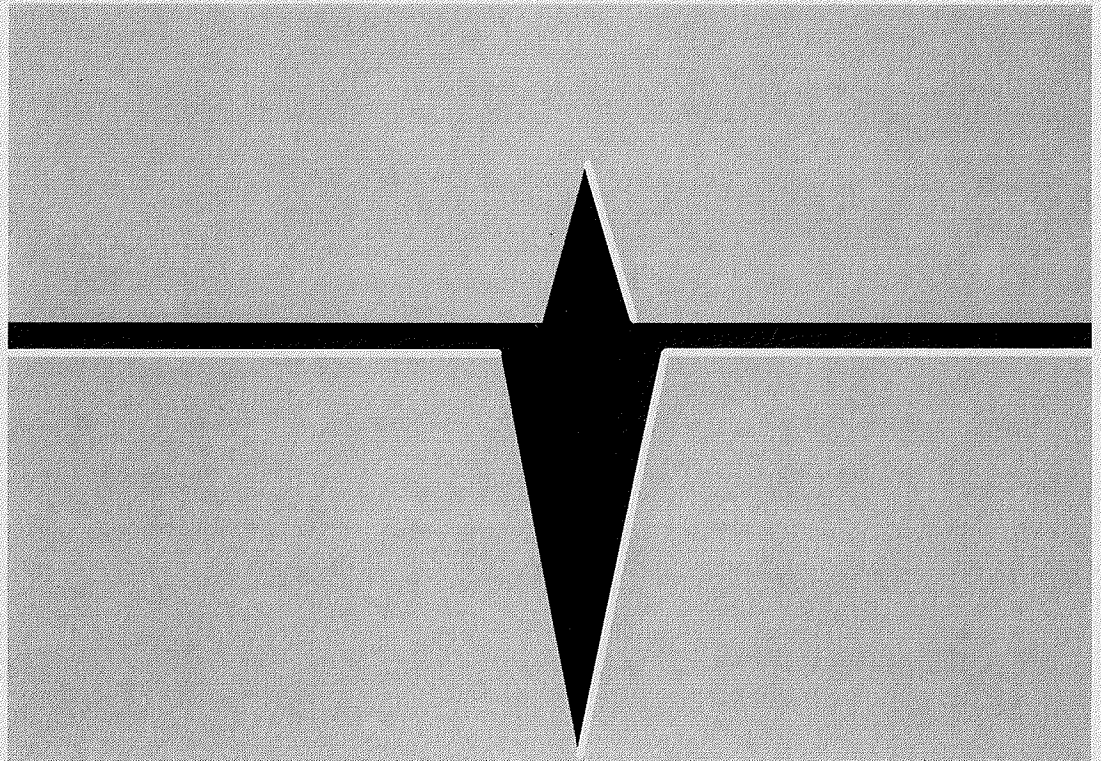




Tielaitos

Päällystettyjen teiden heijastus- halkeilun esto

Esiselvitys



**Tielaitoksen
sisäisiä
julkaisuja
48/1994**

Oulu 1994

Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö

Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja
48/1994

Päällystettyjen teiden heijastus- halkeilun esto

Esiselvitys

Tielaitos
Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö

Oulu 1994

TIEL 400088
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1994

Julkaisun kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2562

Tielaitos

Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö
Kansankatu 47
PL 261
90101 OULU
Puh. (981) 310 9383

Aiheluokka 32, 70

Asiasanat: halkeilu, asfalttibetonipäällysteet

TIIVISTELMÄ

Esiselvityksen tarkoituksena on ollut kirjallisuutta tutkimalla selvittää halkeamien merkitystä, heijastushalkeilua ja sen estämismenetelmiä sekä tehdä esitys tarpeellisista jatkotutkimuksista. Selvitys sisältää yleisen osan ja sen pohjalta laaditun jatkotutkimussuunnitelman.

Halkeamien inventointi ja kartoitus tehdään Suomessa nykyisin silmämääräisesti. Halkeamavaurioiden silmämääräisestä havainnoinnista ollaan luopumassa mittaus- ja tulkintatekniikan kehittyessä riittävän tarkaksi.

Päällystehalkeamat johtuvat liikennesituaatioista, routanousu- ja painumeroista, rakennevirheistä tai lämpötilamuutoksista. Erityisesti puolijäykillä päällysrakenteilla halkeilu on yleinen ongelma.

Halkeama voi avautua taivutuksen, leikkauksen tai repeämisen takia. Alkuvaiheessa syntyy erillisiä mikrohalkeamia, jotka yhtyvät toisiinsa ja lopulta muodostuu näkyvä, koko kerroksen läpäisevä halkeama. Eri syistä johtuvat halkeamat voivat kehittyä verkkohalkeiluksi.

Halkeamaleveys vaikuttaa halkeaman kuormansiirtokykyyn. Halkeaman liikkeen suuruus määrää käytettävän korjausmenetelmän. Korjaustapaa suunniteltaessa pitää pystyä erottamaan, mistä syystä halkeama on syntynyt. Routan aiheuttamat halkeamat vaativat muita järeämpiä ratkaisuja.

Halkeamat huonontavat ajomukavuutta, lisäävät tiehen kohdistuvia rasituskia ja heikentävät tierakennetta. Tien kunnan ja siitä vastaavan tienpitäjän kannalta halkeamilla on selvä taloudellinen merkitys.

Heijastushalkeamilla tarkoitetaan päällystämisen jälkeen tien pinnalla näkyviä halkeamia, jotka sijaitsevat samalla kohtaa kuin alla olevan sidotun kerroksen halkeamat. Routanousuerosta johtuvien halkeamien heijastumisesta voisi käyttää termiä routaheijastushalkeamat.

Halkeamien heijastumista pyritään estämään kuitu- ja verkkolujitteilla, joustavammalla sideaineella tai välikerroksen avulla. Heijastushalkeamien laskennallinen hallinta on vaikeaa perinteisillä mitoitusmenetelmillä. Kehitteillä on elementtimenetelmiä, joilla pyritään mallintamaan halkeaman muodostumista ja heijastushalkeilun estomenetelmiä.

Keywords: crack, asphalt pavement, reflective cracking

ABSTRACT

The goal of this literature survey was to study reflective cracking, consequences of the cracks and how to prevent cracking. A plan for further research is presented.

Visual distress surveys in Finland are made for PMS-purposes. The cracks and distresses are sorted by their type and severity and stored as sums of each group for each road section of 100 meters. A combined distress index is calculated from this data. On project level visual investigation and manual mapping are used. Visual survey has many disadvantages and some optical methods are coming to replace visual methods.

The initial reasons of cracking are traffic loads, differential frost heave, differential settlement, construction fault or temperature changes. When cement bound layers are used, shrinkage cracking after construction is a common problem.

There are three modes of crack initiation: bending, parallel shear and vertical shear. At first separate microcracks appear. Microcracks connect together forming macrocracks. Macrocracks connect and finally there is a visible crack through the pavement. Cracks of different origin can develop with time to alligator cracking.

New element methods can be the appropriate design tools to calculate the life time of additional asphalt layers in cases of cracked pavement where traditional analytic or empirical methods have some problems. With special elements the analysis of reflection cracking and some preventive methods is possible.

Crack width affects the load transfer capacity. The repair methods must be compatible with the amount of crack movement. Choosing the right method to repair or prevent cracking requires that the cause of crack must be known. Frost heave cracking leads to heavier repair measures.

Fabrics and grids are used as preventive methods of reflective cracking. Modified bitumen and stress absorbing layers are also used.

Cracks decrease riding comfort, increase road stresses and weaken the road structure. Affecting the structural soundness of road, cracking has economical importance to the road maintaining authority.

Reflective crack as a term should mean the crack that, after laying a new pavement, comes visible in the same place than a crack in underlying bound course. If frost is the cause of a such crack, it should be called as a frost reflective crack.

ALKUSANAT

Päällystehalkeamat ovat hyvin yleisiä tieverkollamme. Ne ilmentävät aina jonkin asteista tierakenteen vaurioitumista. Vaurioituneelle rakenteelle on ominaista nopea heikkeneminen liikenteen ja sään vaikutuksesta. Siksi halkeamien korjaaminen oikeaan aikaan ja oikealla tavalla on erittäin tärkeää. Korjaustoimenpiteistä huolimatta halkeamilla on taipumus uusiutua (heijastua) uudelleenpäällystämisen jälkeen. Onnistuneen korjaustoimenpiteen valinnan perusedellytys on halkeaman syyn tunnistaminen, mikä on käytännössä vaikeaa, koska halkeamat syntyvät eri tavoin ja erilaisten tekijöiden vaikutuksesta.

Suomessa päällysteiden heijastushalkeilua on tutkittu toistaiseksi vähän. Sen sijaan ulkomaista kirjallisuutta on saatavissa runsaasti. Suomen ilmast- ja maaperäolosuhteet poikkeavat kuitenkin usemmista muista maista niin paljon, että ulkomainen tieto ei ole sovellettavissa sellaisenaan Suomen olosuhteisiin. Tämän vuoksi Oulun kehitysyksikkö käynnisti vuoden 1994 alussa heijastushalkeilua koskevan tutkimusprojektin.

Tutkimus aloitettiin esiselvityksellä, jonka tavoitteena oli selvittää heijastushalkeilua ja sen ehkäisymenetelmiä sekä esittää tarpeelliset jatkotutkimukset. Jatkotutkimusten keskeisiä kysymyksiä ovat heijastushalkeilun yleisyys, merkitys liikennöitävyyteen ja tienpitoon sekä halkeilun estäminen. Tätä ennen heijastushalkeamat pitää pystyä tunnistamaan käytännössä syiden perusteella, varsinkin roudan aiheuttamat halkeamat tulee erottaa muusta halkeilusta. Esiselvitysvaihetta ei ole rajattu tiukasti käsitteeseen heijastushalkeilu, vaan on katsottu välttämättömäksi tarkastella yleisesti päällystehalkeamia ja edetä asteittain heijastushalkeamiin.

Tässä esiselvitysraportissa on esitetty tarpeellisiksi katsotut lisätutkimukset, jotka tulisi käynnistää vuosina 1995 - 96. Mikäli heijastushalkeamien merkitys Suomen olosuhteissa osoittautuu ennakoitua vähäisemmäksi, esitetyillä jatkotutkimuksilla on yleisesti hyödynnettävää merkitystä päällystehalkeilun hallintaan liittyvissä ongelmissa.

Esiselvitys on tehty yhteistyössä tielaitoksen geokeskuksen Oulun kehitysyksikön, tielaitoksen tutkimuskeskuksen, Oulun tiepiirin ja Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion kanssa. Kehitysyksiköstä työryhmään ovat kuuluneet ins. Heikki Vesa (pj), DI Seppo Salmenkaita ja rkm Martti Heikkinen, tutkimuskeskuksesta DI Ismo Iso-Heiniemi, tiepiiristä rkm Antero Pohjanen ja yliopistosta TkL Jouko Belt ja DI Harri Kotimäki.

Projektiin liittyen Oulun kehitysyksikkö on tehnyt maastohavainto- ja vaurio-kartoitustyötä sopiviksi katsotuilla jatkotutkimuskohteilla. Julkaisun laativat H. Kotimäki ja J. Belt.

Oulussa marraskuussa 1994

Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö



SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	HALKEAMAT SUUNNITTELUPERUSTEENA	10
2.1	Halkeamat PMS-järjestelmissä	10
2.2	Halkeamat päällysteen mitoituksessa	12
3	PÄÄLLYSTEHALKEAMAT	14
3.1	Eri tekijöistä johtuva halkeilu	14
3.1.1	Liikenne	14
3.1.2	Routanousuero	16
3.1.3	Painumaero	17
3.1.4	Rakennevirheet	18
3.1.5	Puolijäykät päällysrakenteet	19
3.1.6	Lämpötilaero	21
3.2	Vuodenaikojen merkitys vaurioitumiseen	22
3.3	Vauriomekanismit	24
3.3.1	Halkeaman syntymisen perusmallit	24
3.3.2	Halkeaman vakavuus	26
3.3.3	Halkeamavaurion kehittyminen	28
3.4	Halkeamien tunnistaminen käytännössä	28
3.4.1	Tien kuntotietojen hyväksikäyttö suunnittelussa	28
3.4.2	Halkeamien mittaaminen käytännössä	33
3.4.3	Halkeamien syiden analysointi	34
4	HALKEAMIEN MERKITYS	38
4.1	Tienkäyttäjän kannalta	38
4.2	Tierakenteen kannalta	40
4.3	Tienpitäjän kannalta	41
5	HALKEAMAN HEIJASTUMISEN ESTÄMINEN	43
5.1	Menetelmät	43
5.2	Ennustamismetodit	45
5.2.1	Terminen halkeilu	45
5.2.2	Liikennekuormitus	48
5.3	Heijastushalkeaman määritelmä	48
6	JATKOTUTKIMUSSUUNNITELMA	50
6.1	Tutkimustarpeet ja -menetelmät	50
6.1.1	Halkeamat tieverkkotasolla	50
6.1.2	Yksittäiset halkeamat	50
6.1.3	Halkeamien kehittyminen	51
6.1.4	Eri syistä johtuvien halkeamien erottelu	52
6.1.5	Halkeamien heijastuminen	52
6.1.6	Halkeamien heijastumisen estäminen	53
6.1.7	Halkeamien luokittelu	53
6.1.8	Halkeamien käytännön mittaaminen	54
6.2	Tutkimukset	54
6.2.1	Yleistä	54

6.2.1	Tilastollinen tarkastelu	55
6.2.3	Kenttämittaukset	55
6.2.4	Laboratoriokokeet	57
6.2.5	Laskennalliset menetelmät ja halkeamien luokittelu	58
6.2.6	Halkeamien käytännön mittaaminen	59
7	KIRJALLISUUSLUETTELO	60

1 JOHDANTO

Tärkein uudelleenpäällystämisen syy on pääteillä urautuminen ja alemman luokan tiestöllä - sekä kesto- että kevytpäällysteteillä - vaurioituminen. Epätasaisuus on yleensä vain myötävaikuttavana syynä. Kaikista AB-teiden kunnostuksista on urautumisen osuus useimmiten noin 50 - 70 % ja vaurioitumisen (+ epätasaisuuden) osuus noin 20 - 40 %. Kaikista kevytpäällysteiden uusimisista vaurioitumisen (+ epätasaisuuden) osuus on noin 80 - 90 % /2/. Päällystevauriot muodostuvat pääosin erilaisista halkeamista. Päällystevaurioihin kuuluvat myös purkautumat, reiät, reunapainumat ja erilaiset paikkaukset.

Halkeamat syntyvät eri tavoin ja erilaisten tekijöiden vaikutuksesta. Kunnostuksen jälkeen halkeamat heijastuvat lähes säännöllisesti uusittuun päällysteeseen alla olevien vanhojen päällystehalkeamien kohdille. Halkeamien heijastumisen ehkäisyn perusedellytys on se, että tunnistetaan tekijät, jotka vaikuttavat halkeilun syntyyn.

Vauriosumma-ajattelu, missä erilaiset vauriot lasketaan yhteen haittakertomien avulla, soveltuu hyvin tieverkkotasolle, mutta hanketasolle se ei sovellu, koska sen pohjalta ei käy ilmi vaurioitumisen syyt. Hanketasolla tulee tietää lisäksi vaurioitumisen vaikeusaste (esim. halkeamien leveys).

Suomen ilmasto- ja maaperäolosuhteet poikkeavat merkittävästi useimmista muista maista, mistä syystä ulkomaisen tiedon siirto Suomen olosuhteisiin on ongelmallista. Ilmasto-olosuhteiden puolesta käyttökelpoisin kokemukseen perustuva tieto lienee saatavissa Ruotsista, Norjasta, Kanadasta ja Yhdysvaltain pohjoisosista.

Esiselvityksen tavoitteena on tyypittää päällystehalkeamat syiden perusteella siten, että ne voidaan tunnistaa käytännössä tiellä. Erityisesti kiinnitetään huomiota, miten epätasaisen routanousun aiheuttama halkeilu voidaan erottaa muusta halkeilusta. Taustalla on ajatus, miten estetään halkeamien heijastuminen. Esiselvityksessä tarkastellaan myös halkeamien merkitystä tienkäyttäjän ja tierakenteen kannalta sekä suppeahkosti halkeamien heijastumisen ehkäisemistä kunnostuksen yhteydessä siten, että voidaan laatia varsinainen tutkimussuunnitelma.

Esiselvityksessä keskitytään pääasiassa AB-teihin. Routavaurioiden korjausmenetelmät, sillat, rummut, putkijohdot ym. erikoisrakenteet rajataan tämän selvityksen ulkopuolelle.

2 HALKEAMAT SUUNNITTELUPERUSTEENA

2.1 Halkeamat PMS-järjestelmissä

Ennen vuotta 1974 päällysteiden uusimisen kriteereistä ei ollut yleistä ohjetta. 1974 käyttöön otettu ohje uusittiin vuonna 1976. Ohjeessa annettiin tien nopeusluokasta ja liikennemäärästä riippuvat rajat keskimääräiselle urasyvyydelle, epätasaisuudelle ja verkkohalkeamien määrälle. Epätasaisuudelle ja verkkohalkeilulle asetetut ylärajat valittiin tarkoituksella niin suuriksi, että ne harvoin määräisivät kunnostustarpeen. Päällyste pyrittiin käyttämään tarkoin loppuun kunnes kulumisurat aiheuttivat uudelleenpäällystyksen. Taloudellisista syistä ohjetta ei aina voitu noudattaa ja käytännössä tiemestarit valitsivat päällystyskohteet /26/.

PMS-kehitystyö alkoi v. 1984 ja 1987 ohjelma oli eräissä piireissä koekäytössä. Aluksi tulostettiin tierekisteritietojen pohjalta ne tieosat, jotka mahdollisesti tarvitsevat kunnossapitoa seuraavan 5 vuoden ajan. Näistä kohteista mitattiin vauriot ja kantavuudet, joista ennustettiin, milloin päällysteen kunto alittaa standarditason. Kunnossapitotoimenpide tuli tehdä ennen ko. alitusta joko optimitoimenpiteenä tai minimitoimenpiteenä raharaameista ja kohteen tärkeydestä riippuen /27/.

Kevästä 1988 alkaen on tiepiireissä tehty tarkkoja järjestelmällisiä vaurioinventointeja päällystetyllä tieverkolla /3/. Päällystettyjen teiden kuntoa seurataan paitsi inventoimalla vaurioita, myös mittaamalla uria, tasaisuutta, liikennettä ja kantavuuksia. Yksittäisen tien tilasta ollaan selvillä tieverkkotasolla, jotta voidaan perustellusti ohjata rahan jakoa sitä eniten tarvitseviin kohteisiin. Tätä tarkoitusta palvelevat tielaitoksen KURRE (kuntotietorekisteri) ja HIPS (Highway Investment Programming System).

Kuntotietorekisteriin KURRE laskettiin vuoden 1993 loppuun saakka poikkihalkeamat, pituushalkeamat, keskisaumahalkeamat, verkkohalkeamat, paikkaukset, reiät ja purkautumat. Erilliseen ryhmään "isot" summattiin kaikkien tyyppien yli 2 cm:n leveät halkeamat (ne laskettiin myös omiin ryhmiinsä).

Viimeisin (1994) inventointiohje /4/ jakaa "päällystesaumahalkeamat", "pituushalkeamat" ja "muut poikkihalkeamat" kahteen luokkaan, kapeisiin ja leveisiin. Paikkauksia ei enää lasketa vauriosummaan. Vanhan järjestelmän aikana tehdyt tiedostot ovat yhteensopivuuden takia muunnettu uuden mukaisiksi. Isot halkeamat on jaettu eri tyyppisiin vaurioiden esiintymissuhteiden perusteella, mistä syystä tietoihin (vuonna -93 ja aikaisemmin inventoituihin) pitää suhtautua tietyllä varauksella.

Uusittu vauriosumman laskentakaava on:

$$\begin{aligned} VS = & [0,1 * 5 * pakkask + \\ & 0,5 * 5 * muupoikkih/kapea + \\ & 1,0 * 5 * muupoikkih/leveä + \\ & 0,5 * pituush + \\ & 1,0 * pituush/leveä + \\ & 0,1 * saumah/kapea + \\ & 0,5 * saumah/leveä + \\ & 1,0 * verkkoh + \\ & 1,0 * reikä + \\ & 1,0 * purkauma] / 100 metristen lukumäärä \end{aligned} \quad (1)$$

Kaavassa 1 kolmen ensimmäisen termin kerroin 5 tarkoittaa halkeamien keskipituutta (kaikki halkeamat eivät ole koko tien levyisiä). Paikkauksia ei enää lasketa vauriosummaan.

PTM-auton mittaustiedoista lasketaan vaurioprosentti kaavalla 2. Vaurio-kartoitusta ei kuitenkaan aina tehdä /30/.

$$\begin{aligned} V\% = & 0,7 * verkkohalkeamat + \\ & 0,2 * pituushalkeamat + 0,1 * (reiät + paikat) \end{aligned} \quad (2)$$

Muulla maailmassa on käytössä PMS-järjestelmiä, joissa lasketaan erilaisia vaurioitumiseen liittyviä tunnuslukuja. Yhdysvalloissa käytetään malleja, joissa erinomaisessa kunnossa olevalle tielle annetaan kuntopistemäärä 100. Erityyppisille vaurioille määritetään vakavuusasteen ja määrän perusteella tehtävät vähennykset. Yhdistelmäindeksin tapauksessa (enemmän kuin yksi vauriotyyppi) korjataan vähennyksiä siten, että yhteisvaikutus ei ylitä arvoa 100. Käytännössä kuntopistevähennykset voidaan tehdä käyrästöjen avulla. Erityyppisten vaurioiden kuntopistemäärät yhdistetään yhdeksi tunnusluvuksi painokertoimien avulla. Esimerkkinä tästä on pintavaurioindeksi SDI, kaava 3 /53/:

$$\begin{aligned} SDI = & 0,1 * bitumin pintaannousuindeksi + 0,13 * purkaumaindeksi + \\ & 0,2 * verkkohalkeamaindeksi + \\ & 0,25 * poikki/pituushalkeamaindeksi + \\ & 0,05 * reunavaurioindeksi + \\ & 0,12 * levennyksen porrastumaindeksi + \\ & 0,15 * uraisuusindeksi. \end{aligned} \quad (3)$$

Verkkohalkeamien vakavuusaste verkkohalkeamaindeksissä (AC, kaava 4) voidaan ottaa huomioon esimerkiksi seuraavasti /54/:

Valitaan asteikko siten, että luku 100 vastaa erinomaista ja 60 kunnostamistarpeessa olevaa tietä. Määritellään vakavuusasteittain suurimmat sallitut vauriomäärät ennen kunnostustarvetta; esim. voidaan sallia 100 % lieviä, 50 % keskinkertaisia ja 10 % vakavia verkkohalkeamia (pinta-alasta lasket-

tuna). Kun on kysymys vähennyksistä ($100 - 60 = 40$), saadaan kyseisen indeksin painokertoimiksi vakaville verkkohalkeamille $4 (= 40/10)$, keskinkertaisille $0,8 (= 40/50)$ ja lieville $0,4 (= 40/100)$.

$$AC = 4 * (\text{vakavia verkkohalkeamia, \%}) + 0,8 * (\text{keskinkertaisia, \%}) + 0,4 * (\text{lieviä, \%}). \quad (4)$$

2.2 Halkeamat päällysteen mitoituksessa

Tielaitoksen käyttämä päällysteiden mitoitusmenetelmä perustuu tavoitekantavuusajatteluun. Vaiheittain rakentamista pidetään edullisena, koska kulumisurien takia tie joudutaan kuitenkin päällystämään 4 ... 6 vuoden välein. Jos vauriosumman kasvu on ollut hyvin hidasta, vaaditaan parantamisen yhteydessä vain 80 % uuden tien tavoitekantavuudesta. Mitoituksen tarkoituksena on, että päällysteen paksuus vaihtelee vaurioitheyden mukaan /29/.

Päällysteiden analyttinen mitoitus perustuu malliin, jossa halkeamien syntyminen ennustetaan tietyn kuormituskertaluvun jälkeen päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksen perusteella. Yleinen muoto mallille on

$$N = k \varepsilon^b \quad (5)$$

missä N on murtumiseen johtaneiden kuormituskertojen määrä
 ε on suhteellinen vetomuodonmuutos
 k ja b ovat kokeellisia parametrejä

Mallin (5) rajoitus on siinä, että se pätee vain ehjän päällysteen väsymiseen. Toinen tapa lähestyä halkeilua on mallintaa halkeaman etenemistä. Silloin oletetaan, että päällysteen rajalla on jo ennen ensimmäistäkään liikennekuormitusta olemassa alkuhalkeama /1/.

Usein käytetään jotakin elementtimenetelmää, jossa halkeaman etenemistä kuvataan Parisin (1961) esittämällä teoreettisella mallilla

$$da / dN = A (K)^n \quad (6)$$

missä da / dN on halkeaman korkeuden kasvu kuormitusjaksoa kohti
 A , n ovat materiaalivakioita ja
 K on jännityksen vaikutuskerroin, joka kuvaa jännitystilaa halkeaman kärjessä

Teoreettisen mallin (6) parametrit on sovitettava käytettäville materiaaleille, mikä tapahtuu laboratoriotutkimusten avulla. Laboratoriossa määritetyt väsymissuorat täytyy myös muuntaa käytäntöä vastaavaksi.

Murtumishetken määrittäminen ei ole aivan yksikäsitteistä. Laboratorio-kokeissa, jotka tehdään vakiojännityksellä, kappale murtuu lopussa kokonaan. Jos kokeissa käytetään vakiovenymää, kappale katsotaan murtuneeksi silloin, kun sen jäykkyys on laskenut puoleen alkuperäisestä /48/. Koska halkeama alkaa päällysteen alapinnasta hiushalkeamalla, tiellä sitä ei voi vielä alkuvaiheessa havaita. Aika, joka kuluu halkeaman etenemiseen pintaan saakka, voi olla hyvin pitkä tai murtuminen tapahtuu melkein heti.

Useamman päällystekerroksen käsittely yhdessä toimivana sidottuna kerroksena on osoittautunut ongelmalliseksi. Rakenteen parantamisen suunniteluohjeen (1991) mukaan vanhat ja uudet kerrokset lasketaan yhdeksi kerrokseksi. Samassa ohjeessa sanotaan, että asfalttipäällysteiset tiet tulisi kunnostaa heti pituushalkeamien ilmestyttyä (ennen verkkohalkeilua), mikäli päällysteen kantavuutta halutaan käyttää myöhemmin täysipainoisesti hyväksi. SHRP-LPPT -koeteistä saadun kokemuksen perusteella (1993) materiaalimoduulien ja vaurioiden välinen korrelaatio ei ole enää kovin hyvä, kun rakenteessa on kaksi asfalttikerrosta /31/. Tämä vaikeuttaa kestoajan ennustamista.

3 PÄÄLLYSTEHALKEAMAT

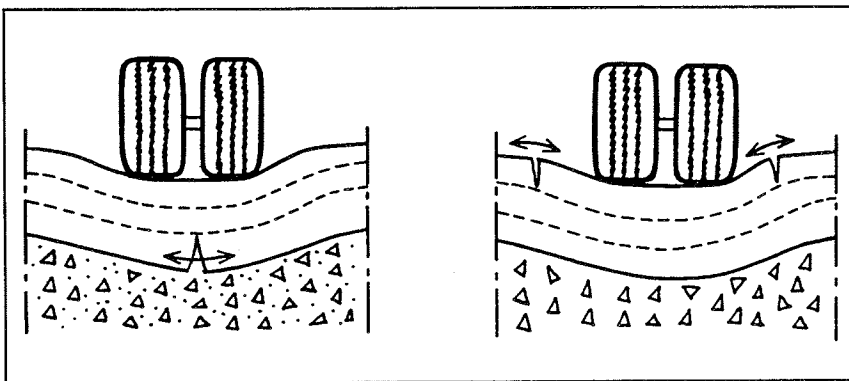
3.1 Eri tekijöistä johtuva halkeilu

3.1.1 Liikenne

Raskas liikenne aiheuttaa tierakenteeseen jännityksiä ja muodonmuutoksia. Päällysrakenteen sidotun yläosan tehtävänä on ottaa vastaan vetojännitys, jonka suuruus riippuu lineaarisen kimmoteorian mukaan paitsi kuormituksesta ja sidotun kerroksen paksuudesta myös sidotun kerroksen ja sen alla olevien kerrosten jäykyydestä.

Yleisesti hyväksytty tien analyttinen mitoitusmenettely keskittyy päällysteen alapinnan vetomuodonmuutokseen sekä alusrakenteen puristusjännitykseen tai -muodonmuutokseen. Kimmoteorian mukaan halkeama syntyy päällysteen alapinnassa.

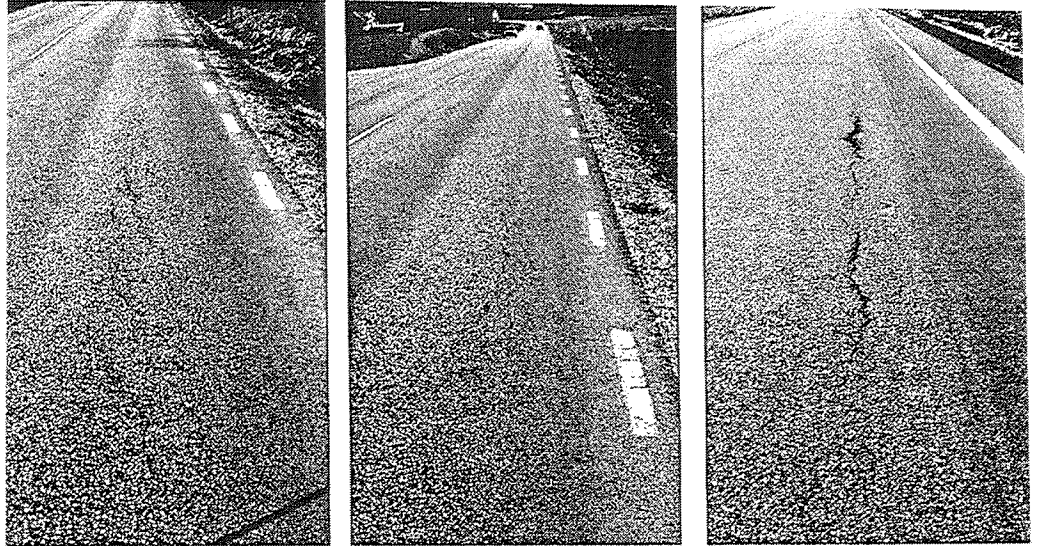
Päällysteen yläpinnassa vaikuttaa myös leikkausvoimia, jotka suuntautuvat kohti renkaan kosketuspinnan keskustaa. Tämä voima aiheuttaa vetojännityksen aivan kuormituspinnan reunan läheisyydessä. Pinnansuuntainen voima heikkenee kuitenkin nopeasti syvyyden funktiona (paksu asfaltti). Tavallisissa rakenteissa tämä pinnan venymä on vain 15 % vastaavasta alapinnan venymästä. Kuitenkin, jos kantava kerros on jäykempi kuin päällyste (esim. maabetoni), muodonmuutokset ovat yläpinnassa suhteellisesti suurempia kuin alapinnassa /1/. A. Molenaar on esittänyt, että halkeama voi alkaa asfaltin pinnalta, kun pudotuspainolaitteella määritettyjen taipumien d_0 ja $d_{50\text{cm}}$ erotus (SCI) on pienempi kuin 100 mm /19/. Asiaa havainnollistaa kuva 1.



Kuva 1: Halkeamien alkukohta /5/

Raskaan liikenteen aiheuttama halkeilu alkaa pyöräurien pohjalla tai niiden vieressä pituushalkeamilla, jotka sitten laajenevat verkkohalkeamiksi. Jos suunniteltu päällysteen kestoikä on täyttynyt, näin tulee tapahtuakin. Kun

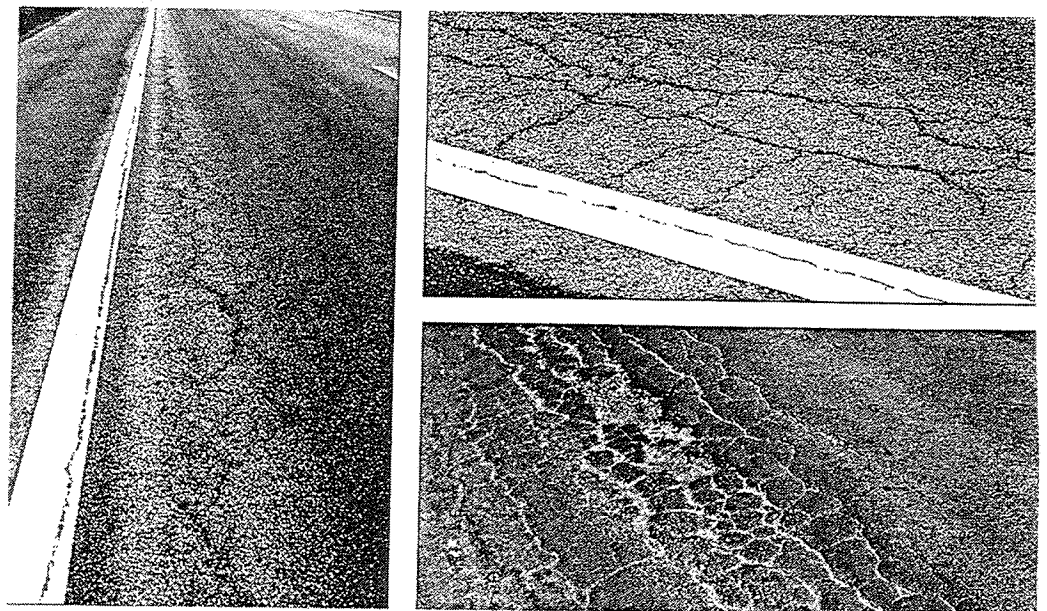
halkeama syntyy, muuttuu tierakenteen jännitystila alusrakenteen osalta ja sitä kautta painumia (urautumista) voidaan odottaa.



Kuva 2: Eri asteisia liikenteen aiheuttamia pituushalkeamia /5/

Halkeamat ovat alussa kapeita ja yksittäisiä, myöhemmin leveämpiä ja yhdistyneitä pituushalkeamia, jotka sijaitsevat pyöräurassa tai sen reunassa. Näihin kuuluvat myös lyhyet poikkihalkeamat, jotka ovat pyöräurassa.

Kuvan 2 halkeilu voi kehittyä verkkohalkeiluksi (kuva 3). Verkkohalkeilua voi myös kehittyä muista kuin liikenteestä alkunsa saaneista halkeamista esim. pakkaskatkojen yhteyteen.



Kuva 3: Eri asteista verkkohalkeilua /5/

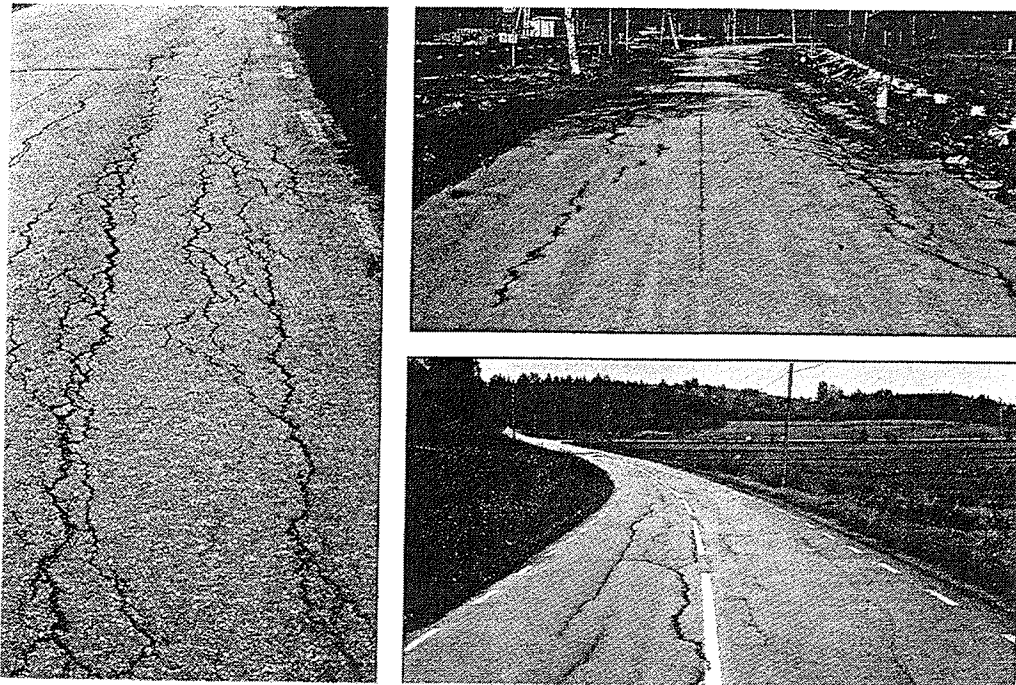
Halkeamat ovat alkuvaiheessa pääosin pituushalkeamia, joihin liittyy lyhyitä poikkihalkeamia. Myöhemmin voidaan nähdä selvästi erillisiä palasia, jotka muodostavat verkkokuvion.

3.1.2 Routanousuero

Routanousut ovat useimmiten epätasaisia johtuen alusrakenteen maalajiominaisuuksien, routimisolosuhteiden ja rakennetekijöiden vaihteluista. Syntyneet vauriot ovat yleensä erilaisia päällysteen halkeamia, pituussuuntaisia halkeamia, poikkihalkeamia ja epämääräisiä ajokaistahalkeamia. Epätasainen routanousu johtuu tien poikkileikkauksessa tavallisesti siitä, että lumi ehkäisee roudan tunkeutumista tien reunaosille ja tien ulkopuolelle.

Routivuuserot tierakenteessa ovat mahdollisia myös esimerkiksi sivukaltevassa maastossa (veden virtaus ylärinteeltä, poikkisuunnassa kiilamainen pengertäyte), tai kun tietä on levennetty /2/.

Epätasaisen routimisen aiheuttama pituussuuntainen halkeama voi sijaita tien keskiliinjalla, ajokaistalla tai tien reunassa. Halkeama syntyy suurimman kulmanmuutoksen kohdalle. Tien leveys vaikuttaa halkeaman sijaintiin. Kun tie on 12 - 13 m leveä, halkeama tulee tien reunaosalle. 7,5 - 9 m leveillä poikkileikkauksilla keskihalkeamien todennäköisyys on suurin. Reunahalkeamia ja ajokaistahalkeamia on eniten kapeilla teillä. Routahalkeamaa kuvataan kiemurtelevaksi halkeamaksi. Ne ovat säännönmukaisesti leveitä ja syviä /3,4,5/ (kuva 4).



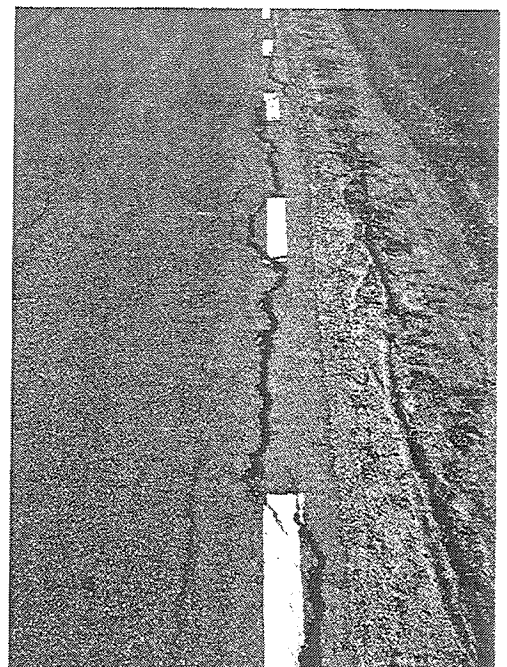
Kuva 4: Eri asteista routahalkeilua /5/

Routahalkeaman viereen voi syntyä uusia pituussuuntaisesti kiemurtelevia halkeamia. Vaurio kehittyy ja muuttuu verkkomaiseksi halkeiluksi.

3.1.3 Painumaero

Vanhan tien ja levennetyn osan rajakohtaan syntyvän pituushalkeaman syynä voi olla myös levennetyn tieosan painuminen (kuva 5). Epätasainen painuminen tiepoikkileikkauksessa voi luonnollisesti aiheuttaa halkeamia muutoinkin /2/. Painumien syynä voi olla sivutuen puute, maalajierot, erot kosteustilassa tai eroosio. Tierakenteen halkeilun syy voi löytyä jopa yli 20 vuotta aikaisemmin tehdystä tien leventämisestä etenkin, jos tien alla on turvekerros /35/.

Tien reuna-alueen kantavuus on heikompi kuin ajoradan keskellä. Kapeilla teillä syntyy reunapainumia, jotka osittain voidaan kytkeä päällysrakenteen mitoitusongelmaan eli liikenteen aiheuttamiksi ja osittain ne johtuvat tien reuna-alueen puutteellisesta tiivistämisestä - kuitenkin perussyö on tien kapeus.



Kuva 5: Painumahalkeama tien reunassa /5/

Reunassa oleva halkeama voi syntyä myös roudan tai liikenteen vaikutuksesta.

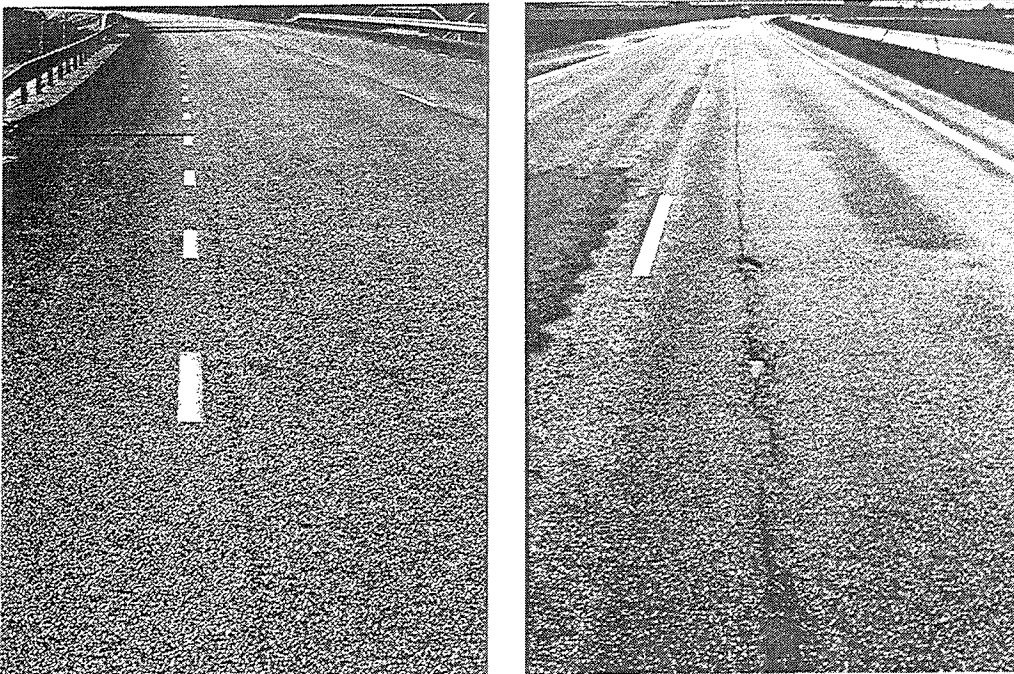
3.1.4 Rakennevirheet

Huono tiivistys tai puutteellinen kuivatus ovat esimerkkejä työ- ja suunnittelu- virheistä, jotka saattavat aiheuttaa painumaeroja ja niin muotoin myös halkeilua. Lisäksi kerrospaksuudet saattavat vaihdella huomattavasti samoin kuin materiaalien rakeisuudet (lajittumat). Virheet tulevat esille halkeiluna liikenteen ja veden vaikutuksesta.

Veden kerääntyminen halkeamien kohdalle on haitallista. Rakenteeseen imeytyvän veden määrä riippuu sekä halkeamaleveydestä että sateen kestosta. Vesi voi tulla tierakenteeseen myös pientareesta tai luiskasta, koska rakennekerrokset läpäisevät vettä yleensä paremmin vaaka- kuin pystysuunnassa (pitkäkestoisen sateen vaikutus vettä läpäisevillä luiskilla ja pientareilla ulottuu noin metrin päähän päällysteen reunasta /40/). Useimpien materiaalien vedenläpäisevyys pienenee voimakkaasti tiiviysasteen kasvaessa niin, että 100 %:n tiiveydessä vedenläpäisy on noin kymmenesosa siitä, mitä se on 95 %:n tiiveydessä (parannettu Proctor) /41/.

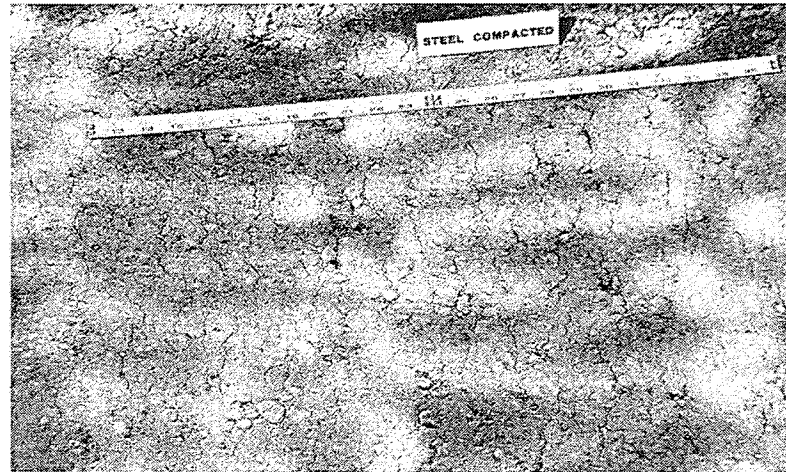
Myös eri rakennekerrosten välinen kitka vaikuttaa tierakenteen jännityksiin. Päällysteen kestoikä alenee, jos sen ja alapuolisen kerroksen välinen sidos on huono /18/.

Päällystystyön virheet, kuten harvat saumat ja jyräyksessä syntyvät halkeamat, nopeuttavat vaurioitumista. Keskihalkeama katsotaan inventoitaessa päällystesaumahalkeamaksi, jos se on lähempänä kuin 25 cm oletetusta keskisauman paikasta /4/ (kuva 6).

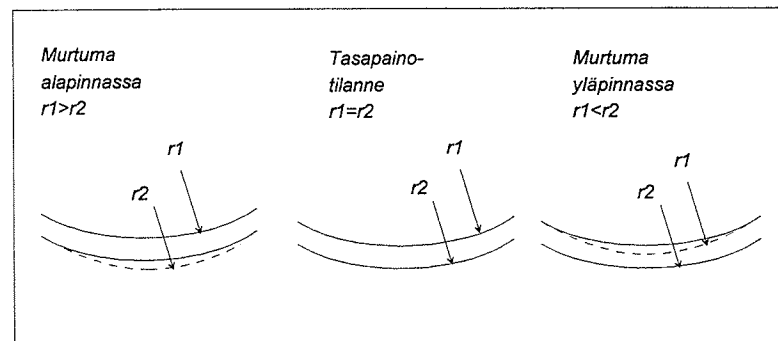


Kuva 6: Saumahalkeamia /5/

Tiivistettävään asfalttikerrokseen syntyy sileällä valssijyrällä jyrättäessä väistämättä halkeamia (kuva 7). Esitetyn teorian /36/ mukaan taipumasäteiden ero johtuu sekä pyöreästä valssista että päällysteen alla olevan kerroksen ja jyrän valssin jäykkyyserosta (kuva 8). Jyrän kääntäminen, jyrkkä mäki tai liian sileä alusta taas aiheuttavat asfalttimassan vaakasuoraa siirtymistä.



Kuva 7: Jyräyshalkeamia /47/



Kuva 8: Halkeaman alkukohdan määräytyminen /47/

Päällystystöiden urakka-asiakirjojen mukaan yksittäisistä halkeamista ja vähäisistä verkko- hius- tai muista halkeamista määrätään arvonalennus (1 ... 2 x neliöhinta). Verkkohalkeama-alueelta on päällyste työn aikana yleensä uusittava ja aina sellaisissa tapauksissa, kun halkeamat ulottuvat päällystekerroksen läpi /45,46/. Takuuaika on 1 vuosi.

3.1.5 Puolijäykät päällysrakenteet

Puolijäykällä päällysrakenteella tarkoitetaan rakennetta, jossa kantava tai jakava kerros on tehty maabetonista tai vastaavan kaltaisesta materiaalista ja päällyste on asfalttibetonia. Kun tiessä käytetään sementin tapaan hyd-

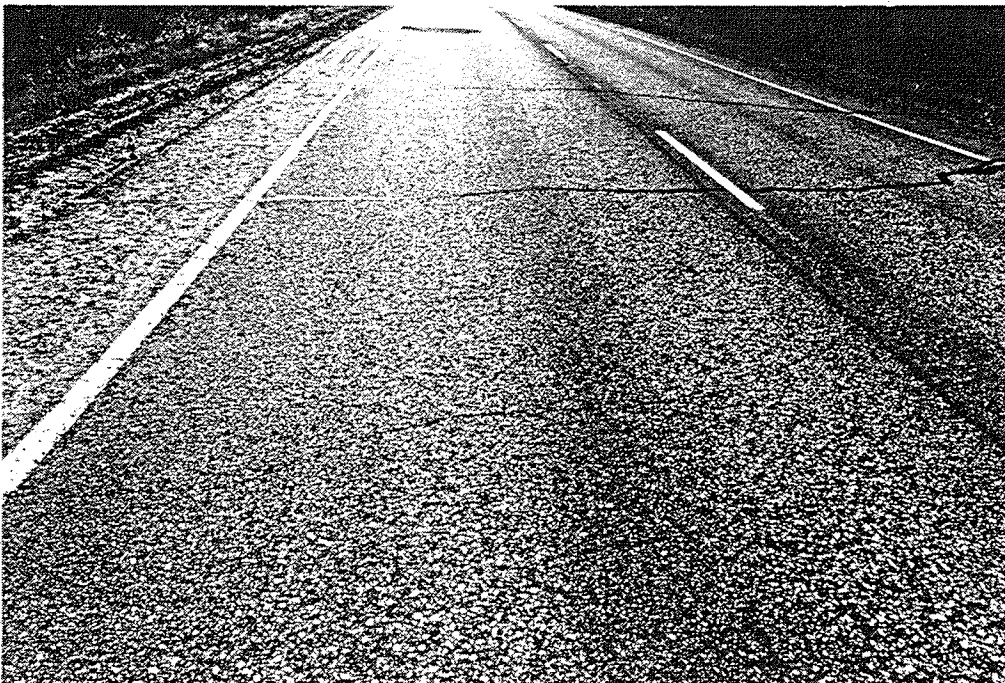
raulisesti sitoutuvia aineita, syntyy sitoutumisen ja kuivumisen takia kutistumisjännityksiä.

Myös masuunihiekkaa pidetään hydraulisesti sitoutuvana materiaalina, jonka sitoutumista voidaan vielä kiihdyttää pienellä määrällä esim. kalkkia, lipeää tai sementtiä. Yksinään kuonan sitoutuminen on hidasta.

Kerros halkeilee myös lämpöjännitysten takia. Nämä halkeamat näkyvät pian myös asfalttipäällysteessä. Sementillä sidottu jäykkä rakenne on herkkä epätasaisille routanousuille, jolloin myös tästä syystä syntyy tierakenteeseen lisää halkeamia. Masuunihiekan käyttö lisää jossakin määrin tiepäällysteen poikkihalkeamia /24/.

Maabetoni- ja kuonakohteissa sitoutuminen saattaa olla epätasaista. Kuona on sivutuote, jonka sitoutumisominaisuus voi vaihdella tuote-erittäin. Paikallasekoitusmenetelmällä tehtävien stabilointien yhteydessä voi sekä sideaineen jakautuminen että stabiloitavan materiaalin laatu vaihdella. Erot johtavat kantavuuden vaihteluihin, painumaeroihin ja sitä kautta halkeiluun.

Vt 20:llä tehtiin stabilointikokeiluja v. 1987. Poikkihalkeamia tuli sementtistabiloinnin osuudelle runsaasti. Yksi syy oli se, että päällyste rakennettiin suoraan stabiloinnin päälle (kuva 9).



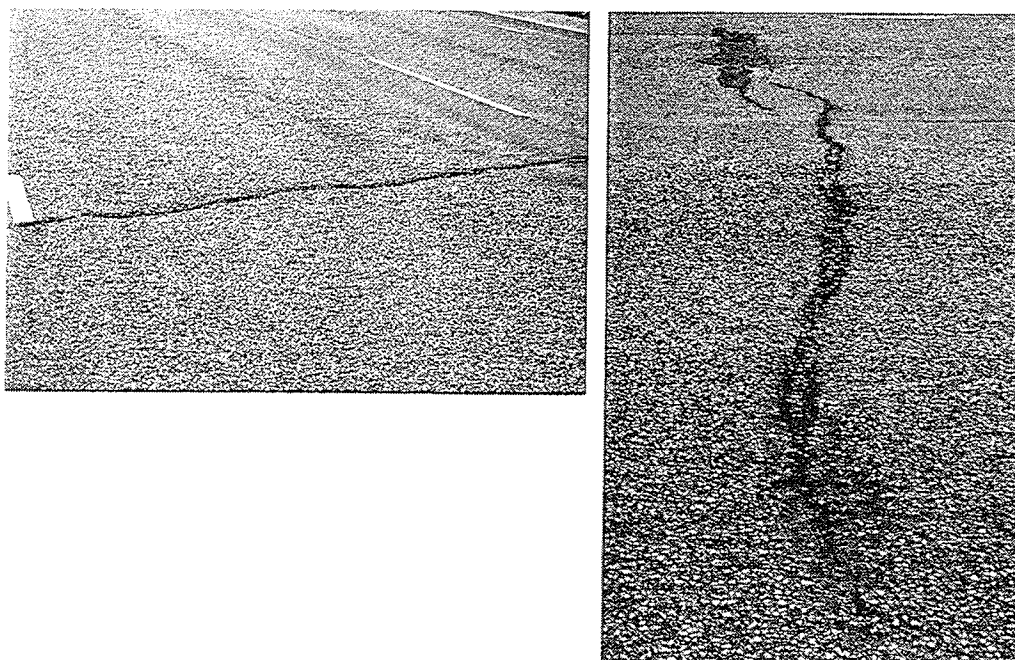
Kuva 9: Sementtistabiloidun tien poikkihalkeamia

3.1.6 Lämpötilaero

Termisten kuormitusten suhteen ainoastaan sidotut kerrokset ovat ongelmallisia. Tässä suhteessa bitumilla sidotut joustavat rakennekerrokset toimivat eri tavalla kuin hydraulisilla sideaineilla sidotut jäykät rakenteet. Bitumilla sidotuilla rakenteilla yleensä vain alhaiset lämpötilat aiheuttavat ongelmia termisten jännitysten suhteen. Sen sijaan jäykillä rakenteilla lämpötilan muutokset kaikissa lämpötiloissa aiheuttavat kutistumishalkeamaisriskin.

Bitumilla sidotuilla rakenteilla on sulassa tilassa yleensä riittävä joustavuus termisiä kuormituksia vastaan. Sen sijaan rakenteen lämpötilan laskiessa alhaisiin pakkaslukemiin kasvaa bitumilla sidotun kerroksen jäykkyys niin suureksi, että se ei enää kykene ottamaan vastaan lämpötilamuutosten aikaansaamia termisiä kuormituksia vaurioitumatta.

Päällysteen lämpöliikkeet aiheuttavat poikkittaisia halkeamia (kutistumishalkeamia, kuva 10). Halkeama syntyy joko päivittäisten väsyttävien lämpötilavaihtelujen takia tai silloin, kun päällysteen kutistumisesta aiheutuva jännitys ylittää sen vetolujuuden. Päällysteen alla olevan sidotun kerroksen lämpöliikkeet aiheuttavat jännityksiä päällysteeseen. Sementillä sidotun kantavan kerroksen laattojen käyristyminen lämpötilaerojen takia voi myös aiheuttaa ylimääräisen vetojännityksen. Itse sementillä sidotun kerroksen halkeaminen tapahtuu jo melko pienellä pakkasella. Sora-sementtikappaleissa jo lämpötilan laskeminen 6 °C aiheutti halkeamisen, hiekka-kuonakappaleilla vastaava arvo oli 10 - 15 °C /24/.



Kuva 10: Poikkihalkeamia /5/

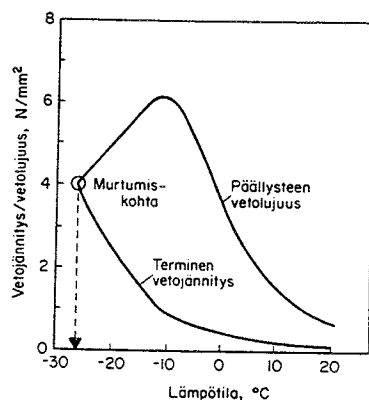
Lämpötilan vaikutusta suhteelliseen muodonmuutokseen ja jännitykseen kuvaavat yleiset kaavat (7 ja 8)

$$\varepsilon_T = \alpha * \Delta T \quad (7)$$

$$\sigma_t = E * \alpha * \Delta T \quad (8)$$

joissa: α on lämpölaajenemiskerroin
 ε_T on kutistuma vapaassa tilassa
 ΔT on lämpötilan muutos
 σ_t on estetyin muodonmuutoksen aiheuttama jännitys
 E on kimmomoduuli

Kaavojen käyttö edellyttää, että materiaali käyttäytyy lineaarisesti kimmoisella tavalla, mikä ei päde asfaltilla. Kuva 11 esittää asfalttipäällysteen vetolujuuden ja termisen vetojännityksen kehittymistä lämpötilan funktiona. Käyrät vastaavat suunnilleen bitumia B-80 /28/.



Kuva 11: Termisen vetojännityksen ja päällysteen vetolujuuden riippuvuus lämpötilasta /52/

3.2 Vuodenaikojen merkitys vaurioitumiseen

Tierakenteet ovat huonon kantavuuden ajanjaksoina alttiimpia vaurioitumaan kuin esim. kesällä, jolloin kantavuus on suurimmillaan. Tämä näkyy selvästi oheisen taulukon mukaisissa AASHO-tiekokeessa saaduissa vuodenaikojen vaurioitumiskertymissä /7/.

Taulukko 1: Tien vaurioituminen eri vuodenaikoina /7/

Vuodenaika	Vaurioitumisosuus, %	Liikenteen osuus, %
Talvi	28	22
Kevät	60	24
Kesä	2	30
Syksy	20	23

Vuodenaikojen vauriokertymät noudattavat talvea lukuunottamatta kanta-
vuoden vaihtelua. Talven vauriot johtuvat pakkasesta ja roudasta. Päällystettä arvioitiin siten, että vaurioituneeksi katsottiin taso PSI = 1,5. (PSI si-
vulta 39)

Joustavien päällysrakenteiden sidottujen rakennekerrosten - asfalttipäällyste ja kantavan kerroksen yläosa - sideaineena käytetty bitumi on viskoelastinen materiaali. Tästä seuraa, että bitumilla sidotut rakennekerrokset toimivat viskoelastisen materiaalin tavoin. Toisin sanoen niiden kuormituskäyttäytyminen riippuu lämpötilasta ja kuormitusajasta. Lisäksi lämpötilan muutos saa aikaan asfalttipäällysteissä kutistumis- ja laajenemiskäyttäytymisen.

Asfalttipäällysteen sideaine kovettuu koko sen elinkaaren ajan. Kovettuminen tapahtuu pääasiassa hapettumisen kautta. Hapettumista edistää lämpötilan nousu ja auringon ultraviolettisäteily. Sideaineen koveneminen tekee asfalttipäällysteen hauraaksi ja alttiimmaksi erilaisille vaurioitumisille.

Sitomattomissa kitkamaalajeissa lämpötilan kohoaminen saa aikaan maara-
keiden laajentumista. Jos maara-keiden liike on rajoitettu kaikkiin suuntiin, rakeiden väliset kontaktivoimat suurenevät ja tehokas jännitys kasvaa. Tehokkaan jännityksen kasvaminen nostaa maan leikkauslujuutta ja kimmoista jäykkyyttä. Mitä alhaisempi on alkuperäinen jännitystila maassa ja mitä suurempi on maan tiiviys, sitä suurempi on lämpötilan kohoamisen aikaansaama maan jäykkyyden kasvu.

Syksyllä asfaltti kovenee ja kosteuden kasvu heikentää sitomattomia kerroksia. Yhteisvaikutuksena jännitykset lisääntyvät päällysteessä ja vähenevät alempana tiessä. Jännitysten vähenemisestä huolimatta sitomattomien kerrosten pysyvät muodonmuutokset saattavat kasvaa kosteuden lisääntyessä riittävästi. Halkeamista tunkeutuu vettä tierakenteeseen. Veden liike irrottaa hienoainesta, joka liikenteen vaikutuksesta pumppautuu tien pintaan. Halkeaman alle muodostuu tyhjää tilaa, syntyy ympäristöä heikompi kohta ja epätasaisuus kasvaa. Liikenteen dynaaminen rasitusvaikutus lisääntyy.

Talvella lämpötilan laskiessa kutistumisjännitykset päällysteessä kasvavat. Samalla asfaltin jäykkyys ja sen hauraus lisääntyy. Routiminen alkaa paisuttaa rakennetta routivilla teillä. Halkeamia syntyy, jos jännitykset kasvavat

tarpeeksi suuriksi. Olemassaolevat halkeamat laajenevat. Kun lämpötila laskee, sidottu kerros kutistuu ja siinä ollut halkeama avautuu. Halkeaman siirtymistä uuteen päällysteeseen edesauttavat lämpötilan laskiessa myös uuteen päällysteeseen syntyvä vetojännitys ja liikennekuormitus halkeaman kohdalla.

Jäätynyttä tierakennetta pidetään jäykkänä ja taipumat ovat pieniä jo jäykän asfaltinkin takia. Talven liikenteen osuutta suurempi vaurioitumiskertymä taulukossa 1 johtuu tien routanousujen ja pakkasen aiheuttamista vaurioista.

Keväällä ilman lämpötilan kohotessa 0 °C:n yläpuolelle alkaa tierakenne sulaa. Sulaminen etenee pääosin pinnasta alaspäin (noin 70 - 80 % kokonais-sulamisesta) ja se tapahtuu suhteellisen nopeasti. Osaksi sulamista tapahtuu maalämmön johdosta myös routarajalla.

Tien alusrakenteen kantavuus laskee keväisen routasulamisen vuoksi merkittävästi. Kuormitettaessa vedellä kyllästettyä tien alusrakennetta muodostuu maahan huokosveden paine, jonka suuruus on suhteessa kuormituksen alusrakenteeseen synnyttämiin jännityksiin /9/.

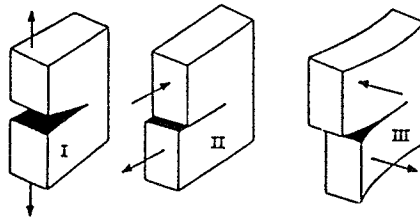
Huokosveden paineen lisäys pienentää tehokasta jännitystä maassa. Tämä saa aikaan maan leikkauslujuuden pienentymisen, kimmoisen jäykkyiden laskemisen ja muodonmuutoksen vastustustuskäyvän huonontumisen.

Tien sitomattomien rakennekerrosten vesipitoisuuden ollessa kriittisen kylästäysasteen (80 - 85 %) yläpuolella heikkenee rakenteiden stabiilisuus oleellisesti ja ne vaurioituvat nopeasti toistuvan kuormituksen alaisena /10,11/. Vaurioituminen merkitsee epätasaisia muodonmuutoksia, painumia ja urautumista.

3.3 Vauriomekanismit

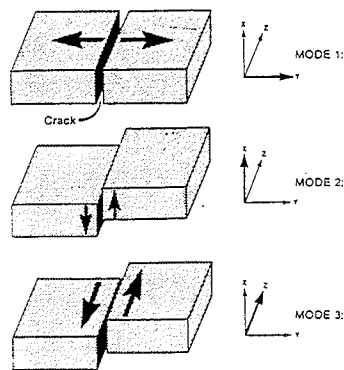
3.3.1 Halkeaman syntymisen perusmallit

Halkeaman perusmuodot ovat taivutus (mode I), leikkaus (mode II) ja repeäminen (mode III) /6/. (kuva 12)



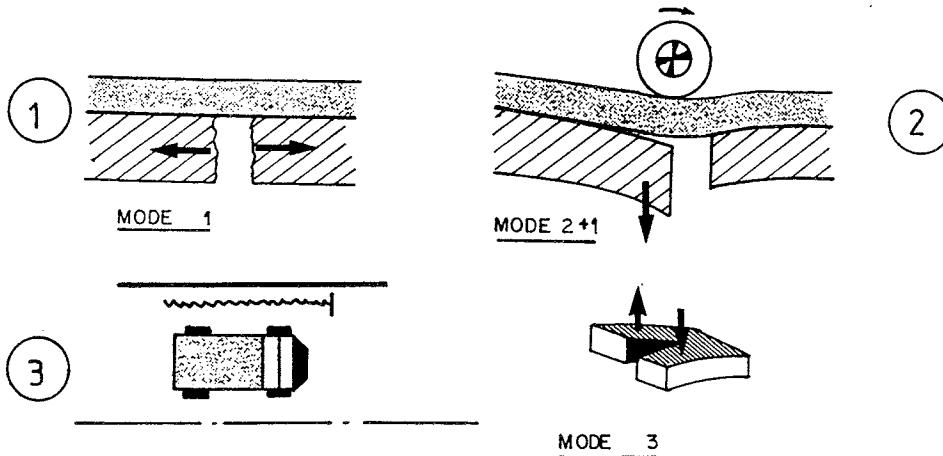
Kuva 12: Halkeamamallit /6/

Vaikuttavien jännitysten mukaan luokiteltuna lajit ovat kohtisuora veto (mode 1), kohtisuora leikkaus (mode 2) ja pinnansuuntainen leikkaus (mode 3) /37/. (kuva 13)



Kuva 13: Halkeamamallit /37/

Pituushalkeamat, jotka johtuvat liikennesuhteista, alkavat päällysteen pinnalta ajourien kohdalta leikkaushalkeamina tai alhaaltapäin taivutushalkeamina. Kun liikennekuorma on halkeaman lähellä, halkeama laajenee repämällä /6/. (kuva 14)



Kuva 14: Halkeaman reunan liike: (1) lämpökutistuminen, (2) ajoneuvo lähestyy halkeamaa, (3) repeäminen /18/

Halkeaman analyysissä ja kehityksen ennustamisessa erotetaan yleensä halkeaman syntyvaihe (initialize) ja etenemisvaihe (propagate) toisistaan. Aluksi materiaali heikkenee ja syntyy mikrohalkeamia. Mikrohalkeamat yhtyvät ja syntyy pieniä makrohalkeamia, jotka lopulta yhtyvät toisiinsa yhdeksi suureksi makrohalkeamaksi. Tällöin materiaali murtuu kokonaan /49/. (kuva 15)

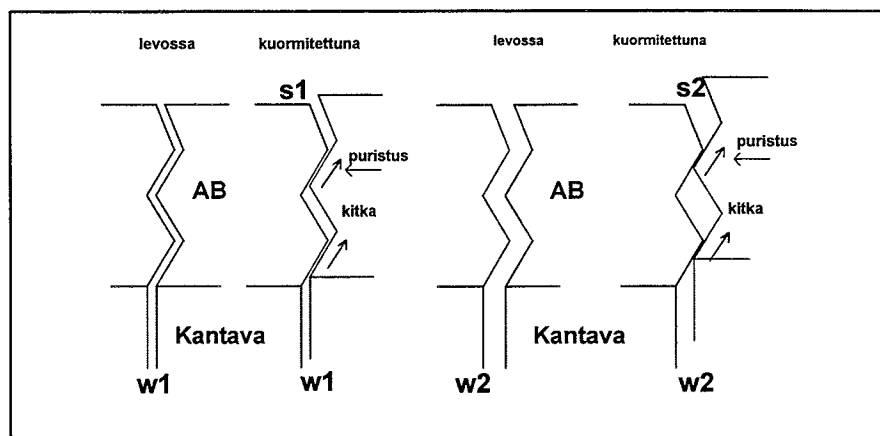


Kuva 15: Halkeilleen alueen kuva. Selitykset: (4) mitta-asteikko, viivojen väli 0,02 in, (5) makrohalkeama, (6) mikrohalkeamia /50/

3.3.2 Halkeaman vakavuus

Halkeaman leveys vaikuttaa sen kuormansiirtokykyyn. Halkeamassa tapahtuu sekä pystysuuntaista että vaakasuuntaista liikettä liikennekuormituksen aikana. Aluksi halkeaman reuna painuu vapaasti alaspäin. Kun kivirakeet alkavat vastata toisiinsa halkeaman kummallakin puolella syntyy vaakasuoria puristusvoimia, jotka kasvavan kitkan takia alkavat vastustaa pysty-

suoraa liikettä. Kivirakeiden siirtyessä toistensa suhteen liukumalla halkeama samalla avautuu (kuva 16) /20/.



Kuva 16: Halkeaman liike ja kuormansiirtokyky, $w_1 < w_2$ ja $s_1 < s_2$ /20/

Lämpötilavaihteluiden vaikutus halkeamaleveyteen ei ole suoraviivaista, koska kerroksellisessa rakenteessa materiaaleilla on erilaiset laajenemisominaisuudet ja bitumin ominaisuudet riippuvat lämpötilasta ja kuormitusajasta. Edelleen lämpötilaero syvyysuunnassa mutkistaa tilannetta syntyvien lämpöjännitysten ja käyritysmien takia.

Halkeaman toimintaa on mitattu pudotuspainolaitteella jäykällä päällysrakenteilla siten, että kuormituslevy on ollut halkeaman vieressä ja yksi geofoni halkeaman takana. Halkeaman takana olevan ja kuormituslevystä seuraavan geofonin taipumien suhde kuvaa halkeaman kuormansiirtokykyä /21/. Puolijäykällä päällysteellä (20 cm AB + 40 cm maabetonia) vertailtiin taipumia geofonien 60 cm ja 90 cm väliillä, jotka olivat eri puolella halkeamaa. Lämpötilassa 15,5 °C eri puolten taipumat olivat yhdensuuntaisia, mutta 3,5 °C asteessa eri puolet toimivat selvästi erillisinä laattoina /22/.

Halkeamia sanotaan amerikkalaisessa asfalttipäällysteiden korjausoppaassa /25/ liikkuviksi (working) silloin, kun halkeaman liike on vähintään 2,5 mm ($\geq 0,1$ in) liikenteen tai lämpötilan muutosten vaikutuksesta ja liikkumattomiksi (nonworking), kun liike on pienempi. Tässä mielessä liikkuvat halkeamat ovat yleensä poikkihalkeamia ja liikkumattomia ovat vinot halkeamat, useimmat pituushalkeamat ja jotkin verkkohalkeamat. Jakoa käytetään yhtenä korjaustavan valinnan perusteena (tiivistetään liikkuvat ja täytetään liikkumattomat).

Pituushalkeamatutkimuksessa /39/ puhutaan elävistä ja kuolleista halkeamista. Halkeama on elävä, jos sen leveyden tai porrastuman muutos on 2 cm tai enemmän. Tutkimusaineiston halkeamista 36 % oli eläviä, niistä 68 % luokiteltiin eläviksi pelkän leveysmuutoksen ja 11 % pelkän porrastumamuutoksen perusteella. Tämä jako ei ota huomioon liikenteen vaikutusta. Halkeamat muuttuvat kuolleista eläviksi, ellei niitä hoideta.

3.3.3 Halkeamavaurion kehittyminen

Edellä olevan perusteella liikennekuormitus sekä aiheuttaa että pahentaa vaurioita yhdessä säärasitusten kanssa. Aluksi halkeama on ohut hiushalkeama. Näkyvistä halkeamista käytetään myös nimeä viivahalkeama. Halkeaman liikkussa se alkaa murentua, kun kivirakeet irtoavat reunoista. Kun kokoonpuristumattomia aineita (kiviainesta) valuu halkeamaan, se ei enää sulkeudu. Vesi ja liikenne heikentävät halkeaman viereistä maa-ainesta. Halkeaman viereen syntyy uusia halkeamia, jotka ovat samansuuntaisia tai kohtisuoria alkuperäisen halkeaman kanssa. Tarkasta suunnasta ei voida puhua, koska halkeama seuraa kivirakeiden rajoja luonteeltaan melko epähomogeenisessa asfaltissa.

Kerroksellisessa rakenteessa tai uudelleenpäällystyksen jälkeen allaoleva halkeama aiheuttaa epäjatkuvuuskohdan rakenteeseen. Jäykkä laatta on osittain poikki. Alla olevan kiviaineksen rakeisuus on saattanut muuttua ja sitä kautta kosteusolosuhteet. Suola, jota halkeamasta pääsee veden mukana rakenteeseen, sitoo kosteutta. Kohta on hyvin otollinen paikalliselle jäätymisvauriolle ja liikenteen aiheuttama jännitys jo heikentyneille sitomattomille kerroksille on tavallista suurempi.

Taivutuksen lisäksi leikkausjännitys ohuessa päällysteessä halkeaman kohdalla saa suuria arvoja. Lämpökutistumisjännitykset keskittyvät ohuempaan kohtaan (voima/pinta-ala), pystysuuntaisista lämpötilaeroista johtuva käyristyminen muuttaa suuntaa sauman kohdalla aiheuttaen taivutuksen. Myös epätasaisen routanousun aiheuttamalla päällysteen taivutusjännityksellä on suuri arvo vanhan halkeaman kohdalla. Edellä luetelluista syistä johtuen on mahdollista, että halkeama syntyy uudella päällysteellä vanhaan paikkaan.

3.4 Halkeamien tunnistaminen käytännössä

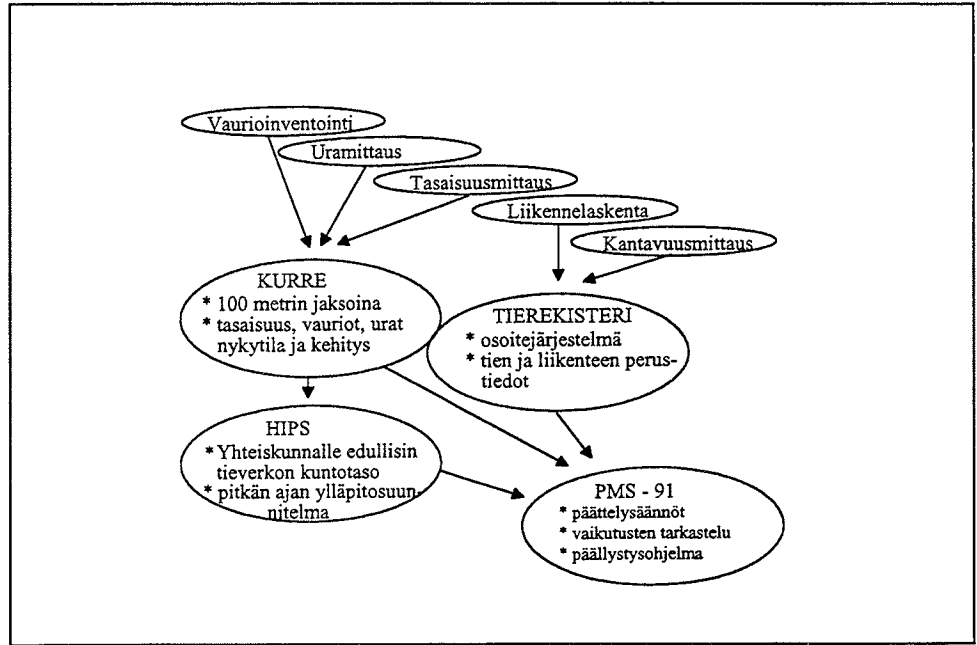
3.4.1 Tien kuntotietojen hyväksikäyttö suunnittelussa

Päällystettyjen teiden tienpidon suunnittelua ohjaavat tielaitoksen PMS ja teiden suunnitteluohjeisto. PMS:n puitteissa tehtävää vaurioinventointia varten tielaitos on julkaissut Päällystevaurioiden inventointiohjeen /4/. Rakenteen parantaminen, suunnitteluohje /29/ käsittelee puolestaan hanketasoa ja työnsuunnittelussa tarvittavan tiedon keruuta.

Tieverkkotasolla tehtävä inventointi

Tielaitoksen päällystehallintajärjestelmään kuuluvat tierekisteri, PMS91, KURRE ja HIPS -ohjelmistot (kuva 17). Kuntotietoja on yleisesti inventoitu vuodesta -89 alkaen. Mittauksia ei tehdä joka vuosi vaan noin 3 vuoden vä-

lein, joten tällä hetkellä (1994) käytettävissä on ainakin kahdet mittaukset. Tietojen hyväksikäyttöä haittaa hieman se, että järjestelmän kehittymisen myötä tehdyt muutokset kirjaamiskäytäntöön on otettava huomioon.



Kuva 17: Tielaitoksen kuntotietojärjestelmän tietovirrat 1993

Tielaitoksen kuntotietorekisteriin KURRE talletetaan tien yleistiedot, PTM-auton mittaustiedot ja vaurioinventointitiedot. Kuntomuuttujien tiedot kirjaetaan 100 m:n jaksoissa. Tiepiirien KURREn tietosisältö on 12.08.1994 taulukko 2:n mukainen.

Taulukko 2: Tielaitoksen kuntotietorekisteri (KURRE 1994)

Yleistiedot:	laatu	PTM_mittaustiedot:	laatu	Vaurioinventointi:	laatu
tienumero		tienumero		tienumero	
tieosa		tieosa		tieosa	
alkuetaisyys	m	alkuetaisyys	m	alkuetaisyys	m
loppuetaisyys	m	loppuetaisyys	m	loppuetaisyys	m
ajoratojen_lkm		tieosanumeroinnin_suunta		ajorata	
piiri		kaista		muunnettu	
tiemestaripiiri		suunta		vanhentunut	
kunta		muunnettu		mittausaika	
otostien_perustaja		vanhentunut		mittaaja	
otostien_laji		kevat_kesa_mittaus		verkkohalkeamat	m ²
otostien_projekti		mittausaika		kapeat_saumahalkeamat	m
viimeisin_kelirikkovuosi		mittauslaitteen_tunnus		leveat_saumahalkeamat	m
liikenne_KVL		mittauspalkin_leveys	mm	kapeat_pituushalkeamat	m
liikenne_KKVL		kiihtyvyyden_alaraja	m/s ²	leveat_pituushalkeamat	m
raskas_prosentti	%	kiihtyvyyden_ylaraja	m/s ²	kapeat_poikkihalkeamat	kpl
kuormituskerialuku		uramuoto_1_lkm	kpl	leveat_poikkihalkeamat	kpl
kevatkantavuus	MN/m ²	uramuoto_2_lkm	kpl	reika	
kevatkantavuus_keroin		uramuoto_3_lkm	kpl	purkauma	
kantavuusaste		poikittainen_epatasaisuus	mm	pakkaskatkot	kpl
mittausvuosi		maksimi_urasyvyyden_keskiarvo	mm	reunapainumat	
mittalaite		maksimi_urasyvyys	mm	vauriosumma	
kunnossapito_lka		uran_keskihajonta			
toiminnallinen_lka		pienet_heitot	kpl		
tietyyppi		isot_heitot	kpl		
paallystelaji_Aj.1		pienet_painumat	kpl		
paallyste_tyomenetelma_Aj.1		isot_painumat	kpl		
paallystys_pvm_Aj.1		pienet_kohoumat	kpl		
paallysteleveys_Aj.1	m	isot_kohoumat	kpl		
korjausmenetelma_Aj.1		pienet_kuopat	kpl		
korjaus_pvm_Aj.1		isot_kuopat	kpl		
viimeisin_toimenpide_Aj.1		pienet_epatasaisuudet	kpl		
toimenpiteen_pvm_Aj.1		isot_epatasaisuudet	kpl		
nopeusrajoitus_Aj.1		kuntoarvo			
paallystelaji_Aj.2		verkkohalkeamat	m		
paallyste_tyomenetelma_Aj.2		saumahalkeamat	m		
paallystys_pvm_Aj.2		pituushalkeamat	m		
paallysteleveys_Aj.2	m	poikkihalkeamat	kpl		
korjausmenetelma_Aj.2		puhkikulumat	m		
korjaus_pvm_Aj.2		kohopaikkaus	m		
viimeisin_toimenpide_Aj.2		urapaikkaus	m		
toimenpiteen_pvm_Aj.2		paikat	kpl		
nopeusrajoitus_Aj.2		reiat	kpl		
verk_as_taaamassa		vaurioprosentti	%		
pohjavesialue		IRI-tasaisuus	mm/m		
pohjavesi_suojattu		DRI			
maa-aineslaji		DRI_maksimi			

Vaurioiden tyypityksessä poikkihalkeama kirjataan pituushalkeamaksi, jos se kiemurtelee enemmän kuin noin puolen metrin leveydellä /4/. Vain siistit poikkihalkeamat, joissa ei ole havaittavissa avoimuutta tai halkeilua, inventoidaan pakkaskatkoina. Avoin tai murtunut poikkihalkeama on "muu poikki-

halkeama". Viimeisin (1994) inventointiohje /4/ erottelee muut poikkihalkeamat, pituushalkeamat ja päällystesaumahalkeamat ryhmiin "kapeat" ja "leveät" (raja on 2 cm, eli sama kuin aikaisemmassa ohjeessa ison halkeaman raja).

Pituushalkeamaksi kirjataan siis vinot halkeamat ja kaikki epävarmat halkeamat. Inventointiohjeen /4/ mukaan kuntotietorekisterin vauriotiedoista pitäisi nähdä, missä kunnossa tien päällyste on.

Koska järjestelmä on tehty ylemmän tason päätöksentekoa palvelemaan, se ei riitä sellaisenaan korjaustoimien suunnittelun lähtötiedoiksi, koska tiedot ovat 100 metrin summatietoja. Tästä johtuen myöskään vaurioiden syyt eivät ilmene inventointitiedoista.

Kuntotiedot suunnitteluohjeessa

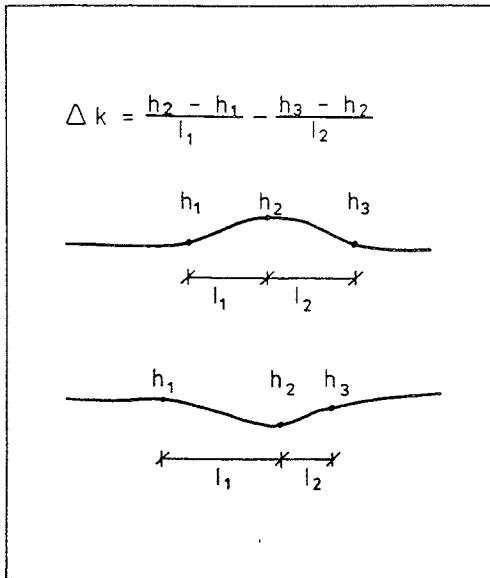
Vuoden 1991 suunnitteluohjeluonnoksen, "Rakenteen parantaminen päällystetyllä tiellä", mukaan kevyessä ja raskaassa rakenteenparantamisessa kantavuus arvioidaan vaurioiden ja kantavuusmittausten perusteella. Routantorjunta mitoitetaan vaurioiden ja routanousuerojen perusteella.

Esisuunnitteluvaiheessa päällystetyn tien vauriosumma, urasyvyys ja kesän epätasaisuusluku tutkitaan 100 m:n jaksoissa, vaurioiden tarkkaa sijaintia ei merkitä muistiin. Vauriosumman laskentakaava, joka ohjeessa esitetään, on vanhan käytännön mukainen (mm. poikkihalkeamien kerroin on 0,1 ja paikkausten kerroin yksi; vertaa kaavaan 1 sivulla 11).

Vaurioitumisnopeus kuvaa yleensä hyvin tien kuormituskestävyyttä (vauriot/päällysteen ikä), kun liikennemäärä on alle 3000... 6000 ajon./vrk. Haitallisten routaheittojen määrä (kpl/km, kpl/100 m) mitataan myös keskitetysti silloin, kun epätasaisuuksia on mahdollisimman paljon (uusi suurempi tulos korvaa vanhan). Routaheittojen määrä voidaan arvioida karkeasti vähentämällä kevään määrästä kesällä havaittujen heittojen määrä. Mittauksiin sopii pystykiihtyvyyssmittari. Vain yli 2 m:n pituiset heitot tulostetaan. Raskaassa ja erityisesti kevyessä rakenteenparantamisessa vaurioiden sijainti, haitallisuus ja tyyppi (suureneeko talvella) arvioidaan tarkemmin /29/.

Rakennussuunnitteluvaiheessa alkukevään vauriotarkastus tehdään suurimman routanousun aikana tai heti lumen ja jään lähdettyä päällysteestä. Tällöin todetaan yliajamalla, pystykiihtyvyyssmittarilla, oikolaudalla tai vaaitsemalla haitalliset routaepätasaisuudet. Vaaitustuloksista lasketaan pystykiihtyvyyden kuvan 18 mukaisesti. Suurten pituushalkeamien leveyden ja porrastuneisuuden mittaaminen mittatikulla on ohjeen mukaan tarpeen, jos halkeaman korjaustapa ei ole muuten selvä. Mittauspisteet merkitään tarkasti päällysteeseen ja samat kohdat mitataan uudestaan kesällä. Joskus vaurioitumissyyn selvittämiseksi voi olla tarpeen mitata myös routanousun suuruus halkeaman kummaltakin puolelta. Tällöin tarvitaan myös kiintopisteet. Alkuke-

vään vauriotarkastus tulisi tehdä vähintään kahtena keväänä. Tarkastukset tulee aloittaa vähintään 3 vuotta ennen varsinaista suunnittelua /29/.



Pystykiihtyvyyden (a) voidaan laskea vaaitustuloksista kaavalla

$$a = 1,2 \times \Delta k(\%)$$

Piste h_1 on heiton alussa, h_2 keskellä ja h_3 lopussa. Jänteen l_1 ja l_2 on kuitenkin aina oltava vähintään 1 m. Loivassa heitossa oleva jyrkkäpiirteisempi kohta mitataan erikseen.

Kuva 18: Pystykiihtyvyyden laskeminen vaaitustuloksista /29/

Poikkileikkauksen vaaitus voidaan tehdä kolmella tavalla:

1. Sivukaltevuuden mittaukseen riittää mittaus reunasta ja keskeltä.
2. Keskiinjan ja reunan routanousuero saadaan, kun em. mittaus tehdään kesällä ja kevättalvella, kiintopistettä ei tarvita.
3. Jos em. mittaukset sidotaan kiintopisteeseen, saadaan routanousun suuruus keskeltä ja reunasta.

Loppukevään vauriotarkastuksissa täydennetään roudanousueroja ja halkeamia koskevia havaintoja. Erityistä huomiota kiinnitetään seuraaviin seikkoihin; onko syntynyt uusia roudanousueroja, toimiiko kuivatus, vuotaako halkeamista vettä, missä kohdissa esiintyy alkavaa missä pitkälle kehittyneitä verkkohalkeilua, onko poikkihalkeamista haittaa. Samalla arvioidaan ympäristöä tarkkailemalla vaurioiden syitä. Tarkastuksia tehdään useita eri keväänä. Tien kunnossapitäjä voi tehdä suuren osan tarkastuksista /29/.

Päällystetyillä teillä kantavuus pitäisi mitata esisuunnitteluvaiheessa 100...500 m:n välein ja tie- ja rakennussuunnitteluvaiheessa 50...100 m:n välein. Näistä kevätkantavuuskertoimella korjatuista tuloksista valitaan pienempi.

Kevyet ja raskaat rakenteen parantamiset voidaan suunnitella periaatteessa ilman maaperänäytteitä, jos kantavuus ja vauriot tunnetaan. Vanhojen kerrosten, pohjamaan laadun ja kalliopinnan selvittäminen on kuitenkin yleensä

tarpeen kohdissa, joihin tehdään rumpu tai joissa harkitaan tasausviivan laskua, sekä pehmeiköllä. Routaheittojen kohdalta ei yleensä tarvita näytteitä, sillä heitto korjataan yleensä siirtymäkiilalla syystä riippumatta. Myöskään halkeamien kohdalta ei yleensä tarvita erikseen näytteitä. Pituuskaltevassa paikassa sekä erityisen pitkien halkeamien kohdalta rakennekerrosten paksuuden, pohjamaan ja kalliopinnan tutkiminen on kuitenkin hyödyllistä. Tällöin tutkimuskohteet on valittava halkeaman kummaltakin puolelta. Vielä tarkempi tulos saadaan kaivamalla rakennekerrokset näkyviin toisen rakennekerroksen alta.

Osuuksilla, joilla on paljon verkkohalkeamia, tulisi tutkia ainakin päällysteen paksuus ja kantavan kerroksen laatu, lähinnä hienoainespitoisuus ja kiviisyys. Tietoa tarvitaan kantavan kerroksen uusimistarpeen ja paikallastabiilintimahdollisuuden selvittämiseksi /29/.

3.4.2 Halkeamien mittaaminen käytännössä

Halkeamien inventoinnilla pyritään antamaan riittävän tarkka kuvaus päällysteen vaurioista asiantuntijajärjestelmän lähtötiedoksi (PMS-inventointia ei ole tarkoitettu päällysteiden vuosittaiseen tarkastukseen; mittaus toistetaan 3 - 4 vuoden välein /4/). Hanketasolla vaurioiden kehittymistä voidaan seurata tarkemmin, jolloin puhutaan vaurioiden kartoituksesta.

Silmämääräinen vauriokartoitus

Tielaitoksen tekemä vaurioiden inventointi perustuu nykyisin silmämääräiseen arviointiin, joka on työlästä ja epätarkkaa (vuoden 1994 inventoinnissa keskimääräinen ero vertailumittauksiin oli n. +/- 25 %). Inventointi tehdään autosta. Kuljettaja inventoi tiessä näkyvät päällystevauriot ja sanelee toiselle henkilölle, joka koodaa ne peitteen avulla suoraan mikrotietokoneelle.

Hanketasolla vaurioista voidaan merkitä muistiin myös niiden muoto ja sijainti. Kartoitus tehdään parhaiten käsi- ja jalkatyönä. Esimerkki käytettäväs- tä vauriokartoituslomakkeesta esitetään liitteessä 1.

Optinen vauriokartoitus

Subjektiivisuuden, virhealttiuden, hitauden ja vaarallisuuden takia tien päällä tehtävästä kartoituksesta halutaan luopua. Ulkomailla on käytössä ja kehitteillä useita menetelmiä, joilla vauriokartoitusta pyritään automatisoimaan (parissa järjestelmässä vaurioita tosin kirjataan vielä käsityönä mittauksen aikana).

Suurin osa järjestelmistä perustuu konenäköön tai kuvankäsittelyyn. Käytössä on myös laserteknologiaan ja tutkamittaukseen perustuvat menetelmät. Kuvauslaitteet on yleensä asennettu erityiseen mittausautoon, jolla

kerätään samanaikaisesti myös ura- ja tasaisuustietoa. Useissa optisissa järjestelmissä toiminta-ajatuksena on nopea tiedonkeruu (kuvaus) ja myöhemmin tehtävä tiedon käsittely (tulkinta). Tie kuvataan joko filmi- tai videokameralla. Kuvan tulkinta on joko käsityötä tai se on automatisoitu /53,54/.

Halkeamien optista mittaamista on testattu myös Suomessa. Tielaitoksen esiselvityksen mukaan tienpinnan vauriot voidaan kuvata optisesti tulkitsemalla tunnistaa ja luokitella niin, että luotettavuus vastaa vähintään nykyistä vaurioinventointia. Projektin seuraavan vaiheen tavoite on kehittää ohjelmito, joka kuvaa tulkitsemalla laskee (100 metrin tieosuuksittain) seuraavat vauriomäärät: pituushalkeamat, poikkihalkeamat ja pakkaskatkot metreinä ja verkkohalkeamat neliömetreinä.

Lasermittaus

Ruotsissa VTI (Statens väg- och trafikinstitut) on kehittänyt mittausauton, jolla mitataan urien ja profiilien lisäksi laserin avulla pinnan karkeutta sekä halkeamasyvyyyttä ja -leveyttä. Haittana mainitaan, että halkeamatieto kadotetaan keskiarvojen laskemisen jälkeen. Halkeaman tyypin ja muiden vaurioiden tallentaminen tapahtuu mittauksen aikana vielä käsityönä /53,54/.

Maatutka

Maatutkaa voitaneen käyttää myös halkeamien paikantamisessa. Asiaa on jo testattu vt 20:llä. Englannissa on kehitetty Crack Detector -laitetta, joka myös perustuu tutkatekniikkaan.

3.4.3 Halkeamien syiden analysointi

Esimerkkejä

"Yksittäisistä vaurioista päätyyppinä on pituushalkeama, joka kertoo paikallisista routaongelmista. Lisäksi esiintyy runsaasti keskisaumahalkeamaa, joka ei näyttäisi olevan routimisesta aiheutunutta. Isoja halkeamia eli pituus-, poikki-, tai saumahalkeamia, jotka ovat yli 2 cm leveitä, sekä kantavuuspuutteesta kertovaa verkkohalkeilua ei esiinny koko jaksolla kuin muutamassa yksittäisessä paikassa." (/23/; lisäksi esitettiin käyrät vauriosummasta, pituushalkeamista ja verkkohalkeamista paalutuksen funktiona; yksikkönä m, m²/100 m.)

Edellä kuvatussa tapauksessa ei tyydytty pelkkään silmämääräiseen tarkasteluun, joka saattaa johtaa väärin tulkintoihin. Keskisaumahalkeama, jos se ei johdu tiepoikkileikkauksen epätasaisesta routanoususta, syntyy tierakenteen painumisesta, liikennekuormituksista tai lämpöjännityksistä. Liikenteen vaikutus mitoitusmallien mukaan edellyttäisi ajouran sijaintia keskiviivan tun-

tumassa. Liikenteestä johtuvaksi halkeiluksi mielletään ehkä vain verkko-halkeilu, jonka tiedetään johtuvan kantavuuspuutteesta.

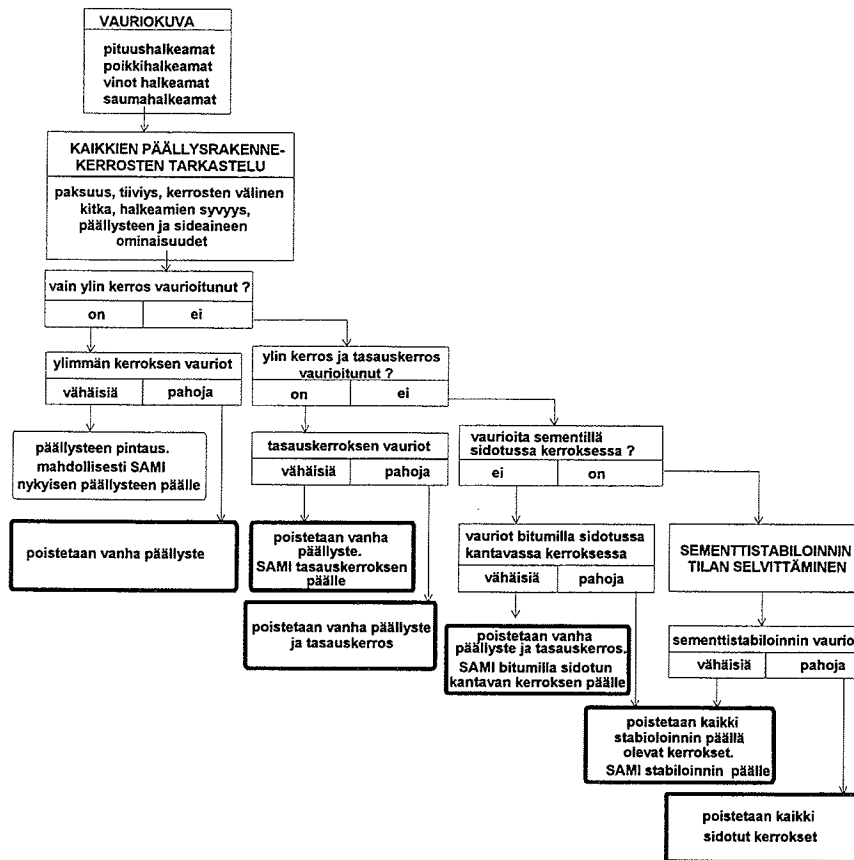
Apuna käytettiin myös maatumakaluojausta. Maatumatka paljastaa hyvissä olo-suhteissa päällysrakennepaksuuden vaihtelut tien pituussuunnassa /29/. Päällystepaksuuden arvioinnissa on (v. 1992) päästy 7,5 - 10 %:n tarkkuu-teen (projektitasolla paksuustietoa voidaan käyttää taipumamittausten tul-kinnassa) /41/. Tulkinnan tarkkuutta voidaan lisätä pora- ja kairanäytteillä.

Silmämääräisen tarkastelun tueksi tarvitaan menetelmää, jolla halkeamien tyyppitys (syy) ja luokitus (vakavuus) voidaan yksikäsitteisesti määrittää. Käytännössä tämä tarkoittaa mittauksia. Korjausta ja kunnostusta varten on kehitetty seuraavanlainen luettelo toimenpiteistä, jotka ovat "sekä tehokkaita että riittäviä" /23/ :

1. Havainnoidaan systemaattisesti eri tyyppiset vauriot (inventointi)
2. Seurataan vaurioiden kehitystä vuosittain
3. Otetaan näytteitä laboratoriokokeita varten (tunkeuma, pehmenemispiste)
4. Tehdään kuormituskokeita (Benkelman-palkki jne.)
5. Tutkitaan paikallisesti alusrakenteen ja pohjaveden tila
6. Haetaan ne eri syy-yhdistelmät, jotka saattavat tulla kyseeseen
7. Käytetään vahinkoarvioinnin asiantuntijaa apuna, jos ei itse olla aivan varmoja asiasta

Mittauksia tarvitaan siis tiheämmin kuin joka neljäs vuosi. Vaihtoehto on halkeilun mallintaminen. Elementtimenetelmillä voidaan laskea halkeamien kehittymistä. Kuitenkin tarvitaan tietoa mallin parametreistä. Voidaan tehdä kaksiulotteisia taivutus/väsytyksen/venytys-kokeita tai testeissä käytetään erityistä tierakenteen tutkimuslaitetta, jossa kuormituksena on liikkuva pyörä. Toinen tie on lähteä analysoimaan kerättyjä mittaustietoja ja etsimään tilastollisia riippuvuuksia. Joka tapauksessa tarvitaan myös tiellä tehtäviä mittauksia. Voidaan etsiä yhteyttä, jolla halkeamista mitattaisiin päällysteen toiminnallinen kunto.

Insinöörityhteöllinen tapa käsitellä vauriota on etsiä ensin tekniset syyt, jotka aiheuttivat vaurion ja sitten päätellä parannuskeinot. Kuvan 19 arviointime- nettely on M. Blumerin kehittämä ja se kuuluu sveitsiläiseen normiin /23/.



Kuva 19: Halkeilleen päällysteen kunnostustoimenpiteiden valinta vaurio-
arviointiin (laatu ja määrä) perustuen /23/

Reunapainuma

Painuma voi johtua puutteellisesta tiivistyksestä tai muista materiaaleihin liittyvistä virheistä. Veden kulku tierakenteeseen on toinen mahdollinen syy, joka voitaneen tunnistaa siitä, että liiallisen kosteuden aiheuttama vaurio ilmenee painumana pyöräurassa ja samanaikaisena kohoamisena uran vieressä. Huokosveden paine, joka voi kehittyä liikennekuormituksen takia, aiheuttaa myös löyhtymistä ja reikien syntymistä. Tämä vaurio esiintyy tyyppillisesti ulkourassa /40/.

Työ- ja materiaalivirheet

Tien suunnitteluikä on yleensä 20 vuotta. Ennen aikaisten vaurioiden syyksi voidaan siksi epäillä rakennekerrosten ominaisuuksia. Työvirheet, kuten huono tiivistys tai materiaalin lajittuminen, havaitaan vaurioitumisena jo 1 - 5 vuotta rakentamisen jälkeen. Jos on käytetty materiaaleja, jotka heikkenevät ajan kuluessa esim. sää- tai ilmastorasitusten takia, vauriot ilmenevät myöhemmin, mutta kuitenkin ennen tien laskettua kestoikää /42/.

Ylikuormat ja epätasaisuus

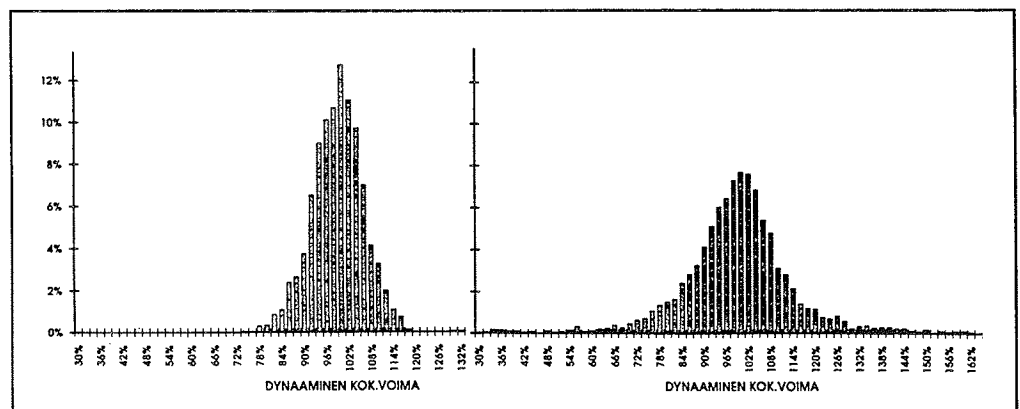
Ylikuormilla on merkittävä vaikutus teihin kohdistuviin rasituksiin ja sitä kautta kestoikään. Akselipainojen lisäys kasvattaa joustavilla päällysrakenteilla rasitusta (kuormituskertoja) neljännen potenssin säännön mukaan: kun akselipaino lisääntyy 25 %, kuormitusvaikutus lisääntyy 2,4-kertaiseksi. Potenssi puolijäykillä ja jäykillä päällysrakenteilla on kuitenkin huomattavasti neljää suurempi, vaihdellen välillä 11 - 33 /42/. Tällöin akselipainon 25 %:n lisäys kasvattaa kuormitusvaikutuksen 12 - 1600-kertaiseksi.

Dynaamisen kuormituslisän merkittävyyttä kuvaa taulukko 3, jossa D_{max} = suurin dynaaminen kokonaisvoima/staattinen akselipaino kullakin 100 metrin osuudella. Taulukon mukaan lähes joka toisella 100 metrillä esiintyy yli 40 % ylikuormaa vastaavia kuormituksia (sallituilla akselipainoilla).

Taulukko 3: 100 metrin jaksojen luokitus suhteellisen kuorman maksimiarvon mukaan (kesän 1994 PTM-mittaukset)

D_{max} 100 m	%
1,0 - 1,2	12
1,2 - 1,4	40
1,4 - 1,6	22
1,6 - 1,8	11
1,8 - 2,0	6
2,0 - 2,2	3
> 2,2	6

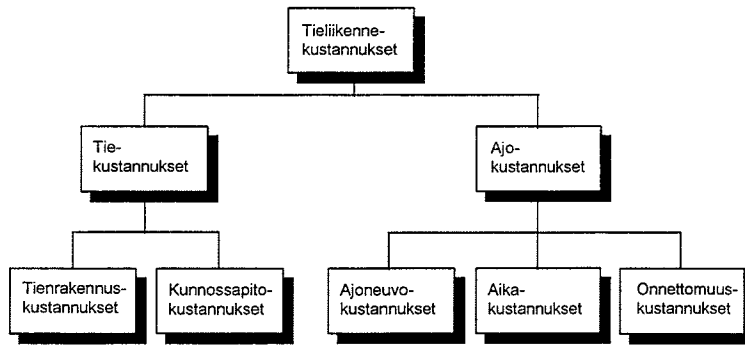
Myös maksimi-arvoa pienemmillä dynaamisilla kuormituslisillä on vaikutusta. Dynaamisesta kuormituksesta aiheutuvan suhteellisen kokonaisvoiman jakauma on laakeampi tasaisella kuin epätasaisella tiellä (kuva 20) /57/. Epätasaisella tiellä ylikuormat saattavat olla pääasiallinen syy tien nopeaan vaurioitumiseen.



Kuva 20: Vetoakselilta mitatun dynaamisen akselipainon jakauma epätasaisella (IRI = 4,35) ja tasaisella koeosuudella (IRI = 1,15) /57/

4 HALKEAMIEN MERKITYS

Tieliikenteen kokonaiskustannuksilla ymmärretään kuvan 20 mukaisia kustannuksia laskettuna hankkeen koko elinajalle. Kokonaiskustannukset voidaan ilmaista myös vuosikustannuksina.

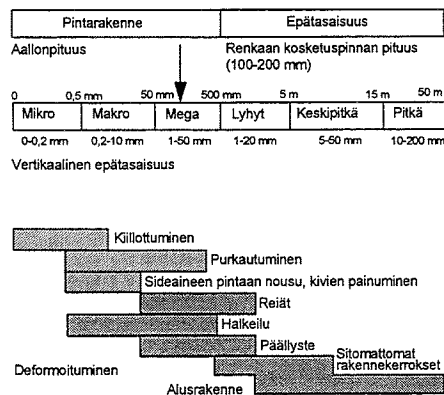


Kuva 20: Tieliikennekustannusten osatekijät /15/

Tien pääoma-arvo laskee vaurioitumisen yhteydessä, sillä halkeamat vaurioittavat tien rakennetta ja edistävät tien rappioitumista. Halkeamat huonontavat myös tien toiminnallista palvelutasoa. Riittävät toiminnalliset ominaisuudet tulisi saavuttaa mahdollisimman taloudellisesti.

4.1 Tienkäyttäjän kannalta

Keuyen liikenteen väylillä varsinkin pituushalkeamat ovat selvästi haitallisia ja jopa turvallisuusriski. Autoliikenteelle halkeamien päämerkitys liittyy ajomukavuuden arvostamiseen. Tavaraliikenteessä tulee ottaa huomioon myös kuormaan kohdistuvat rasitukset. Kuvassa 21 on esitetty tyypillisimmät ajorataprofiilin vauriot ja niiden vaikutus ajoradan pintarakenteeseen ja tasaisuuteen.



Kuva 21: Päälysteen vaurioiden vaikutus ajoradan pintarakenteeseen ja tasaisuuteen /12/

Kuvan mukaan halkeilu kuuluu vielä pintarakenteen muutokseen. Halkeilun seuraukset lasketaan epätasaisuudeksi. Päällysteen purkautuminen aiheuttaa pintarakenteen karkeutumista ja lisää näin renkaiden kulumista ja melua. Halkeamat, erityisesti poikittaiset, vaikuttavat myös selvästi ajomukavuuteen. Pyöräteillä halkeamat voivat olla jopa vaarallisia.

Suomessa yleisin poikkiprofiilin vaurio on urautuminen nastarengaskulutuksen seurauksena. Myöskin päällysteen ja koko tierakenteen deformatuminen aiheuttaa urautumista. Urautuminen huonontaa sekä ajoturvallisuutta että ajomukavuutta. Uriin kertyvä vesi lisää vesiliirtovaaraa ja urat saattavat aiheuttaa virheliikkeitä ajoneuvoon erityisesti ohitustilanteissa. Ajomukavuus huononee, koska kuljettaja joutuu tarkkailemaan ajoansa urien suhteen.

Ajopaneelitutkimuksilla on selvitetty ajoradan pinnan vaurioiden merkitystä kuljettajan tai ajoneuvon matkustajan tuntemaan ajomukavuuteen. Tutkimus järjestetään siten, että edustava joukko kuljettajia ajaa erilaisen vaurioitumisasteen omaavat tieosuudet sovitulla nopeudella ja arvioi ajoradan pinnan toiminnallisen palvelutason sovitun asteikon mukaisesti. Lisäksi määritellään, onko päällyste hyväksyttävässä kunnossa vai välittömän kunnostuksen tarpeessa. AASHO-koetietutkimuksen yhteydessä tehdyssä paneelitutkimuksessa käytettiin kuvan 22 mukaista viisiasteista arviointiasteikkoa.

5	erittäin hyvä
4	hyvä
3	keskinkertainen
2	huono
1	erittäin huono
0	

Kuva 22: Tien ajoradan pinnan toiminnallisen palvelutason arvosteluasteikko AASHO-koetietutkimuksen mukaisesti /13/

Tieosuuksille tehtiin myös vaurioinventointi, jossa laskettiin erilaisten vaurioiden (halkeamat, urautuminen) ja paikkausten määrä sekä pituussuuntainen epätasaisuus. Ajopaneelin antamien palvelutasolukujen ja ajoradan pinnan vaurioitumisen välille saatiin kaavan 9 mukainen palvelutasoindeksin (Present Serviceability Index, PSI) laskentamalli /13/.

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log (1 + SV) - 0,01 \sqrt{C + P} - 1,38 RD^2 \quad (9)$$

jossa:

SV = CHLOE -mittarilla mitattu ajoradan pituussuuntainen epätasaisuus (Slope variance)

C = Halkeilleen päällysteen pinta-ala, neliöjalkaa/päällysteen pinta-ala 1000 neliöjalkaa

P = Paikkausten pinta-ala, neliöjalkaa/päällysteen pinta-ala 1000 neliöjalkaa

RD = Urasyvyys, tuumaa.

PSI-arvo on uudella tai vasta uudelleen päällystetyllä tiellä luokkaa 4,2. Pääteillä käytetään usein alimpana hyväksyttävänä PSI:n arvoa 2,5. Epätasaisuuden vaikutus ajoradan pinnan palvelutasoon on merkittävä. Urasyvyyden merkitys palvelutasoon kasvaa voimakkaasti urasyvyyden suureudessa.

Halkeamien ja paikkausten merkitys palvelutasoon on kaavan mukaan erittäin pieni. Sadan prosentin halkeamaosuus (1000 neliöjalkaa halkeamia/1000 neliöjalkaa päällystettyä) tai 100 %:n paikkausosuus laskee palvelutasoarvoa vain 0,1 yksikköä.

Pohjoismaissa tehtiin 1970-luvulla vastaavanlainen ajopaneelitutkimus /14/, jonka mukaan saatiin palvelusoindeksille kaavan 10 mukainen laskentamalli. Merkinnät ovat samat kuin edellä.

$$PSI_{POHJ} = 4,93 - 1,81 \log(1,0 + SV) - 0,04 \sqrt{C+P} - 4,98 RD^2 \quad (10)$$

Kaavan mukaan epätasaisuuden merkitys palvelutasoon on jokseenkin samanlainen kuin AASHO-mallissa. Urasyvyydelle pohjoismainen palvelutasoarviointi antaa suuremman merkityksen kuin AASHO-tutkimus. Halkeamien ja paikkausten vaikutus on nelinkertainen AASHO-malliin verrattuna, mutta siitä huolimatta niiden merkitys on hyvin pieni.

Jos halkeamat ovat pieniä, tasaisia ja enimmäkseen pituussuunnassa, niiden vaikutus on vähäinen. Sen sijaan, jos halkeamat ovat leveitä, poikittaisia ja porrastuneita, niiden merkitys ajomukavuuteen lienee malleissa esitettyä paljon suurempi.

Pituushalkeamatutkimuksessa /2/ halkeamien haitallisuus määriteltiin niiden leveyden ja porrastuman mukaan (taulukko 4):

Taulukko 4: Pituushalkeamien luokittelu haitalliseksi /2/

Halkeaman haitallisuus	Halk. leveys		Halk. porrastuma
Haitaton	< 20 mm	ja	< 10 mm
Haitta lievä	20 - 39 mm		10 - 19 mm
Haitta paha	≥ 40	tai	≥ 20

4.2 Tierakenteen kannalta

Asfalttipäällysteen halkeilu lisää rasituksia alla olevissa rakennekerroksissa. Urautuminen ja painuminen lisääntyy. Vauriolla on taipumus kasvaa kiihty-

vällä vauhdilla. Halkeaman aiheuttama epätasaisuus kasvattaa tien dynaamisista kuormaa ja syntyy toisiinsa liittyviä halkeamia.

Tien poikki- ja pituuskaltevuuksien muutokset saattavat myös vaikeuttaa tien pintakuivatuksen toimintaa. Halkeamasta tierunkoon pääsevä vesi yhdessä liikenteen kanssa aiheuttaa eroosiota ja materiaalien sekoittumista, mikä huonontaa kantavuutta. Hienon maa-aineksen pumppautuminen alusrakenteesta ylöspäin heikentää rakennekerrosten ominaisuuksia ja tekee niistä entistä herkempiä vedelle. Myös tiesuolan pääsy rakenteeseen muuttaa rakenteen ominaisuuksia.

Alusrakenteen tilanne on kriittisin roudan sulamisen aikaan, jolloin toistuvat kuormitukset aiheuttavat vedellä kyllästetyn pohjamaan pehmenemisen. Vaikka alusrakenne ei sortuisikaan, syntyy alusrakenteen pintaan painumia ja urautumista, jotka huonontavat alusrakenteen kuivatuksen toimintaa ja lisäävät routimisen haitallisia vaikutuksia tulevaisuudessa /9/.

Tierakenteen pinnalla vaurioituminen näkyy painumina, epätasaisuutena, urautumisena ja uusina halkeamina.

4.3 Tienpitäjän kannalta

Teiden ylläpito sisältää monentasoisia toimenpiteitä: hoitoa, kunnostusta ja rakenteen parantamista. *Hoidolla* ymmärretään yksittäisvaurioiden korjausta ja erilaisten halkeamien saumausta. *Kunnostuksella* tarkoitetaan pitkäkhön tieosuuden korjaamista kevyehkösti (esim. urapaikkaukset, pintaukset ja uudelleenpäällystämiset). *Rakenteen parantamisella* tarkoitetaan em. toimenpiteitä järeämpiä toimenpiteitä. Lievemällä (halvemalla) toimenpiteellä pyritään siirtämään järeämmän (kalliimman) toimenpiteen suoritusajankohtaa /15/.

Tien hoito

Halkeamien merkitystä saatetaan väheksyä siinä mielessä, että niiden korjaukseen lähdetään vasta, kun vaurio alkaa olla silmiinpistävän suuri. Halkeamien täyttöä ja paikkausta pidetään yleisesti vain tilapäisratkaisuina. Halkeilleen tien uudelleenpäällystäminen ei aina estä halkeamia ilmaantumasta uudelleen samaan paikkaan (halkeamien heijastuminen).

Oikeilla hoitotoimenpiteillä voidaan hidastaa tien vaurioitumista ja joskus estää vaurion syntyminen. Halkeamien korjaukseen onkin kehitetty monenlaisia menetelmiä, jotka valitaan halkeaman luonteen perusteella. Hoidon tehokkuus riippuu siitä, osataanko halkeama tyypittää ja luokitella oikein. Lisäksi tarvitaan tieto siitä, milloin hoitoon kannattaa ryhtyä.

Tien kunnostus

Tien uudelleenpäällystyksen yhteydessä kulumisurien lisäksi korjataan myös halkeamavaurioita. Jos halkeamien pikainen uusiutuminen halutaan välttää, voidaan halkeamatyypistä riippuen käyttää erilaisia menetelmiä, joiden toimintatapa ja tarkoitus poikkeavat toisistaan. Muissa maissa on paljon käytetty lujitekankaita, joilla pyritään estämään vanhojen halkeamien uusiutuminen. Halkeamien tyyppi ja luokka vaikuttavat siihen, millaisia lujitteita voidaan käyttää.

Suunnittelumenetelmissä ei ole riittävästi otettu huomioon olemassaolevan halkeaman merkitystä. Käytössä olevat mitoitusmenetelmät eivät toimi kunnolla, kun on kyse uuden asfalttikerroksen lisäämisestä vanhan kerroksen päälle. Ongelmana on vanhan päällysteen tila, jota ei tunneta riittävästi. Yhteenliimattujen kerrosten oletetaan toimivan yhtenä paksuna sidottuna kerroksena. Kuitenkin vanha ja ehjältä vaikuttava päällyste saattaa olla vaurioitumistilassa, jos halkeamat ovat vielä piilossa.

Itse halkeaman kohta ja halkeaman vaikutusalueen laajuus ovat yhä tarkemmin tutkimatta, vaikka halkeamalla tiedetään olevan vaikutusta esim. kantaavuuteen. Tältäkin osin mitoitusmenetelmiä tulee edelleen kehittää.

Työohjelmaa laadittaessa tulisi tietää, onko halkeilussa kysymys vain kosmeettisesta haitasta, jonka korjaamisella ei ole kiire vai nopeasti kiihtyvistä vaurioista. Halkeilun luokitus ja tyypitys voisi auttaa sen valinnassa, onko uudelleenpäällystäminen riittävä toimenpide vai tarvitaanko muita keinoja.

Rakenteen parantaminen

Vaurioitumista tarkasteltaessa olisi oleellista erottaa roudan aiheuttama halkeilu muusta halkeilusta. Routavaurion korjaus vaatii usein raskaita toimenpiteitä, koska vaikuttavat voimat ovat suuria. Korjaustapa ja taloudellisin hetki korjaukselle eli viimekädessä kustannukset pitäisi myös pystyä optimoimaan.

Rakenteen vahvistamisessa käytetään teräsverkkoja tai geoverkkoja. Rakenteellisen suunnittelun yhteydessä on tutkittava käytettävissä olevat rakenne- ja materiaalivaihtoehdot ja valittava toteutettavaksi rakenteeksi kokonaiskustannuksiltaan edullisin.

Kun rakennetta vahvistetaan sementillä sidotuilla kerroksilla, halkeilun estämiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota.

5 HALKEAMAN HEIJASTUMISEN ESTÄMINEN

5.1 Menetelmät

Useissa maissa puolijäykällä päällysrakenteilla esiintyy yleisesti halkeamien heijastumista päällysteeseen. Suomen olosuhteissa myös tavallisilla taipuisilla päällysrakenteilla esiintyy heijastushalkeilua uudelleenpäällystämisen yhteydessä.

Sementillä sidotulle jäykälle rakennekerrokselle on ominaista kutistumisesta ja liikennekuormista aiheutuva halkeilu. Routimisesta aiheutuvan halkeamariskin vähentämiseksi on puolijäykällä rakenteella oltava riittävä kokonaispaksuus. Kutistumisesta ja liikennekuormista aiheutuvien halkeamien päällysteeseen heijastumisen ehkäisemiseksi voidaan toimenpiteet kohdistaa itse sementillä sidottuun kerrokseen, asfalttipäällysteeseen ja/tai niiden väliin rakenteeseen.

Sementillä sidotun kerroksen kutistumishalkeamien leveys on verrannollinen halkeamien välimatkaan. Halkeamaleveyttä on pyritty rajoittamaan (parempi kuormansiirtokyky ja pienempi lämpöliike) antamalla työnaikaisen liikenteen murtaa esiin kuivumisesta ja hydrataatiosta aiheutuvia kutistumishalkeamia.

Ranskassa on kehitetty menetelmä, jossa sementillä sidottu kerros työn aikana katkotaan 3 metrin välein ja saumoihin ruiskutetaan bitumiemulsiota. Sidotusta kerroksesta tulee tällä tavalla ehjä. Menetelmä vastaa heijastushalkeilun estokyvyltään noin 6 cm:n AB-kerrosta ja sitä suositellaan käytettäväksi kaikkien hydraulisten sideaineiden yhteydessä /55/.

Asfalttipäällyste voidaan tehdä entistä elastisemmaksi käyttämällä modifioituja sideaineita. Sementillä sidotun kerroksen ja asfalttipäällysteen väliin voidaan rakentaa jännityksiä absorboiva välikerros - sitomaton kerros tai ohut elastinen kerros (SAMI).

Geovahvisteet ovat kankaita vahvempia verkkomaisia kuiturakenteita, joilla pyritään nimen mukaisesti parantamaan tierakenteen lujuutta. Geovahvisteita voidaan käyttää sitomattomien rakennekerrosten lujittamiseen, jolloin vahvisteiden vetolujuus siirtyy tien rakennekerrokseen vahvisteiden ja kerros- materiaalin välisen kitkan tai adheesion avulla. Verkkomainen rakenne mahdollistaa sitomattomien rakeisten materiaalien tunkeutumisen verkon aukkoihin, jolloin verkon ja lujitettavan kerroksen materiaalin välille syntyy tehokas lukkiutuminen (interlocking) /16/.

Heijastushalkeamien torjunta on kantavuuden parantamisen ohella toinen kohde, johon geovahvisteita on käytetty tierakenteissa. Vahvisteet voidaan kiinnittää tasatun sidotun kerroksen päälle esimerkiksi bitumilla. Ongelmat ovat aiheutuneet lähinnä vaikeasta työtekniikasta. Geovahvisteilla on pystytty rajoittamaan heijastushalkeamien syntymistä jossain määrin. Kankai-

den ohella on kokeiltu myös irtokuitujen levittämistä bituminoidulle alustalle sekä teräsverkkoja.

Parhaat tulokset routanousuerojen synnyttämien pituushalkeamien torjunnassa on saatu teräsverkkovahvisteilla. Teräsverkko on asennettu rakenteen parantamisen yhteydessä sitomattomaan kantavaan kerrokseen ja uudelleenpäällystämisen yhteydessä vanhan ja uuden päällysteen väliin. Teräsverkkojen käytössä ongelmana on ollut kuumen päällysteen aiheuttama teräksen lämpölaajeneminen.

Halkeamien kohdalla olevia jännityshuippuja tasaamaan on käytetty erityistä joustavaa välikerrosta vanhan ja uuden päällysteen välissä. Kerroksesta käytetään nimitystä SAMI (stress absorbing membrane interlayer) tai SAM (stress absorbing membrane). Kerros tehdään kumirouhebitumista ja hienosta murskeesta ja se on melko ohut. Materiaalissa käytetään bitumia 1,5 - 2 l/m² ja kiviainesta 11 - 22 kg/m² /37/.

Eri tyyppiset välikerrokset ja vahvisteet on seuraavissa taulukoissa (5 ja 6) luokiteltu niiden toiminnallisten ominaisuuksien mukaan. Valinnassa tulee kiinnittää huomiota käyttötarkoitukseen ja sopivuus tulee arvioida tarkastelemalla materiaalin kestävä suhteellista venymää.

Taulukko 5: Välikerroksissa käytettyjen tuotteiden materiaalit, toiminta ja asennus /51/

TUOTETYYPPI	SAMI	NWM	NWT	WOW	GGR	MGR
Materiaali:						
Polyetyleeni		X	X			
Polypropyleeni		X	X	X	X	
Polyesteri		X	X	X	X	
Kumirouhebitumi	X					
Teräs						X
TOIMINTATARKOITUS:						
Vahvistaa				X	X	X
Mahdollistaa kerrosten (hitaan) liukumisen	X	X	X	X		
Vähentää jännityksiä	X	X	X			
Estää vedenläpäisy	X	X	X			
ASENNUSTAPA:						
Liimaus		X	X	X		
Levittäminen (valu)	X					
Peitetään lietteellä					(X)	X
Naulaus					X	X

Käytetyt lyhenteet:

- SAMI: Jännityksiä absorboiva kalvomainen välikerros
- WOW: Kudottu vahviste
- NWM: Ei kudottu, mekaanisesti tai kiertämällä sidottu vahviste
- NWT: Ei kudottu, sulattamalla sidottu vahviste
- GGR: Geoverkko
- MGR: Metalliverkko

Taulukko 6: Välikerroksissa käytettyjen tuotteiden toiminnallinen luokitus ja niiden mekaaniset ominaisuudet. Merkinnät kuten edellä /51/

	Paksuus (mm)	E (MPa)	Kriittinen jännitys (MPa)	Kriittinen suhteellinen venymä (%)
SAMI	10 - 50	10 - 100		
NWM / NWT	0,4 - 4	10 - 160	5 - 20	40 - 140
WOW	0,4 - 0,7	400 - 1500	40 - 140	8 - 15
GGR	0,8 - 1,1	900 - 2500	70 - 150	8 - 16
MGR	2 - 4	8000 - 10000		

Työteknisesti eri tuotteiden käyttö (liimaus, levitys, kiinnitys) poikkeaa huomattavasti toisistaan. Päälle tulevan asfalttikerroksen kuumuus saattaa asettaa tiettyjä rajoituksia: teräsverkoissa laajenemisiongelmiä ja muoveilla sulamista. Päällysteen alapinta jäähtyy kuitenkin niin nopeasti, että ongelmia ei pitäisi tulla tavallista bitumia sisältävillä asfalteilla.

5.2 Ennustamismetodit

5.2.1 Terminen halkeilu

Tierakenteen lämpötilavaihtelut päällysteen alapuolisissa sitomattomissa rakennekerroksissa ovat suurimpia ylemmissä kerroksissa ja vaimenevat alaspäin mentäessä. Lisäksi lämpötiloissa on havaittavissa selvä vaihesiirto. Kantavassa kerroksessa suurimmat lämpötilat ovat heinäkuussa kun taas 3,0 m syvyydellä suurin lämpötila saavutetaan vasta elo- ja syyskuun vaihteessa /17/.

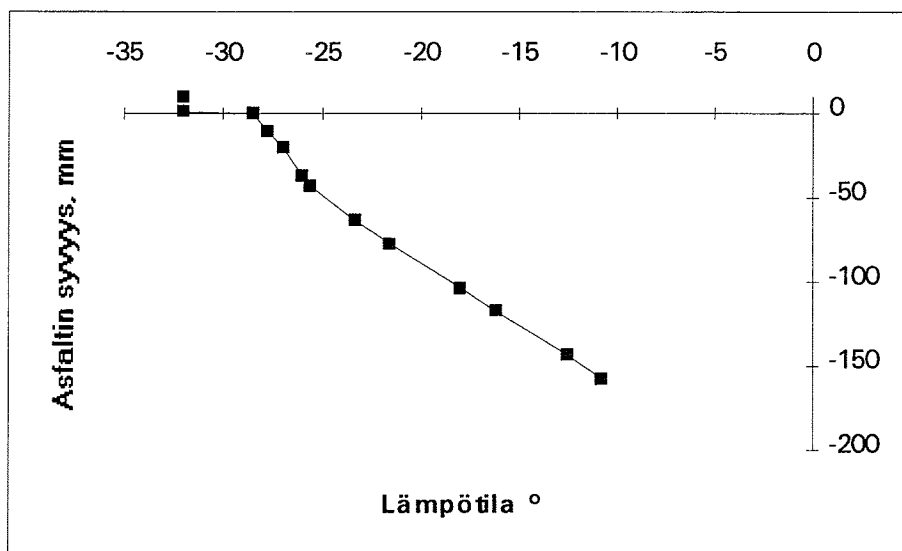
Taulukko 7: Tierakenteen vuotuiset lämpötilavaihtelut eri syvyyksillä Oulun seudulla /17/

Syvyys tien pinnasta, m	Lämpötila, °C, max, min
0,1	+22,3... -12,1
1,0	+19,0... -4,6
2,0	+14,0... -0,6
3,0	+10,7... +1,0

Lämpötilan muutoksen suuruus vuoden aikana on taulukon 7 mukaan asfalttipäällysteen alla olevassa pisteessä noin 35 °C ja 3,0 metrin syvyydellä noin 10 °C. Aurinkoisena ja pilvisenä päivänä asfalttipäällysteen lämpötiloissa on

huomattava ero, vaikka ilman lämpötila on sama. Aurinkoisena päivänä päällysteen pintalämpötilan suurin arvo on noin 60 °C ja pilvisenä päivänä noin 45 °C. Noin 200 mm:n syvyydellä päällysteen pinnasta aurinkoisena ja pilvisen päivän lämpötilat ovat jokseenkin samansuuruisia /17/.

Asfalttipäällysteen lämpötilajakaumasta talvella on esimerkkinä St Anne Test Roadin mittaustulokset (kuva 23). Ulkolämpötila tammikuussa 1968 oli -32 °C ja päällystepaksuus 157 mm. Käytännön tilanteissa pakkaskauden pituus ja rakennemateriaalit on otettava erikseen huomioon.



Kuva 23: Ulkolämpötilaa -32 °C vastaava lämpötila päällysteessä eri syvyyksillä. Young et al, 1969 teoksessa /38/

Pakkaskatkot

Asfaltin kylmäominaisuudet ovat seuraavaa suuruusluokkaa:

E-moduuli	= 10 000 (1 000) - 20 000 MPa
Poissonin vakio	= 0.2 - 0.25
Vetolujuus	= 2 - 3 (8) MPa
Murtovenymä	= 10 ⁻² - 10 ⁻³ (mm/mm)
Jännitys lämpötilassa -20°C	= 0,4 - 1.5 MPa
Jännitys lämpötilassa -30°C	= 0.7 - 4.0 MPa

Poikkihalkeamatutkimuksessa päällysteen halkeamatiheydelle saatiin mm. seuraavanlaisia selitysmalleja (kaavat 11, 12, 13, 14, 15 ja 16) /28/:

$$HT = 0,00698 * PMS^{0,843} \quad r = 0,66 \quad (11)$$

$$HT = 2,565 * 10^{-7} * PIKÄ^{0,580} * PMM^{2,274} \quad r = 0,70 \quad (12)$$

$$HT = 51,5 * HVETOLUJ - 11,6 \quad r = 0,30 \quad (13)$$

$$HT = 36,7 * HVETOLUJ + 0,00124 * PMS - 15,4 \quad r = 0,42 \quad (14)$$

$$HT = -61,3 * LI + 124,7 \quad r = 0,51 \quad (15)$$

$$HT = -34,1 * PU + 109,7 \quad r = 0,41 \quad (16)$$

Kaavoissa:

HT on halkeamatiheys (halk/km)
PIKÄ on päällysteen ikä (vuotta)
PMM on (vuotuinen) maksimipakkasmäärä (vrk°C)
HVETOLUJ on halkaisuvetolujuus (MN/m²)
PMS on pakkasmääräsumma (vrk°C)
LI on liuskeisuus
PU on puikkoisuus
r on regressiokerroin (ei kuulu kaavaan)

Mallit riippuvat pakkasmäärästä tai päällysteen jäykkyydestä. Päällysteen jäykkyyttä kuvaa halkaisuvetolujuus, joka korreloi sekä bitumin tunkeuman että päällystekiviaineksen muotoarvon kanssa. Liuskeisuuden ja puikkoisuuden kasvu ja halkaisuvetolujuuden pieneneminen tapahtuvat samassa suhteessa. Päällysteen ikään liittyy tunkeuman pieneneminen ja toisaalta pakkasmääräsumman kertyminen.

Vanhan rakenteen päälle parannetuilla tieosuuksilla ei ollut enempää poikkihalkeamia kuin kokonaan uusilla teillä. Ehyiden alueiden osuus parannetuilla teillä oli jopa suurempi kuin uusilla teillä. Karkeamateriaalisissa rakenteissa esiintyy enemmän poikittaishalkeamia kuin hienorakeisissa ehkä siksi, että lämpötilavaihtelut ovat karkeassa tierakenteessa nopeampia ja suurempia kuin hienorakeisessa rakenteessa /28/.

Routahalkeamat

Keskihalkeaman syntymistodennäköisyyttä selittää routanousumuuttujista parhaiten routanousuero eli keskilinjan ja reunan routanousujen välinen ero. Kriittiseksi arvoksi on saatu noin 25 mm. Kulmanmuutoksena se on noin 1,5 % tien keskikohdalla. Ajokaistahalkeamilla kriittisen routanousukulman tasoksi on saatu noin 1,75 %. Reunahalkeamilla tien reunan routanousun kriittinen raja on noin 50 mm /2/.

Paksuilla päällysrakenteilla (>1,25 m) jo pieni routanousuero tai kulmanmuutos (< 20 mm tai < 1 %) tiepoikkileikkauksessa saa aikaan pituushalkeaman syntymisen.

Tierakenteen suurin odotettavissa oleva routanousu voidaan laskea maksimiturpoamisprosenttien perusteella seuraavasti /3/:

$$\text{Routanousu (cm)} = \text{pohjamaan maksimiturpoama-\%} * [\text{roudan syvyys (m)} - \text{routimaton rakennepaksuus (m)}] \quad (17)$$

Kaavassa 17 roudan syvyytenä voidaan käyttää tarkasteltavan alueen siirtymäkiilasyvyyttä.

Taulukko 8: Pohjamaan routivuusluokittelu /3/

Routivuus	Maalajiryhmä	Määrittysääntö: läpäisy-%		Suurin turpoama-%	
		0,074	2 mm	max	kuivissa olosuhteissa
routimaton	Sr, SrMr	< 8		7	2
routimaton	Hk	< 8	tai	7	2
		8 - 20	> 70	4	3
lievästi routiva	SrMr, HkMr	8 - 20	< 70	10	8
routiva	Hk, HkMr	20 - 35		15	9
	siHk, siHkMr	35 - 50		19 ¹⁾ (13)	7
	Sa			13	10
	Tv			12	-
erittäin routiva	Si, SiMr			23	12

¹⁾ on yksittäinen poikkeava havainto.

Taulukossa 8 tarkoitetaan kuivilla olosuhteilla pohjaveden syvyyttä > 2 m tien pinnasta syksyllä.

Delftin teknillisen yliopiston ja Oulun yliopiston sekä Oulun kehitysyksikön yhteistyönä selvitetään routanousun aiheuttamien pituushalkeamien estämistä. Hollantilaisista CAPA-elementtimenetelmää sovelletaan routanousun aiheuttamaan halkeaman mallintamiseen ja pyritään löytämään laskentamenetelmä, jolla voidaan analysoida ja suunnitella uuden ja routahalkeilleen tien päällystämis- ja vahvistamistoimenpiteitä. Halkeilun estossa käytetään teräs- ja geoverkkoa. Tutkimuksen on määrä valmistua vuoden 1994 lopussa.

5.2.2 Liikennekuormitus

Laboratoriokokeissa voidaan tutkia päällystehalkeaman syntymistä ja etenemistä kuormituskertojen funktiona. Koejärjestely on tavallisesti sellainen, että kimmoiseen alustaan jätetään rako ja alustalla olevaa asfalttipalkkia kuormitetaan dynaamisesti. Kuormitus voi olla joko taivutusta tai vetoa.

5.3 Heijastushalkeaman määritelmä

Highway Research Board, Special Report, määrittelee heijastushalkeilun pintauksen tai päällysteen halkeiluksi alla olevien halkeamien tai saumojen

yläpuolella. Tarkennettuna heijastushalkeilu on murtuma päällyste- tai pintauserroksessa, jonka syynä ja muotona on alla olevan kerroksen halkeama- tai saumakuvio. Se voi olla joko ympäristön tai liikenteen aiheuttamaa /56/.

Amerikkalaisessa vaurioinventoinnin käsikirjassa /32/ heijastushalkeamista puhutaan silloin, kun betonipäällysteen saumojen kohdalle syntyy asfalttipäällysteeseen halkeama. Tunnistaminen on helppoa sen perusteella, että halkeamien välimatka on sama kuin betonilaattojen saumojen väli. Saumojen heijastushalkeamat voivat olla pituus- tai poikkisuuntaisia. Laatan keskellä olevaa asfaltin vinoa poikkihalkeamaa ei kutsuttu heijastushalkeamaksi, vaikka se ulottui betonilaatan läpi.

Tässä yhteydessä *heijastushalkeamilla* tarkoitetaan *päällystämisen jälkeen tien pinnalla näkyviä halkeamia, jotka sijaitsevat samalla kohtaa kuin alla olevan sidotun kerroksen halkeamat lukuunottamatta routanousuerosta johtuvia halkeamia*. Rajaus johtuu siitä, että routavaurioiden korjaus vaatii useimmiten raskaita toimenpiteitä. Tällöin joudutaan yleensä poistamaan vanha sidottu kerros. Puhuttaessa routanousuerosta johtuvien halkeamien heijastumisesta käytetään termiä *routaheijastushalkeamat*.

6 JATKOTUTKIMUSSUUNNITELMA

6.1 Tutkimustarpeet ja -menetelmät

Tutkimustarpeita tarkastellaan laaja-alaisesti. Tällä hetkellä ei tunneta tarkasti halkeamien merkitystä, kehittymistä, syitä eikä halkeamien käytännön mittaamista (rekisteröimistä). Em. tekijöiden tunteminen on peruslähtökohta, kun pyritään estämään tai lieventämään heijastushalkeilua ja arvioimaan heijastushalkeilun merkitystä. Tutkimustarpeista on rajattu routanousueron aiheuttama halkeilu tarkastelun ulkopuolelle lukuunottamatta eri syistä johtuvien halkeamien erottelua.

Tutkimustarpeet voidaan karkeasti luokitella seuraavasti:

1. Halkeamat tieverkkotasolla
2. Yksittäiset halkeamat
3. Halkeamien kehittyminen
4. Eri syistä johtuvien halkeamien erottelu (tyypitys)
5. Halkeamien heijastuminen
6. Halkeamien heijastumisen estäminen
7. Halkeamien luokittelu
8. Halkeamien käytännön mittaaminen (määrä/laatu)

6.1.1 Halkeamat tieverkkotasolla

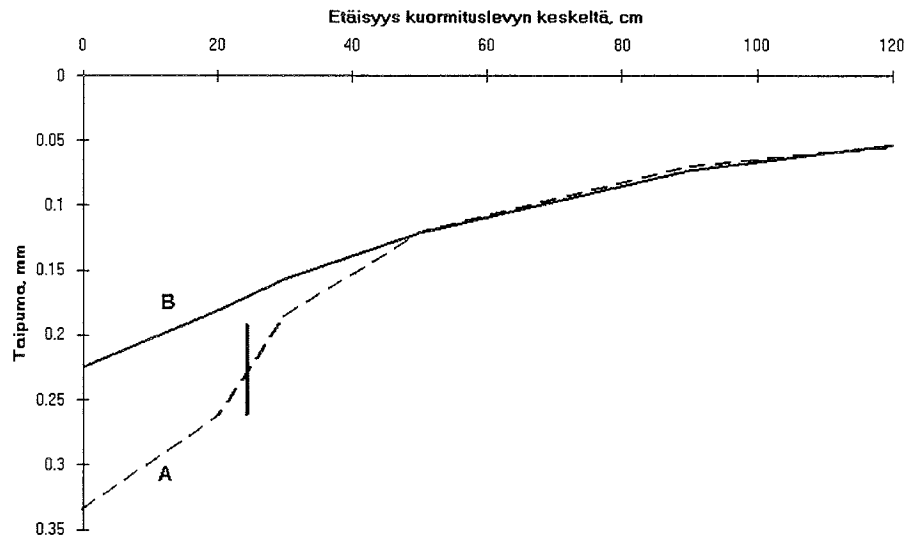
Halkeamien merkitystä tieverkkotasolla voitaneen arvioida määrittämällä vaurioiden IRI-, DRI-arvojen, kantavuuksien jne. keskinäisiä riippuvuuksia eri tavoilla luokitelluilla kuntotietorekisterin KURRE aineistolla (tieluokka, ikä jne.). Tutkimusmenetelmänä on tilastollinen tarkastelu. Kuntotietorekisterin tiedot alkavat olla nykyisin sillä tasolla, että esitetty tilastollinen tarkastelu on mielekäs.

6.1.2 Yksittäiset halkeamat

Yksittäisten halkeamien merkitystä voidaan ja tulee tarkastella ajomukavuuden (kevyet ajoneuvot), kuormituslisän (raskaat ajoneuvot) ja tierakenteen vasteen kannalta. Kuormituslisän ja tierakenteen vasteen avulla voidaan arvioida halkeaman merkitystä kestoikään.

Ajomukavuutta ja kuormituslisää voidaan tarkastella PTM-autolla mitatusta pituusprofiilista määritettyjen IRI- ja DRI-arvojen avulla. Ongelmana on se, että tulokset ilmoitetaan 100 m:n jaksoissa. Käytännössä tulokset lienee saatavissa myös hetkellisesti. Vaihtoehtona on laskea pituusprofiilista kiihtyvyysarvot tai mitata suoraan kiihtyvyyksiä.

Halkeamien merkitystä tierakenteen vasteeseen voidaan parhaiten arvioida pudotuspainolaitteen avulla. Mittauksia tulee tehdä sekä halkeamien läheisyydessä että halkeamattomissa kohdissa. Lisäksi mittauksia tulee tehdä siten, että taipuma-anturit sijaitsevat molemmilla puolilla halkeamaa. Mittausjärjestelyä on kokeiltu vt 20:llä välillä Siikakangas - Kuolio. Kokeilu osoitautui lupaavaksi (kuva 24).



Kuva 24: Kaksi taipumasuppiloa vt 20:llä. Taipumissa (A) on selvä epäjatkuvuuskohta halkeaman ollessa geofonivälillä 20 cm - 30 cm. Vertailumittaus (B) on tehty ehjistä kohdasta.

Kenttämittaushetkillä tulee olla mukana eri tyyppisiä ja toimivuudeltaan (eli vakavuudeltaan; esim. leveys) erilaisia halkeamia.

Halkeaman merkitystä urautumiseen voidaan kenttämittausten lisäksi tutkia kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa TKT-laitteen avulla. Voidaan myös seurata paikallisen pituusprofiilin muuttumista eli halkeaman porrastumista.

6.1.3 Halkeamien kehittyminen

Halkeamien määrää ja osittain vakavuutta sekä tietyn tyyppisen halkeaman vaikutusta muihin halkeamiin voidaan yleisellä tasolla selvittää tilastollisesti kuntotietorekisterin tietojen avulla.

Halkeamien ilmaantumista (näkyä tien pinnassa), lisääntymistä ja vakavuuden muuttumista samoin kuin hoitotoimenpiteiden merkitystä halkeamien käyttäytymiseen voidaan parhaiten selvittää kenttämittausten avulla. Kuormituskestävyyteen liittyvien halkeamien ilmaantumista ja lisääntymistä selvitetään TPPT-projektissa 110.50.

Hoitotoimenpiteinä tulevat lähinnä kyseeseen erilaiset halkeamien täyttämiset ja halkeamien tiivistämiset. Tutkimuskohteina tulisi olla toimivuudeltaan erilaisia halkeamia.

Väsymiseen liittyvää halkeamailmiötä (-mekanismia) sekä päälysteen ominaisuuksien merkitystä halkeaman syntyyn voidaan selvittää TKT-laitteen avulla. Lämpötilaeron aiheuttamaa halkeilua voitaneen puolestaan arvioida laboratoriossa määritettyjen asfaltin lämpöjännitysten avulla. Halkeaman kehittymistä voidaan lisäksi arvioida erilaisilla laskennallisilla menetelmillä.

6.1.4 Eri syistä johtuvien halkeamien erottelu

Periaatteessa on tunnettava, mistä syystä tietty halkeama on syntynyt, jotta voitaisiin tehdä oikea hoitotoimenpide tai estää/lieventää halkeaman heijastumista. Erityisen tärkeää on tunnistaa routanousueroista johtuva halkeilu.

Tutkimuksen lähtökohtana on halkeamakohdan routanousun (routanousu-eron) määrittäminen. Tämän jälkeen verrataan routanousun (routanousu-eron) suuruutta halkeaman leveyteen ja ulkomuotoon sekä PTM-autolla keväällä ja kesällä mitatuista pituusprofiileista ja poikittaisista epätasaisuuksista määritettyihin tunnuslukuihin (mahdollisesti joudutaan tekemään myös pudotuspainolaitemittauksia). Tarkoituksena on etsiä nopeita ja halpoja (mittauksia tehdään muiden syiden takia) keinoja, joilla voidaan luotettavasti erottaa halkeamat syiden perusteella.

6.1.5 Halkeamien heijastuminen

Halkeamien heijastumisen määrää päälystämisen yhteydessä voidaan arvioida yleisellä tasolla kuntotietorekisterin pohjalta.

Kenttätutkimuksella voidaan selvittää eri tyyppisten ja vakavuudeltaan erilaisten halkeamien heijastumista käytettäessä vakiopaksuista AB-laattaa uudelleenpäälystämiseksi. Tutkittavia asioita ovat heijastumisnopeus ja -määrä sekä heijastushalkeamien vakavuus. Tämän lisäksi kannattaisi selvittää heijastushalkeamien merkitystä ajomukavuuteen, kuormituslisiin ja tierakenteen vasteeseen (vertailukohde on tilanne ennen uudelleenpäälystämistä). Samoin kannattaisi selvittää, miten päälystäminen muuttaa tierakenteen vastetta tilanteessa, jossa ei tapahdu halkeaman heijastumista. Tutkimusaineistossa tulisi olla mukana (ennen uudelleenpäälystämistä) sekä hoidettuja että hoitamattomia halkeamia. Heijastumisnopeuteen ja -määrään liittyvä selvitystyö on aloitettu Oulun kehitysyksikössä. Kartoitettujen havaintokohteiden yleistiedot ovat liitteessä 2. Yksityiskohtaisemmat vauriotiedot ovat tallennettu Oulun kehitysyksikköön.

Kenttätutkimuksella voidaan lisäksi selvittää maabetonissa syntyvien halkeamien heijastumista päällä olevaan AB-kerrokseen ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Heijastumisilmiötä (-mekanismeja) sekä päällysteen ominaisuuksien merkitystä heijastumishalkeiluun voidaan selvittää TKT-laitteen avulla. Halkeaman heijastumista voidaan arvioida myös erilaisilla laskennallisilla menetelmillä esim. CAPA-elementtimenetelmä.

6.1.6 Halkeamien heijastumisen estäminen

Tässä yhteydessä tarkastellaan sellaisia tilanteita, joissa vanhaa asfalttia ei poisteta. Tällöin tulevat kyseeseen paksun uuden asfaltin lisäksi eri tyyppiset välikerrokset ja vahvisteet (+ vakiopaksuinen AB). Tämän lisäksi tarkastellaan maabetonissa syntyvien halkeamien heijastumisen estämistä.

Kenttätutkimuksella voidaan selvittää eri tyyppisten ja vakavuudeltaan erilaisten halkeamien heijastumista käyttäessä erityyppisiä heijastumisen estomenetelmiä. Tutkittavia asioita ovat heijastumisnopeus ja -määrä sekä heijastushalkeamien vakavuus. Tämän lisäksi kannattaa selvittää heijastushalkeamien merkitystä tierakenteen vasteeseen (vertailukohde on tilanne ennen päällystämistä) sekä miten heijastumisen estomenetelmät muuttavat tierakenteen vastetta tilanteessa, jossa ei tapahdu halkeaman heijastumista. Tutkimusaineistossa tulisi olla mukana sekä hoidettuja että hoitamattomia (ennen toimenpiteitä) halkeamia.

Heijastumisenestomenetelmiä voidaan selvittää laboratoriossa vakio-olosuhteissa TKT-laitteen avulla. Halkeaman heijastumista voidaan arvioida myös erilaisilla laskennallisilla menetelmillä lähinnä elementtimenetelmillä.

Suomessa on kokeiltu vaihtelevalla menestyksellä erilaisia heijastumishalkeilun estomenetelmiä, joiden puutteina on ollut mm. se, että ei ole kiinnitetty riittävässä määrin huomiota halkeilun syihin ja tarkastelu on rajattu siihen, heijastuuko halkeama vai ei. Puutteista huolimatta kokeilujen jälkitarkastelu on paikallaan.

6.1.7 Halkeamien luokittelu

Halkeaman vakavuudella (esim. leveys) on ilmeinen vaikutus ajomukavuuteen, kuormituslisään ja tierakenteen vasteeseen sekä halkeaman kehittymiseen. Samoin se vaikuttaa halkeaman heijastumiseen ja heijastumisen estoon. Em. syistä johtuen halkeamien luokittelua tarvitaan teiden ylläpitoon sisältyviä toimenpiteitä suunniteltaessa.

Luokituksen tulisi olla sellainen, että sitä voitaisiin helposti ja luotettavasti käyttää käytännön tilanteissa. Luokituksen tulee pohjautua edellä esitettyjen

kenttä- ja laboratoriomääritysten sekä muiden maiden kokemusten analysointiin.

6.1.8 Halkeamien käytännön mittaaminen

Yhtenä ongelmana on halkeamien ja niiden merkityksen määrittäminen käytännössä luotettavasti ja nopeasti.

Silmämääräinen halkeamien rekisteröinti edellyttää käytännössä kävelmistä kohteella ja kirjaamista käsin, jos halutaan, että kaikki halkeamat tulevat rekisteröityä. Tällöinkin on vaarana, että hiushalkeamat joko tulevat tai eivät tule mukaan. Tällä hetkellä kokeillaan vaurioiden optista mittaamista. Jos menetelmä osoittautuu käyttökelpoiseksi (halkeaman ja sen vakavuuden rekisteröityminen sijainnin perusteella), sillä voitaneen korvata silmämääräiset vauriokartoitukset. Menetelmä kaivannee lisäkehittelyä.

Halkeamien vaikutukset ajomukavuuteen ja kuormituslisään määritettäneen PTM-autolla mitatusta pituusprofiilista laskennallisesti tai mittaamalla kiihtyvyyksiä. Tällöin edellytetään hetkellisiä arvoja, jotka on sidottu tarkasti paikkaan. Ongelmaksi jäävät halkeamat, jotka eivät sijaitse mittauslinjalla.

Halkeamien merkitys tierakenteen vasteeseen on siinä mielessä ongelmallista, että se tulisi nykytietämyksen perusteella määrittää pudotuspainolaitteella. Jos kuitenkin halkeamien luokituksella päästään tilanteeseen, jossa halkeamien merkitys tierakenteen vasteeseen voidaan arvioida muiden kuin pudotuspainomittausten avulla suhteellisen luotettavasti, ongelma helpottuu merkittävästi.

6.2 Tutkimukset

6.2.1 Yleistä

Kohdassa 6.1. on varsin laajasti käsitelty tutkimustarpeita ja -menetelmiä. Eri tapauksissa on esitetty osittain samantyyppisiä tutkimusmenetelmiä, mistä syystä tuntuisi järkevältä yhdistää tiettyä tutkimusmenetelmää käyttävät asiat yhdeksi kokonaisuudeksi. Yhdistämistä puoltaa myös se, että asioilla on myös looginen yhteys. Näin menetellen jatkotutkimukset olisivat seuraavat:

1. Tilastollinen tarkastelu
2. Kenttämittaukset
3. Laboratoriokokeet
4. Laskennalliset menetelmät ja halkeamien luokittelu
5. Halkeamien käytännön mittaaminen

6.2.1 Tilastollinen tarkastelu

Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteina on selvittää yleisellä tasolla eri tyyppisten halkeamien yleisyys, vaikutukset ajomukavuuteen ja kuormituslisään sekä halkeamien ja kantavuuden välinen riippuvuus. Lisäksi tutkimuksessa tarkastellaan halkeamien määrän (ja vakavuuden) kehittymistä ja tietyn tyyppisen halkeaman vaikutusta muihin vaurioihin sekä halkeamien heijastumista päällystämisen yhteydessä.

Tutkimusohjelma

Tutkimusohjelma sisältää tilastollisen tarkastelun kuntotietorekisterin pohjalta ja suppean kirjallisuusselvityksen. Tilastollisen tarkastelun tuloksia verrataan muualla saatuihin tuloksiin.

Kustannukset

Tutkimuksen suorittaminen kestää muutaman kuukauden.

Aikataulu

Tutkimus kannattaisi käynnistää mahdollisimman pikaisesti.

6.2.3 Kenttämittaukset

Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteina on selvittää yksittäisten halkeamien merkitys ajomukavuuteen, kuormituslisään ja tierakenteen vasteeseen sekä halkeamien lisääntyminen, vakavuuden muuttuminen ja hoitotoimenpiteiden merkitys halkeamien käyttäytymiseen. Tutkimuksella selvitetään myös eri tyyppisten ja vakavuudeltaan erilaisten halkeamien heijastumista ja heijastumisen estomenetelmiä. Lisäksi tutkimuksella selvitetään, miten eri syistä johtuvat halkeamat voidaan erottaa toisistaan käytännössä. Erityisesti pyritään kehittämään menetelmä, millä routanousueron aiheuttamat halkeamat voidaan tunnistaa.

Tutkimusohjelma

Tutkimuskohteet valitaan periaatteessa seuraavasti:

Etsitään tyypillisiä halkeamia, joiden vakavuusaste (esim. leveys) poikkeaa toisistaan. Määritetään halkeamakohdan routanousu ja routanousuero. Rou-

tanousueron perusteella aineisto jaetaan kahteen osaan: varsinainen tutkimusaineisto ja routanousuerosta johtuva halkeilu.

Molempien aineistojen tutkimuskohteilla tehdään kohdan 6.1 (yksittäisten halkeamien merkitys) mittaukset ja määritykset. Tuloksena saadaan, miten halkeama vaikuttaa ajomukavuuteen, kuormituslisään ja tierakenteen vasteeseen sekä miten routanousueron aiheuttamat halkeamat pystytään erottamaan muista syistä johtuvista halkeamista.

Tämän jälkeen varsinainen tutkimusaineisto jaetaan kolmeen osaan ja tehdään kohdassa 6.1 esitetyt mittaukset ja määritykset:

1. Seurataan halkeamien kehittymistä (vakavuus, muut halkeamat). Osalle halkeamista ei tehdä mitään. Osa halkeamista hoidetaan. Tuloksena saadaan, miten halkeamat kehittyvät ja mikä merkitys hoitotoimenpiteillä on halkeamien kehittymiseen.
2. Tutkitaan halkeamien heijastumista. Halkeamakohteet päällystetään. Määritetään heijastumisnopeus ja -määrä sekä vakavuus. Ennen päällystämistä osa halkeamista on hoidettuja ja osa hoitamattomia. Tuloksena saadaan, miten halkeamat heijastuvat ja mikä on hoitotoimenpiteiden merkitys heijastumiseen.
3. Tutkitaan halkeamien heijastumisen estomenetelmiä. Halkeamakohteissa käytetään erilaisia estomenetelmiä. Ennen toimenpiteitä osa halkeamista on hoidettuja ja osa hoitamattomia. Tuloksena saadaan eri estomenetelmien tehokkuus ja miten hoitotoimenpiteet vaikuttavat tehokkuuteen.

Tutkittavia asioita on varsin paljon. Jotta koekohteiden määrä ei muodostuisi kohtuuttomaksi, kohteiden valinta tulee tehdä huolellisesti siten, että kohteet edustavat tyypillisiä tapauksia.

Kustannukset

Tutkimuksen asiallinen läpivieminen vaatisi varsin merkittävää panostusta sekä laite- että henkilöresurssien osalta. Kustannusten suuruus riippuu voimakkaasti siitä, mihin tarkkuuteen pyritään (käytännössä riippuu koekohteiden lukumäärästä).

Aikataulu

Tutkimus on osittain jo käynnistetty; Oulun kehitysyksikkö: heijastumisnopeus ja -määrä, VTT: kuormituskestävyyteen liittyvä halkeilun (pituus-halkeilu) ilmaantuminen, lisääntyminen ja heijastuminen. Muilta osin tutkimus kannattaa käynnistää vuoden 1995 alkupuolella koekohteiden valinnalla, minkä jälkeen selvitetään yksittäisten halkeamien merkitys vuoden

1995 aikana. Uudelleenpäällystämiset ja heijastumisen estokokeilut voidaan rakentaa aikaisintaan loppukesällä 1995. Tämän jälkeen tarvitaan vähintään kahden vuoden seuranta, kun selvitetään halkeamien kehittymistä ja heijastumista.

6.2.4 Laboratoriokokeet

Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteina on kehittää laboratoriomenetelmät liikennekuormituksen (liikkuva pyöräkuorma) aiheuttamien halkeamien ja niiden heijastumisen sekä heijastumisen estomenetelmien tutkimista varten siten, että menetelmillä voidaan asiallisesti testata potentiaalisia vaihtoehtoja, sekä määrittää tärkeimpien vaihtoehtojen toimivuus. (Liikkuvan kuormituksen käyttäminen poikkeaa oleellisesti pelkästä taivutuksesta. Pyörän ylittäessä halkeaman siinä tapahtuu leikkausliikkeitä.)

Tutkimuksella voidaan selvittää haluttaessa myös lämpötilaeron aiheuttama halkeilua ja sen estämistä.

Tutkimusohjelma

Liikennekuormitusta (liikkuva pyöräkuorma) voidaan simuloida Oulun yliopiston TKT-laitteella. Rakentamalla erillinen koestusala (laatikko) ja tarvittaessa instrumentoimalla se, tavoitteiden mukaiset menetelmien kehittäminen ja vaihtoehtojen testaus voidaan tehdä kohtuullisella panostuksella. Pyörän liikkeen hitaus (noin 5 km/h) voidaan kompensoida testilämpötilaa laskeamalla.

Tutkimus kannattaa tehdä kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tehdään muutama testimääritys, minkä pohjalta valitaan vaihtoehtojen testaukseen soveltuvat olosuhteet (lämpötila, kuormitus, taipuman suuruus jne). Toisessa vaiheessa tehdään vaihtoehtojen testaus.

ASTO-projektissa käytettiin erityistä mittauspalkkia päällysteen jäähtyessä siihen syntyvien lämpöjännitysten määrittämiseksi. Vertaamalla lämpöjännityksiä halkeamatiheyteen ja -leveyteen voitaisiin arvioida menetelmän käytökelpoisuutta. Mikäli menetelmä osoittautuisi käyttökelpoiseksi, sillä olisi suhteellisen edullista testata päällysteominaisuuksien vaikutusta halkeiluun.

Käytännön tilanteessa päällysteen lämpötilan lasku ei ole syvyyden suhteen tasaista, vaan lämpötila laskee pinnassa voimakkaammin kuin syvemmillä. Merkittäviä lämpöjännityksiä saattaa syntyä myös päällysteen pinnan lämpötilan noustessa nopeasti. Edellä esitettyjen tilanteiden tutkimiseen ei liene tällä hetkellä soveltuvia menetelmiä. Asia saattaisi olla jatkokehittelyn arvoisen.

Kustannukset

Liikennekuormituksen (liikkuva pyöräkuorma) aiheuttamien halkeamien ja niiden heijastumisen sekä heijastumisen estämisen tutkimusmenetelmien kehittämisen kustannukset ovat luokkaa 50 000 - 100 000 mk. Vaihtoehtojen toimivuuden testauksen kustannukset riippuvat puolestaan testien lukumäärästä.

Aikataulu

TKT-laitteen jatkokehittely kannattaisi tehdä pikaisesti, jotta ehdittäisiin testata potentiaalisia heijastushalkeilun estomenetelmiä ennen kenttäkokeita.

6.2.5 Laskennalliset menetelmät ja halkeamien luokittelu

Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteina on testata valitun (valittujen) elementtimenetelmän käyttökelpoisuus ennustettaessa halkeamien kehittymistä, heijastumista ja heijastumisen estoa kenttä- ja laboratoriotutkimuksen aineistoilla sekä luokitella halkeamat siten, että sitä voitaisiin helposti ja luotettavasti käyttää käytännön tilanteissa.

Tutkimusohjelma

Elementtimenetelmän (esim. CAPA) käyttö edellyttää tutkittavan tilanteen mallintamista ja lähtötietojen (esim. materiaaliominaisuudet) hankintaa. Osa lähtötiedoista on tällä hetkellä enemmän tai vähemmän oletuksien varassa. Tästä syystä on oleellista testata, mitä lähtötietojen muutokset vaikuttavat lopputulokseen ja verrata tulosta kenttä- ja laboratoriotutkimusten tuloksiin. Erityisesti jäätyneen maan ominaisuudet tunnetaan heikosti. Tutkimussuunnitelma tarkentunee, kun saadaan lisää kokemuksia CAPA-ohjelman käytöstä.

Halkeamien luokittelu tehdään muiden tutkimusten tulosten pohjalta ottaen myös huomioon, miten se voidaan määrittää käytännön tilanteissa. Luokituksen tulee pohjautua halkeamien merkitykseen, kehittymiseen, heijastumiseen ja heijastumisen estoon. Luokituksessa tulisi pyrkiä siihen, että tietyn tyyppisellä halkeamalla on vain yksi luokitus.

Kustannukset

Tässä vaiheessa on vaikea arvioida elementtimenetelmän testauksen kustannuksia. Halkeamien luokittelu ohjaineen vaatii arviolta kaksi henkilötyökuukautta.

Aikataulu

Jos CAPA-ohjelman käyttökokemukset osoittautuvat lupaaviksi, menetelmän testausta kannattaa jatkaa pikaisesti. Halkeamien luokittelu tehdään koko tutkimusprojektin loppuvaiheessa.

6.2.6 Halkeamien käytännön mittaaminen

Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteina on testata ja kehittää olemassa olevia mittaussysteemejä siten, että halkeamien paikka ja vakavuus sekä halkeamien merkitys ajomukavuuteen, kuormituslisään ja tierakenteen vasteeseen voidaan määrittää käytännössä luotettavasti ja nopeasti.

Tutkimusohjelma

Tutkimuksessa analysoidaan kohdan 6.2.3. kenttämittausten aineistoa ja käynnissä olevaa optista mittauskokeilua. Tarvittaessa tehdään mittaussysteemien lisäkehittelyä tai testataan muita menetelmiä.

Kustannukset

Tässä vaiheessa kustannuksia ei voi arvioida.

Aikataulu

Jos optinen mittauskokeilu onnistuu, sitä kannattaa jatkaa pikaisesti. Muiden mittausten osalta ajankohta riippuu kohdan 6.2.3. kenttämittausten aikataulusta.

7 KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Centre for Research and Contract Standardization in Civil and Traffic Engineering. 1990. Surface cracking in asphalt layers. The Netherlands. 199 s.
2. Tielaitos, kehittämiskeskus 1991. Routavaurio- ja kuivatustutkimus. Pituushalkeamat, osa I. Helsinki. 24 s. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 21/1991.
3. Tielaitos, kehittämiskeskus 1991. Routavaurio- ja kuivatustutkimus. Pituushalkeamat, osa II. Helsinki. 48 s, litt. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 22/1991.
4. Tielaitos, tutkimuskeskus 1994. Päällystevaurioiden inventointiohje. Helsinki. 44 s, liitt. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 13/1994.
5. Wågberg, Lars-Göran. Bärä eller brista. Handbok i tillståndsbedömning av belagda gator och vägar. Stockholm. Svenska Kommunförbundet, VTI och Vägverket. 42 s. ISBN 91-7099-148-0.
6. Molenaar, A.A.A. 1993. Evaluation of pavement structure with emphasis on reflective cracking. Reflective Cracking in Pavements. State of the Art and Design Recommendations. Liege, Belgium. RILEM, s. 21-48.
7. White, T.D., Coree, B.J. 1990. Threshold Pavement Thickness to Survive Spring Thaw. Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Proceedings. Trondheim, Norway, 3. - 5.7 1990. The Norwegian Institute of Technology.
8. van Gurp, C. 1994. Effect of Temperature Gradients and Season on Deflection Data. 4th International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. 17. - 21.7. 1994. University of Minnesota. Minneapolis, MN, USA.
9. Slunga, E. 1993. Physical Background of the Thaw Weakening of a Soil. Keynote Lecture. 2nd International Symposium on Frost in Geotechnical Engineering. Anchorage 28.6. - 1.7. 1993.
10. Ridgeway H.H 1982. Pavement subsurface drainage systems. National cooperative highway research program synthesis of highway practice 96. Transportation Research Board. National Research Council, Washington D.C.

11. Ravaska O. 1993. Introduction to soils and granular materials. Bitumious Pavements. Materials Design and Evaluation. Oulu 7. - 10.9. 1993. s. 2, 13, 8-12.
12. Paterson, William D.O., Horak, Emile 1992. Pavement behaviour and performance: Highlights - Part 1. Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements. Reports and conclusions. Volume five.
13. Aashto. Distress. N 66. s. 59.
14. Stina. Samarbetsprojekt för tillämpning i Norden av Aasho- undersökningen. Rapport A 1977:3.
15. Lehtipuu, E. 1983. Asfalttipäällysteet, suunnittelu - rakentaminen - kunnossapito, Helsinki 1983.
16. Transport and Road Research Laboratory 1991. Ground Engineering Applications of Geotextiles in Road Construction and Maintenance. Report of an OECD Expert Group I8 (Pilot Country: United Kindom). s. 9-13. Crowthorne, Berkshire, United Kindom.
17. Ehrola, Esko 1974. Tierakenteiden lämpötiloista, On the temperature of road structures. ISBN 951-42-0202-3. Oulu. Tie ja maarakennustekniikan laitos, julkaisu 22.
18. Colombier, Georges 1989. Fissuration des chaussées: nature et origine des fissures; moyens pour maitriser leur remontée. Reflective Cracking in Pavements. Assesment and Control. Liege, Belgium. RILEM, s. 3-22.
19. Molenaar, A.A.A. 1984. Fatigue and reflection cracking due to traffic loads. Proceedings of AAPT. Vol 53. s. 440-474.
20. de Bondt A. H. 1993. Movements of a Cracked Semi-Rigid Pavement structure. Reflective Cracking in Pavements. State of the Art and Design Recommendations. Liege, Belgium. RILEM. s. 449-457.
21. Nunn, M. E., Potter J. F. 1993. Assesment of methods to prevent reflection cracking. Reflective Cracking in Pavements. State of the Art and Design Recommendations. Liege, Belgium, RILEM, s.360-369.
22. Tielaitos, Hämeen tiepiiri 1994. Maantien 325 parantaminen välillä Huutijärvi - Sahalahden keskusta. Raportti. 25 s.
23. Jaeclin, F. P. 1993. Geotextile use in asphalt overlays - design and installation techniques for successful applications. Reflective Cracking

in Pavements. State of the Art and Design Recommendations. Liege, Belgium. RILEM. s. 100-117.

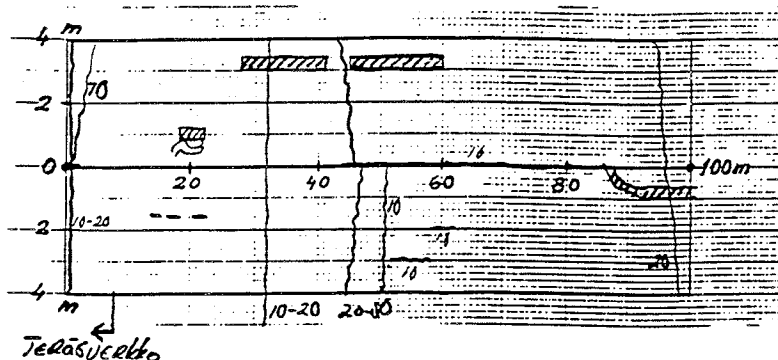
24. Rautio, Timo 1994. Masuunikuona tien kantavan kerroksen sitomisessa. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 26. 104 s.
25. Asphalt Pavement Repair Manuals of Practice. 1994. SHRP-H-348. Washington DC. 73 s. ISBN 0-309-05607-1
26. Nordiska vägtekkniska förbundet 1979. Rapport nr 1/1979.
27. Statet af pavement management systemer i Danmark, Finland, Norge og Sverige. 1987. Nordisk Vejtekknisk Forbund. Rapport 1/1987.
28. Ehrola, Esko 1986. Asfalttipäällysteiden poikittaishalkeilu matalissa lämpötiloissa ja siihen vaikuttavat tekijät. Oulu. Tie ja liikennetekniikan laboratorio, julkaisu 4. ISBN 951-42-2198-2.
29. Tielaitos, tiehallitus 1991. Teiden suunnittelu IV. Tien rakenne 7. Rakenteen parantaminen. Luonnos koekäyttöön. Helsinki. TIEL 2140002.
30. Prodax Oy 1993. KURRE Käyttöohje 04.08.1993.
31. Tielaitos, geokeskus 1993. Strategic Highway Research Program (SHRP). Long-Term Pavement Performance (LTPP). Helsinki. Tielaitoksen selvityksiä 35/1993.
32. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project. 1993. SHRP-P-338. Washington DC. 147 s. ISBN 0-309-05271-8.
33. Yliherva, Jukka 1993. Päällystetyn tieverkon kuntomittaukset ja hallintajärjestelmät. Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 10/1993.
34. Kurki, Timo 1991. Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. Mittaukset ja havainnot 1991-1992. Helsinki. Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 19/1993, 89 s. + liitt. 87 s. ISBN 951-47-6991-0.
35. Kassner, J. 1989. Theory and Practical Experience with Polyester Reinforcing Grids in Bituminous Pavement Courses. Reflective Cracking in Pavements. Assesment and Control. Liege, Belgium. RILEM. s. 343-349.

36. El Halim, A. 1989. A New Approach Toward Understanding the Problem of Reflection Cracking. Reflective Cracking in Pavements. Assesment and Control. Liege, Belgium. RILEM. s. 207-216.
37. Alenowich, J., Kekäläinen, R., Ehrola, E 1990. Minimizing Reflection and Frost Heave Crackings in Flexible and Semi-rigid Road Pavements. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 5. Oulu. 119 s. ISBN 951-42-2979-7.
38. Haas, R., Ponniah, E. J. 1989. Design Oriented Evaluation of Alternatives for Reflection Cracking through Pavement Overlays. Reflective Cracking in Pavements. State of the Art and Design Recommendations. Liege, Belgium. RILEM. s. 23-46.
39. Tielaitos, kehittämiskeskus 1992. Routavaurio- ja kuivatustutkimus. Pituushalkeamat osa III. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 34/1992. Helsinki. 16 s.
40. National Association of Australian State Road Authorities 1983. Guide to the control of moisture in roads. Sydney. 50 s.
41. Roddis, K., Maser, K., Attoh-Okine, B. 1992. Evaluation of Automated Pavement Thickness Profiling Using Radar. University of Kansas. 46 s.
42. Heavy Trucks, Climate and Pavement Damage. 1988. Road Transport Research. OECD. 176 s.
43. Saraswatula, S. R., Amirkhanian, S. N. 1992. Pavement Management Systems - State of the Art. Pavement Management Implementation. Philadelphia. s. 47-62. ASTM STP 112.
44. Baladi, G. Y., Novak, E. C., Kuo, W. H. 1992. Pavement Condition Index - Remaining Service Life. Pavement Management implementation. Philadelphia. s. 63-90. ASTM STP 112.
45. Tielaitos, tiehallitus 1992. Päällystystöiden yleiset arvonmuutosperusteet. Helsinki. 9 s.
46. Tielaitos, tiehallitus 1991. Tierakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Päällystystyöt. Helsinki. 43 s.
47. A. E. H Omar A. El Halim 1992. Improving the Properties of Asphalt Pavements through the Use of Amir Compactor: Laboratory and Field Verification. Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements. Reports and conclusions. Volume four. Nottingham. p. 79-93.

48. Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes. Executive summary. 1992. SHRP Project A-003A. Draft. Berkeley. 311 s.
49. Jacobs, M. M. J., de Bondt, A. H., Molenaar, A. A. A., Hopman, P. C. 1992. Cracking in Asphalt Concrete Pavements. Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements. Design. Volume 1. Nottingham. p. 89-105.
50. Kim, Y. R., Little, D. N., Benson, F. C. 1990. Chemical and Mechanical Evaluation on Healing Mechanism of Asphalt Concrete. Asphalt Paving Technology. Vol 59. s. 240-275.
51. Francken, L., Vanelstraete, A. 1992. Interface Systems to Prevent Reflective Cracking. Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements. Design. Volume 1. Nottingham. p. 45-60.
52. Arand, W. 1993. Zum einfluss tiefer Temperaturen auf das Ermüdungsverhalten von Asphalten. Strasse und Autobahn, Heft 10/1983.
53. Haas, R., Hudson, W. R., Zaniewski, J. 1994. Modern Pavement Management. Florida. 583 s.
54. Holt, F. B., Gramling, W. L. (ed) 1992. Pavement Management Implementation. Symposium at Atlantic City, NJ. June 26-27 1991. Ann Arbor, MI. 502 s.
55. Colombier, G., Marchand, J. P. 1993. The Precracking of Pavement Underlays Incorporating Hydraulic Binders. Reflective Cracking in Pavements. State of the Art and Design Recommendations. Liege, Belgium. RILEM. s. 273-281.
56. von Quintus, H. L., Treybig, H. J., McCullough, B. F. 1979. Reflection Cracking Analysis for Asphalt Concrete Overlays. Asphalt Paving Technology 1979. vol 48. Ann Arbor, Michigan. s. 477-506.
57. Halonen, P., Huhtala, M., Laitinen, V. 1993. Dynaaminen rasitusindeksi (DRI). Helsinki. Tielaitos, Tutkimuskeskus. Tielaitoksen selvityksiä 74/1993, 41s. +liitt. ISBN 951-47-8130-9. ISSN 0788-3722. TIEL 3200198.

VAURIOKARTOITUSLOMAKE

Tiepiiri Oulu Tiemestaripiiri Kempele
 Tien nro 21.86 Tieosan nro 25 Paaluväli 400-500
 Pvm 31.5.94 Kartoittaja M Heikkinen / J Jalonen



Vauriosymbolit:

Epä-tasaisuus		Pituus-halkeama ja leveys (mm)		Poikki-halkeama ja leveys (mm)	
Verkko-halkeama		Paikattu		Reikä	
Porrastunut halkeama		Juotettu sauma			

Olosuhdetiedot: (rengasta oikea vaihtoehto)

- ▶ Kuivatus toimii ei toimi (tarvittaessa selvitys kääntöpuolelle)
- ▶ Peitteisyys metsä hakattu metsä peitto suo
- ▶ Geometria tasainen mäki suoja kaarre sivukalteva
- ▶ Tasaus 0-tasaus maaleikkaus kallioleikkaus pengeri
- ▶ Poikkileikkausmuoto hyvä tyydyttävä huono

Sidontapaalu



Paalunro = täydet 100 metrit tieosan alusta



OULUN TIEPIIRIN HAVAINTOTIET

Vauriokartoitus tehty 100 m:n jaksoina ennen v. 1994 tehtyjä korjaustoimenpiteitä.

SIJAINNITIEDOT		RAKENNETIETOJA		
Tien nro	PLV	Alusta	Päällyste	Lisäselvitykset
Tieosan nro				
<u>Vt 20</u>			AB 1987	
31	0 - 300	Sitom. kantava		
32	4500 - 4700	Sementtistab.		
	7600 - 7800	VBST		
	8200 - 8400	VBST		
	8600 - 8900	Sementtistab.		
	10100 - 10440	BSK		
33	10800 - 11000	Sementtistab.		
<u>Vt 4</u>		ABK	TAS+SMA 1991	
365	5100 - 5300			
	5700 - 6000			
<u>Pt 18777</u>			ÖS 1992	
01	4615 - 4715	Sitom. kantava		
02	0 - 100	Sitom. kantava		
<u>Vt 4</u>			AB 1993	
340	1500 - 2000	Sitom. kantava		
341	200 - 700	Sitom. kantava		
405	300 - 1200	Sementtistab.		
407	6800 - 6920	VBST Paik.sek.		
	6920 - 7320	Ek.bit. Paik.sek.		
	7320 - 7700	Ek.bit. Asema sek.		
<u>Kt 78</u>			PAB 1993	
209	1300 - 2200	VBST		Massanv. plv 1300-1360 Teräsverkot plv 2020-2060 ja 2100-2200
<u>Vt 4</u>				
363	2100 - 2700	AE	Jyrsintä 1994	
<u>Vt 8</u>				
438	3800 - 4300	AB	Remixer 1994	
<u>Vt 4</u>				
403	2000 - 3000	ABKRC	SMA 1994	Kuona
<u>Vt 4</u>				
362	2900 - 3500	AB	Remixer 1995	
	5900 - 6100			

SIJAIN TIEDOT		RAKENNETIETOJA		
Tien nro Tieosan nro	PLV	Alusta	Päällyste	Lisäselvitykset
<u>Kt 78</u> 118 119	0 - 600 1600 - 2200	SrM	PAB 1994	Teräsverkot plv 0-400 ja 480-560 Massanv. plv 1700-1900 Teräsverkot plv 1900-2000
<u>Kt 85</u> 26	1500 - 2200 3000 - 3200	Sementtistab.	AB 1994	Teräsverkot plv 1560-1760 Teräsverkot plv 3140-3200
<u>Kt 86</u> 25 26 27	100 - 200 600 - 1000 1200 - 1500 5700 - 6100	AB	Remixer 1994	Teräsverkot plv 280-400 Teräsverkot plv 1210-1330 ja plv 1430-1500 Kappalekuona (~30 cm) plv 5700-6040
<u>Kt 88</u> 06 07	200 - 600 3900 - 4000 5600 - 5800	Sementtistab.	PAB 1994	Teräsverkot plv 320-360 Teräsverkot plv 3900-4070 Massanv. + masuunihiekka 40 cm plv 4070-4150 Teräsverkot plv 5680-5770
<u>Vt 20</u> 23 24	3700 - 4400 1800 - 2300	VBST	AB 1994	Massanv. plv 3700-3800 Teräsverkot plv 4200-4400 Massanv. plv 1800 - 1940 ja plv 2200-2300

TIELAITOKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 32/1993 V-poikkileikkaus ja teräsverkot tierakenteissa; Tulokset V-poikkileikkauksen ja teräsverkkojen käyttökokeista tien pituussuuntaisten halkeamien ehkäisyssä. TIEL 4000043
- 48/1993 Geopalveluiden maksu- ja mittausperusteet; Geopalveluyksiköiden tuloslaskelmat. TIEL 4000049
- 48/1994 Päällystettyjen teiden heijastushalkeilun esto, esiselvitys. TIEL 4000088

TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
- 5/1993 Arktinen tienrakentaminen, Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. TIEL 3100011

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1992 Pystyajanauhojen laatuvaatimukset; laadunvalvonta ja testausmenetelmät. TIEL 3200057
- 31/1992 Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen. TIEL 3200086
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099
- 62/1992 Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkaskestävyyteen. TIEL 3200112
- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT), perussuunnitelma. TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus. TIEL 3200119
- 78/1992 PTM-auton tuottamien tunnuslukujen käyttökelpoisuus ja vertailtavuus sekä niiden yhteys laser-mittauksiin (IRI, IRI4, PI/Laser). TIEL 3200134
- 8/1993 Sitomattoman kantavan kerroksen rakentaminen. TIEL 3200135
- 15/1993 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200142
- 16/1993 Betonipäällysteen seuranta; Vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 1. TIEL 3200144
- 19/1993 Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. TIEL 3200145
- 20/1993 Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 26/1993 Bentoniittimattojen ja muovikavojen kelpoisuus pohjaveden suojaukseen, tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
- 34/1993 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, esitutkimus. TIEL 3200159
- 36/1993 Palaturpeen käyttö lämmöneristeenä, raportti koerakenteiden rakentamisesta. TIEL 3200161
- 38/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
- 39/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
- 40/1993 Teiden tasaisuusmittareiden vertailu; PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. TIEL 3200165
- 41/1993 Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 47/1993 Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. TIEL 3200172
- 59/1993 Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P - Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 71/1993 Nonwoven Geotextiles in Road Constructions. TIEL 3200193E
- 76/1993 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus 1992-1993. TIEL 3200200
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201
- 81/1993 Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi, tutkimusraportti. TIEL 3200205
- 82/1993 Emulsiopäällysteiden suunnittelu ja rakentaminen. TIEL 3200206
- 4/1994 Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement Performance (LTPP); Materiaalimodulin määrittäminen takaisinlaskentaohjelmalla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit. TIEL 3200213
- 7/1994 Tien pohja- ja päällysrakenteet, tutkimusohjelma (TPPT). Tutkimusohjelma vuosille 1994-2000. TIEL 3200218
- 8/1994 Roudan vaikutusten mallintaminen. TIEL 3200219
- 12/1994 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1992-1993. Roudan sulamisen simulointi, pohjaveden pinnan vaikutus korkeassa lämpötilassa ja päällysteen reunan vaikutus. TIEL 3200223
- 24/1994 Tien pohja- ja päällysrakenteet - tutkimusohjelma (TPPT); Työn toiminta- ja laatusuunnitelma vuodelle 1994. TIEL 3200234
- 28/1994 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Vuoden 1993 kuormituskokeet. TIEL 3200238
- 30/1994 Kallioleikkaukset. TIEL 3200240
- 45/1994 Maan routimisen termomekaaninen malli ja sen laskelmat. TIEL 3200254
- 47/1994 Masuunihiekan käyttö päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200256
- 53/1994 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, loppuraportti. TIEL 3200262
- (Geotekniikan informaatiojulkaisuja:)*
- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 23/1993 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoituserusteet. TIEL 3200150
- 39/1994 Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. TIEL 3200248
- 42/1994 Nauhapystyöjitys. TIEL 3200251