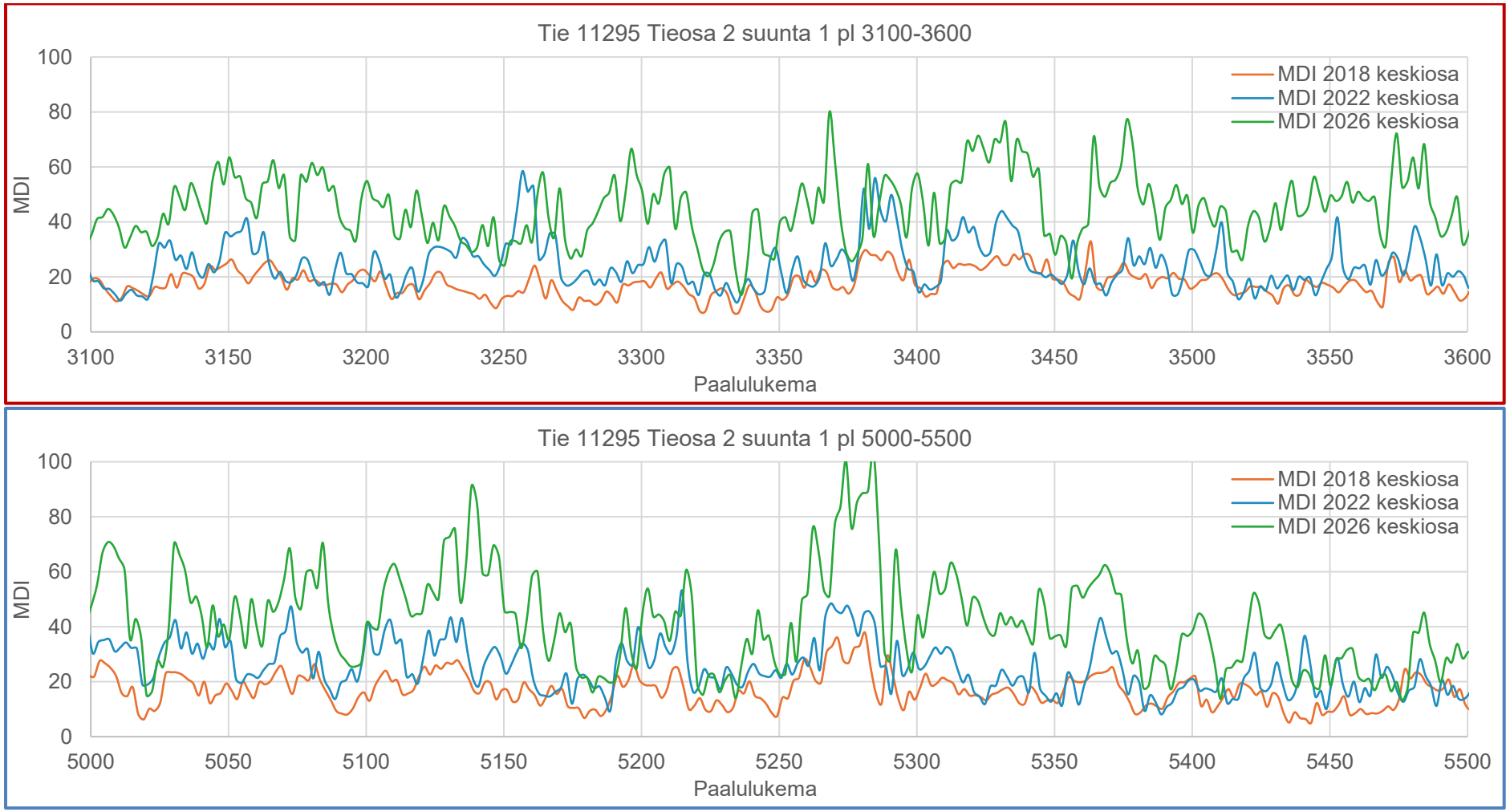
Kuva 2. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 päällysrakenteen keskiosan MDI-arvot. Paaluväli 700–1200 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 1200–1700 kunnostettua ojaosuutta.



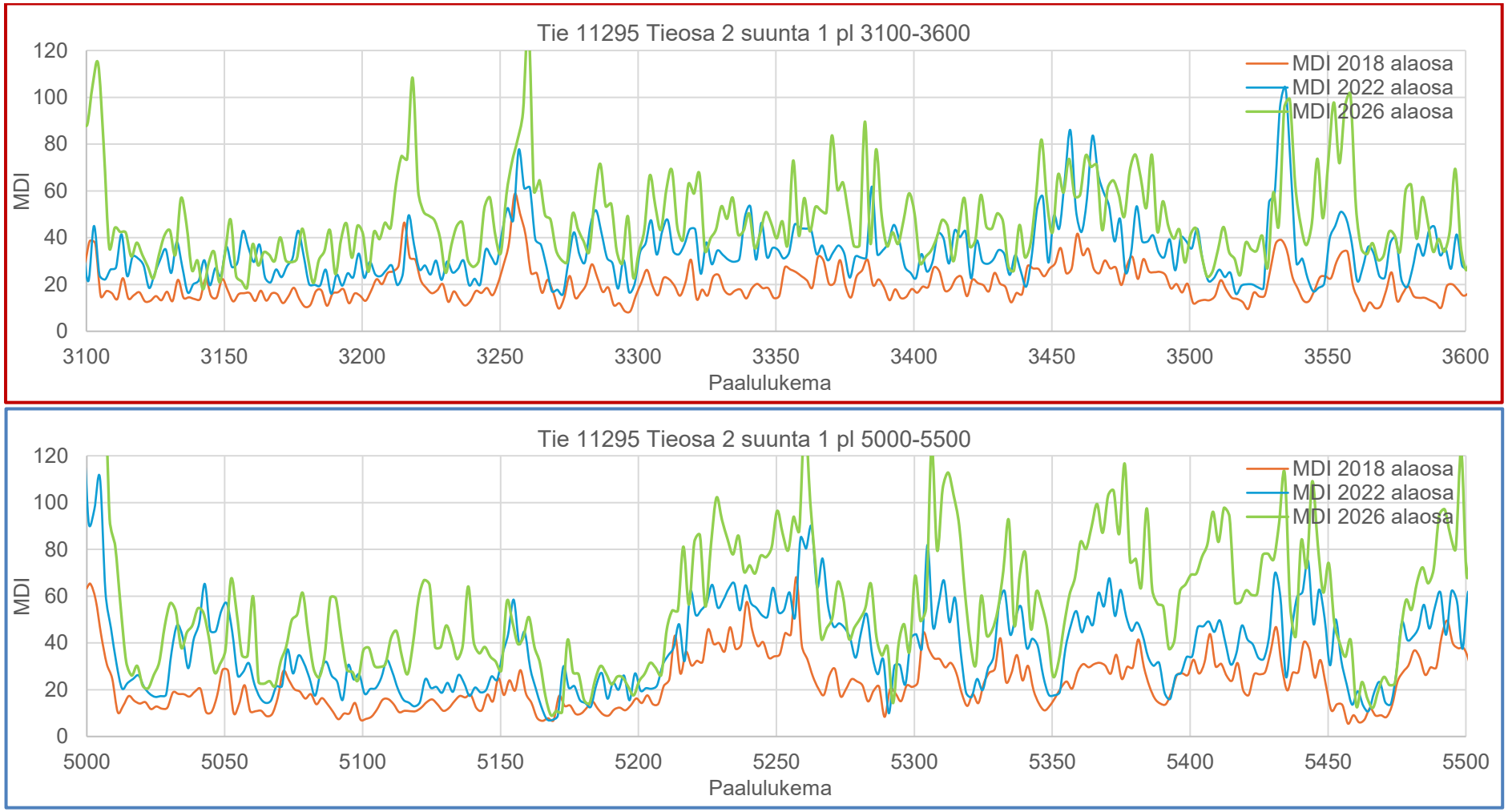
Kuva 3. Tien 11295 tieosan 1 suunnan 1 päällysrakenteen alaosan MDI-arvot. Paaluväli 700–1200 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 1200–1700 kunnostettua ojaosuutta.



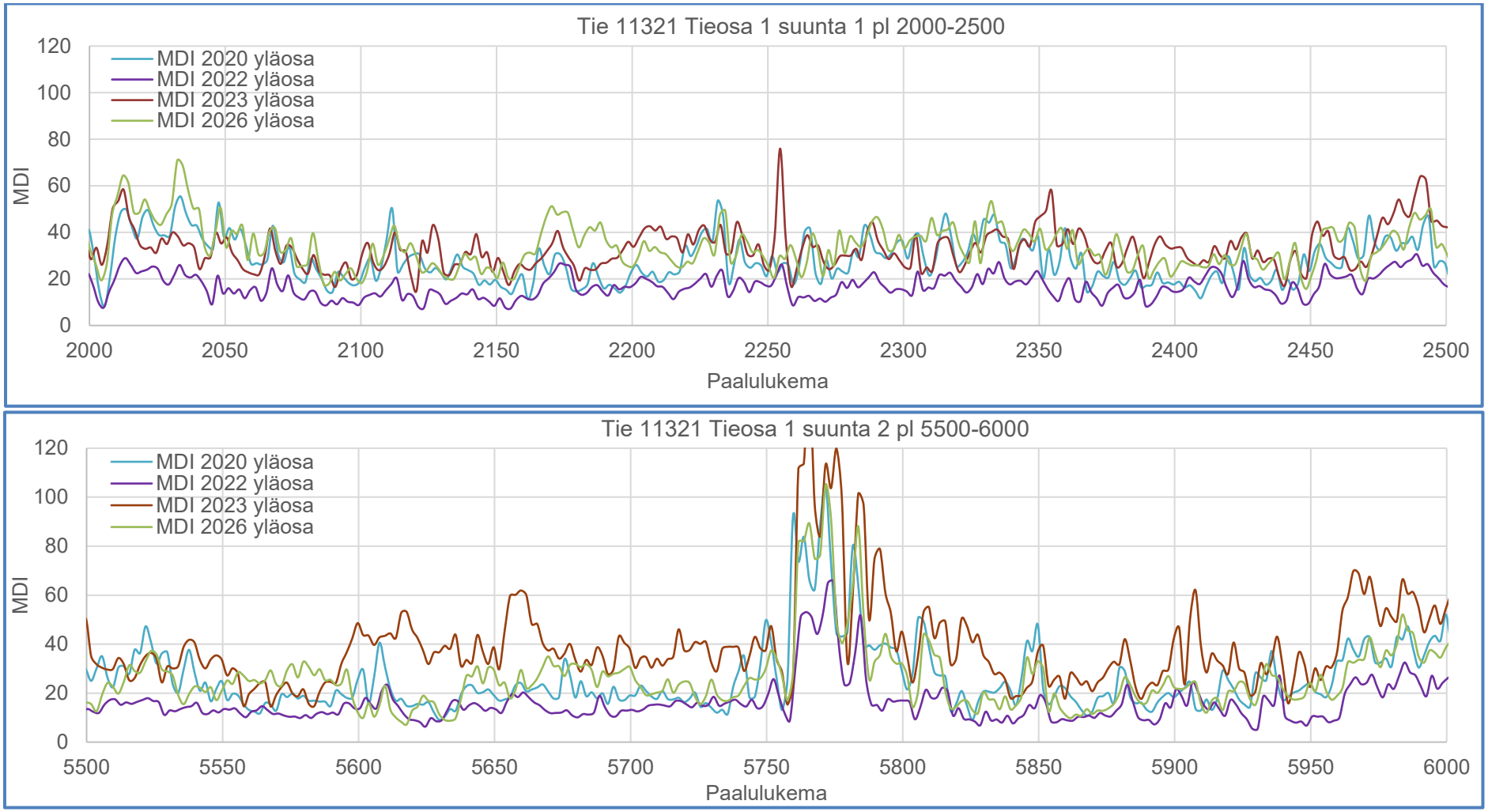
Kuva 4. Tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 päällysrakenteen yläosan MDI-arvot. Paaluväli 3100–3600 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 5000–5500 kunnostettua ojaosuutta.



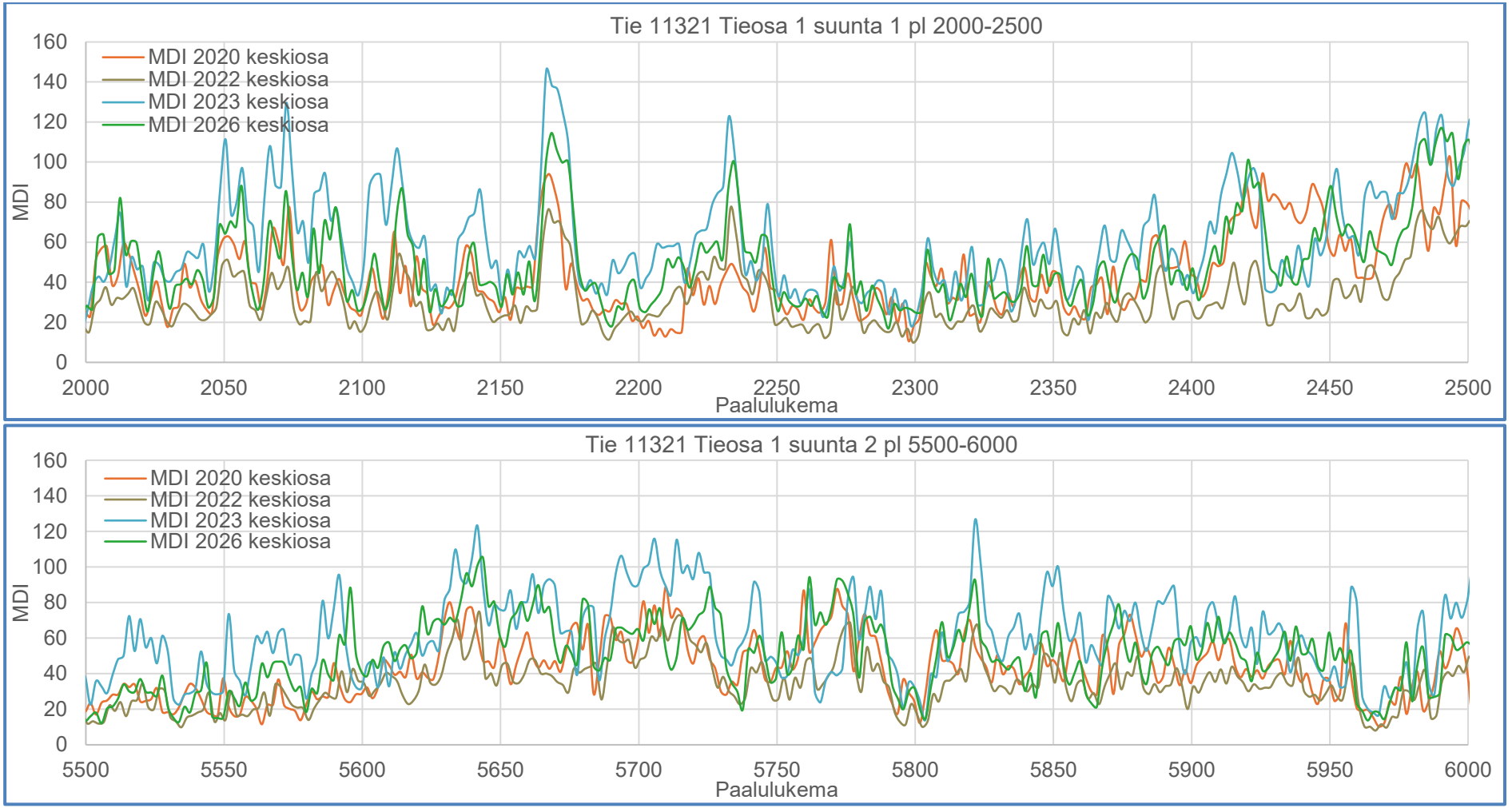
Kuva 5. Tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 päällysrakenteen keskiosan MDI-arvot. Paaluväli 3100–3600 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 5000–5500 kunnostettua ojaosuutta.



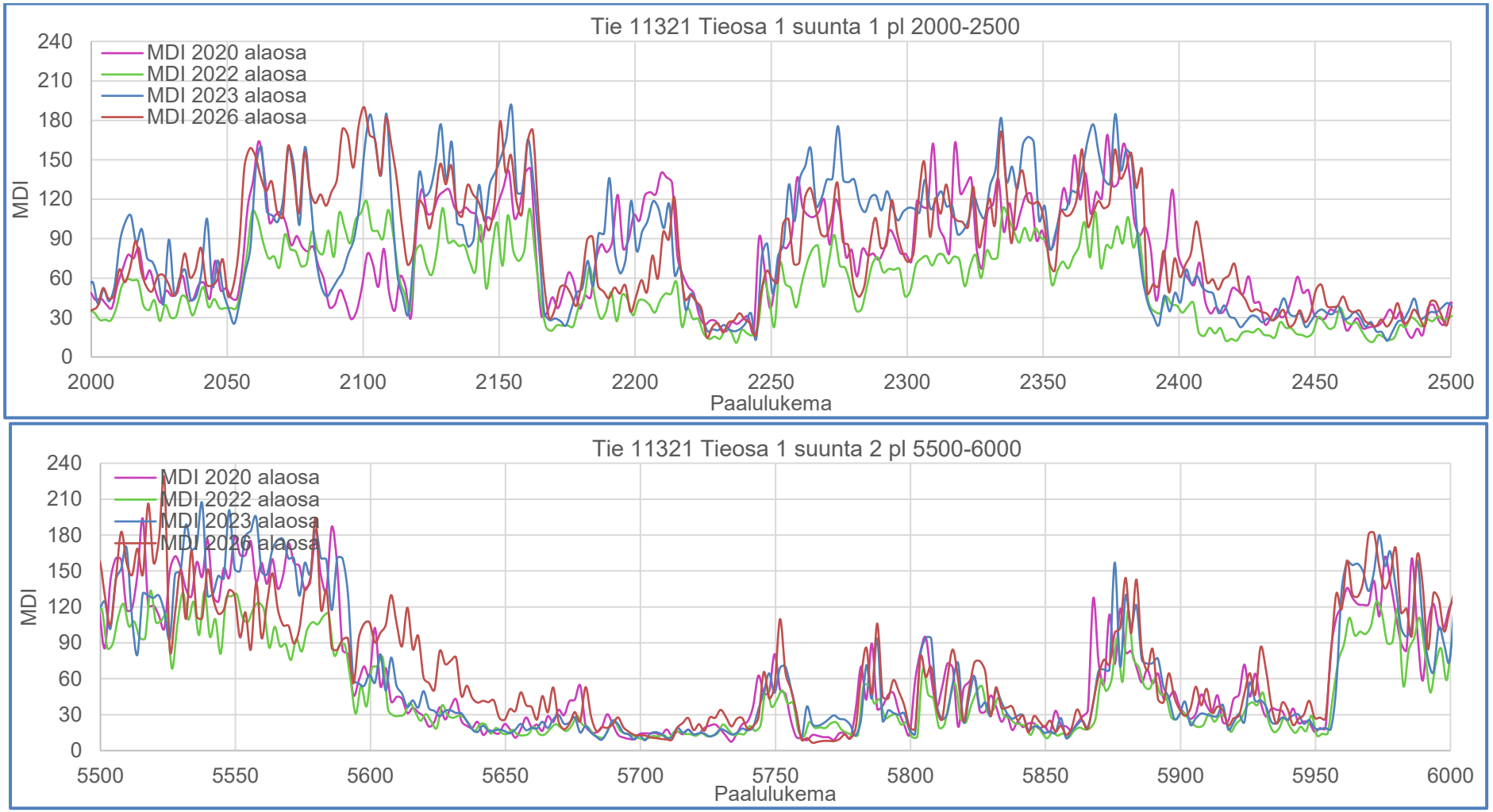
Kuva 6. Tien 11295 tieosan 2 suunnan 1 päällysrakenteen alaosan MDI-arvot. Paaluväli 3100–3600 edustaa kunnostamatonta ja paaluväli 5000–5500 kunnostettua ojaosuutta.



Kuva 7. Tien 11321 tarkastelujaksojen päällysrakenteen yläosan MDI-arvot. Paaluvälit 2000–2500 ja 5500–6000 edustavat kunnostettuja ojaosuuksia.



Kuva 8. Tien 11321 tarkastelujaksojen päällysrakenteen keskiosan MDI-arvot. Paaluvälit 2000–2500 ja 5500–6000 edustavat kunnostettuja ojaosuuksia.



Kuva 9. Tien 11321 tarkastelujaksojen päällysrakenteen alaosan MDI-arvot. Paaluvälit 2000–2500 ja 5500–6000 edustavat kunnostettuja ojaosuuksia.