

Laatutekijöiden vaikutus päällysteen elinkaareen

Konetekniikan
Kandidutkielma

Laatija:
Kasper Lehtinen

4.6.2026
Turku

Kandidutkielma

Oppiaine: Konetekniikka

Tekijä: Kasperi Lehtinen

Otsikko: Laatutekijöiden vaikutus päällysteen elinkaareen

Ohjaajat: Professori, Oskar Karlström

Väylävirasto, Katri Eskola ja Ossi Saarinen

Sivumäärä: 59 sivua, 7 liitesivua

Päivämäärä: 4.6.2026

Tiivistelmä

Tässä kandidutkielmassa tarkastellaan päällystystyön laadullisten tekijöiden vaikutusta asfalttipäällysteen käyttöikään sekä käyttöiän kautta muodostuviin elinkaaripäästöihin. Päällystysurakoiden päästölaskenta painottuu nykyisin pääasiassa materiaalien, valmistuksen, kuljetusten ja levityksen aiheuttamiin päästöihin, vaikka päällysteen käyttöikä vaikuttaa olennaisesti siihen, kuinka usein tie joudutaan päällystämään uudelleen ja kuinka paljon päästöjä syntyy pitkällä aikavälillä.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jota täydennettiin asiantuntijahaastattelulla sekä urakkakohtaisilla esimerkkilaskelmilla. Tarkastelu rajattiin päällysteen valmistukseen, kuljetukseen ja levitykseen liittyviin päästöihin sekä käyttöiän kautta syntyviin välillisiin vaikutuksiin. Työssä ei laadittu täydellistä elinkaariarviointia, vaan päästöjä vertailtiin eri käyttöikäskenaarioiden välillä. Esimerkkitapauksina päästölaskelmissa hyödynnettiin kahta valtion päällystysurakan kohdetta vuosilta 2025 ja 2026.

Tulosten perusteella päällysteen käyttöikä on yksi merkittävimmistä kokonaispäästöihin vaikuttavista tekijöistä. Työvirheet, kuten lajittuminen, puutteellinen tiivistys ja lämpötilapoikkeamat, voivat lyhentää käyttöikää merkittävästi ja lisätä kunnossapitotarvetta. Kierrätysasfaltin (RAP) käytöllä voidaan vähentää neitseellisten materiaalien käyttöä sekä alkuvaiheen päästöjä, mutta saavutettavat hyödyt riippuvat ratkaisevasti päällysteen toimivuudesta, sideaineiden sekoittumisesta sekä käyttöiän säilymisestä. Lisäksi kuljetusmatkoilla todettiin olevan merkittävä vaikutus sekä päästöihin että massan laadulliseen säilymiseen.

Työn perusteella päällystysratkaisuja tulisi tarkastella päästöinä käyttövuotta kohti sen sijaan, että arviointi perustuisi pelkästään yksittäisen urakan kokonaispäästöihin. Käyttöiän hallinta, laadukas toteutus, työvirheiden ehkäisy sekä kohdekohtainen suunnittelu ovat keskeisiä keinoja elinkaaripäästöjen vähentämisessä. Työssä luodaan myös pohjaa ja alustava runko seurantatyökalulle, jota pyritään jatkokehityksen jälkeen hyödyntämään tulevaisuudessa päällysteen käyttöiän, laadun ja päästöjen systemaattisessa arvioinnissa urakkatasolla.

Avainsanat: päällysteen käyttöikä, päällysteen elinkaari, päällystysten työvirheet, päällysteen laatu, RAP, kierrätysasfaltti

Alkusanat

Tämä kandidaatintutkielma on toteutettu yhteistyössä Väylävirasto kanssa. Kiitän Väylävirastoa mahdollisuudesta perehtyä ajankohtaiseen ja mielenkiintoiseen tutkimusaiheeseen sekä osallistua alan kehittämiseen kandidaatintutkielman kautta.

Yhteistyö Väyläviraston kanssa sekä tutkimusaiheen ajankohtaisuus ja monipuolisuus herättivät työn aikana laajaa kiinnostusta aihealuetta kohtaan. Tutkielman edetessä työn rajaus laajeni alkuperäistä suunnitelmaa laajemmaksi, minkä seurauksena työstä muodostui suositeltua laajempi kokonaisuus. Aiheen käytännönläheisyys sekä merkitys alan tulevaisuuden kannalta motivoivat perehtymään aiheeseen tavanomaista syvällisemmin.

Työn ohjaajina toimivat professori Oskar Karlström Turun yliopistosta sekä Katri Eskola ja Ossi Saarinen Väylävirastolta. Kiitän ohjaajiani asiantuntevasta ohjauksesta sekä rakentavista kommentteista.

Lisäksi kiitän Super Asfaltti Oy:n toimitusjohtaja Timo Mäkeä käytännönläheisestä ohjeistuksesta, asiantuntijahavainnoista sekä työn aikana käydyistä keskusteluista. Erityinen kiitos myös mahdollisuudesta toteuttaa kandidaatintutkielma päivätyön ohella.

Kiitän myös Mitta Oy:n Sami Similää ammattitaitoisesta ohjeistuksesta, teoreettisista keskusteluista sekä haastatteluista.

Raisiossa 4.6.2026

Kasper Lehtinen

Sisällysluettelo

1	Johdanto	8
1.1	Tausta	8
1.2	Tutkimusongelma	8
1.3	Tavoite	9
1.4	Tutkimuskysymykset	9
1.5	Tutkimuksen rajaus	9
1.5.1	Tekoälyn käyttö tutkimuksessa	10
2	Elinkaaripäästöjen tarkastelu	11
2.1	Elinkaariajattelu	11
2.2	Päästöt päällystystyössä	11
2.3	Ympäristövaikutusten laskelma Suomessa	12
3	Päällysteen käyttöikään vaikuttavat tekijät	14
3.1	Kierrätysasfaltin (RAP) vaikutus	14
3.1.1	RAP:n sekoittumisaste ja kosteuspitoisuus	15
3.1.2	Kierrätysasfaltin käyttömäärien vaikutukset	15
3.1.3	Kierrätysasfaltin optimointi	19
3.2	Urautuminen	20
3.2.1	Liikenteen vaikutus	21
3.2.2	Plastinen muodonmuutos	21
3.2.3	Sääolosuhteet	21
3.2.4	Virumiskestävyys	22
3.2.5	Sideaineen vaikutus	22
3.2.6	Sitkeysmoduuli	23
3.2.7	Tyhjätila	25
3.3	Urautumisen ehkäisy	25
3.4	Lajittuminen	26
3.4.1	Lajittumisen syyt	27
3.4.2	Lajittumisen seuraukset	28
3.4.3	Valmistuksen ja varastoinnin vaikutukset	29
3.4.4	Lastaus, kuljetus ja purkaminen	31
4	Työvirheet	34

4.1	Työvirheet ja laadulliset haitat	34
4.1.1	Työvirhe esimerkki	34
4.2	Työvirheiden ehkäisy ja korjaaminen	36
4.2.1	Kohdekohtainen täsmäsuunnittelu	37
4.2.2	Massan lämpötila	37
4.2.3	Asfaltin homogeenisuus	38
4.2.4	Syöttökoneen käyttö	38
4.2.5	Tiivistyksen vaikutus	40
4.2.6	Ohjeistus ja valvonta	41
5	Haastattelut	42
6	Ympäristövaikutusten laskelmat	43
6.1	Laskentamenetelmät	43
6.2	Päästökertoimien vaikutukset	43
6.3	Kuljetusmatkan vaikutus päästöihin	44
7	Johtopäätökset ja pohdinta	47
7.1	Käyttöikä ja päästöt	47
7.1.1	Kuljetusmatkan vaikutus päästöihin sekä laatuun	48
7.2	Laadullisten tekijöiden vaikutus käyttöikään	48
7.3	Materiaalivalinnat	49
7.4	Seurantatyökalun runko	50
7.5	Työn rajoitteet ja epävarmuudet	50
7.6	Jatkotutkimustarpeet	50
7.7	Pohdinta	51
8	Yhteenveto	55
	Lähteet	57
	Liitteet	60
	Liite A. Väylävirasto, ympäristövaikutusten laskennat 2025	61
	Liite B. Kulumisen vertailun kuvat	62
	Liite C. Päästölaskennoissa hyödynnetyt arvot	63
	Liite D. Tien kunnon arviointi, teiden kuntoluokitus	64

Liite E. Haastattelukysymykset, Mitta Oy Sami Similän haastattelu	65
Liite F. Koneiden havainnekuvat	66

TERMIT JA KÄSITTEET

- AB (Asfalttibetoni) – Yleisesti käytetty eri rakennekerrosten asfaltti, jonka rakeisuuskäyrä on jatkuva
- Asfalttimassa (HMA) – Kuumasekoitettu asfalttimassa, joka koostuu kiviaineksesta, bitumisideaineesta ja tyhjätilasta.
- Elinkaariarviointi (LCA) – Menetelmä, jossa arvioidaan tuotteen tai prosessin ympäristövaikutuksia koko elinkaaren aikana.
- Elvytin (rejuvenator) – Lisäaine, jolla pyritään palauttamaan kierrätysasfaltin sideaineen ominaisuuksia.
- Käyttöikä (service life) – Aika, jonka päällyste säilyttää vaaditun toiminnallisuuden ennen korjaustarvetta.
- Lajittuminen (segregation) – Ilmiö, jossa asfalttimassan rakenne tai lämpötila jakautuu epätasaisesti
- Plastinen muodonmuutos (plastic deformation) – Pysyvä muodonmuutos, joka syntyy materiaalin kuormituksen seurauksena.
- RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) –Kierrätysasfaltti, vanhasta päällysteestä jyrstetty tai murskattu materiaali, joka sisältää kiviaineksen ja bitumin. Suomessa yleisemmin käytetty termi RC.
- Rapautuminen (deterioration) – Päällysteen pinnan kuluminen ja kivirakeiden irtoaminen
- RAP% – Kierrätysasfaltin osuus uudesta asfalttimassasta, esim. RAP25 – asfalttimassa sisältää 25 % kierrätysasfalttia. Suomessa yleisemmin RC%.
- Reologiset ominaisuudet – Materiaalin virtaus- ja muodonmuutosominaisuudet, jotka kuvaavat sideaineen käyttäytymistä eri lämpötiloissa ja kuormitustilanteissa
- Sideaine (bitumi) – Asfalttimassan osa, joka sitoo kiviaineksen yhteen.
- SMA (Stone Mastic Asphalt) – Suuren kulutuskestävyyden omaava karkean rakeisuuskäyrän omaava kuitupituinen asfaltti.
- Tunkeuma-arvo (penetration value) – Kuvaava bitumin kovuus luokkaa. Todetaan standardisoidulla neulan tunkeuma kokeella.
- Tyypitestausta – Asfalttimassan testaus, jolla ilmoitetaan sen ominaisuuksien vastaavan standardien vaatimuksia.
- Tyhjätila (%) (air void content) – Kiviaineksen väliin jäävien huokosten osuus asfalttimassan tilavuudesta.
- Urautuminen (rutting) – Ilmiö, jossa tien pintaan muodostuu ajouria toistuvan liikennekuormituksen seurauksena.
- Viruminen (creep) – Ajan myötä tapahtuva pysyvä muodonmuutos jatkuvan kuormituksen alaisena.

1 Johdanto

1.1 Tausta

Globaalisti liikennesektori aiheutti vuonna 2020 yli 24 % maailman energiankäyttöön liittyvistä hiilidioksidipäästöistä, joista noin 74 % syntyi tieliikenteestä. Tieinfrastruktuurin materiaalityönnön, rakentamisen, kunnossapidon ja kierrätyksen arvioidaan muodostavan noin 5–25 % tieliikennejärjestelmän kokonaisista hiilidioksidipäästöistä [1]. Teiden rakentaminen ja kunnossapito aiheuttavat suoria päästöjä erityisesti raaka-aineiden tuotannon, kuljetusten ja päällystemateriaalien valmistuksen kautta. Lisäksi tieverkon kunto vaikuttaa epäsuorasti liikenteen päästöihin esimerkiksi ajovastuksen, polttoaineenkulutuksen ja kunnossapitotarpeen kautta. Vaikka ajoneuvojen käytönalikaisiin päästöihin on kohdistettu paljon huomiota, tieinfrastruktuurin rakentamisesta aiheutuvat päästöt ovat jääneet vähemmälle tarkastelulle [2]. Tämä korostaa tarvetta huomioida tieinfrastruktuurin kehittämisessä sekä suorat että epäsuorat päästövaikutukset.

Päällystetyissä teissä esiintyy erilaisia vaurioita, joita aiheuttavat muun muassa liikennekuormitus, vaihtelevat ilmasto-olosuhteet, maan routiminen sekä puutteet päällystystyön toteutuksessa ja laadussa. Näistä erityisesti liikenteen aiheuttama kuormitus, laatu- sekä työvirheet vaikuttavat merkittävästi päällysteen kestävyys- ja käyttöikänsä. Päällysteiden vaurioituminen johtaa lisääntyneeseen kunnossapitotarpeeseen, mikä kasvattaa sekä kustannuksia että päästöjä [3]. Viime vuosina päästöjen vähentämiseen on pyritty muun muassa materiaalivalinnoilla, kuten kierrätysasfaltin käytöllä, sekä energiatehokkaammilla tuotantomenetelmillä. Pelkkä suorien päästöjen vähentäminen ei kuitenkaan ole riittävää, vaan keskeistä on myös päällysteen käyttöikänsä ja elinkaaren tarkastelu [4].

1.2 Tutkimusongelma

Vaikka päällystystyön päästöjä ja materiaaliratkaisuja on tutkittu laajasti, käyttöikänsä ja laadullisten tekijöiden vaikutusta päästöihin ei ole tarkasteltu riittävän systemaattisesti. Erityisesti työvirheiden, kuten lajittumisen, puutteellisen tiivistyksen ja lämpötilapoikkeamien, vaikutus elinkaaripäästöihin jää usein epäsuoraksi tai kokonaan huomioimatta [1], [3], [5]. Tämän vuoksi päätöksenteko painottuu helposti yksittäisen urakan alkuvaiheen päästöihin, vaikka käyttöikänsä lyheneminen voi kasvattaa kokonaispäästöjä huomattavasti.

1.3 Tavoite

Työn tavoitteena on selvittää, miten päällystystyön laadulliset tekijät vaikuttavat päällysteen käyttöikään ja miten käyttöiän muutokset heijastuvat päästöihin. Lisäksi tavoitteena on kehittää Väylävirastolle päällysteen käyttöikää seuraava työkalun runko, jonka avulla voidaan kerätä ja analysoida tietoa käyttöikään ja elinkaareen vaikuttavista laadullisista tekijöistä ja valinnoista valtion päällystysurakoissa tulevaisuudessa.

Työ perustuu käytettävissä olevaan aineistoon ja soveltuu ensisijaisesti vertailuun sekä kehitysehdotusten esittämiseen. Se ei pyri määrittämään yhtä yleispätevää käyttöikää tai optimaalista massaratkaisua, vaan korostaa kohdekohtaista tarkastelua ja työnaikaisen laadun merkitystä.

1.4 Tutkimuskysymykset

1. Miten päällystystyön laadulliset tekijät, erityisesti työvirheet ja lajittuminen, vaikuttavat päällysteen käyttöikään?
2. Miten päällysteen käyttöiän muutokset vaikuttavat päällystysten elinkaaripäästöihin?
3. Miten materiaalivalintojen ja käyttöiän yhteisvaikutus vaikuttaa päällystysten kokonaispäästöihin?
4. Millainen seurantatyökalu mahdollistaisi käyttöiän, laadun ja päästöjen systemaattisen tarkastelun urakkatasolla?

1.5 Tutkimuksen rajaus

Tarkastelu rajataan päällysteen valmistukseen, kuljetukseen ja levitykseen liittyviin päästöihin sekä käyttöiän kautta syntyviin välillisiin vaikutuksiin. Työssä ei toteuteta täydellistä elinkaariarviointia eikä laboratoriokokeita tai kenttämittauksia. Päästötarkastelu perustuu eri käyttöikäskenaarioiden vertailuun. Tutkimus koostuu kirjallisuuskatsauksesta, päästölaskentavertailuista ja asiantuntijahaastattelusta.

Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan aiempaa tutkimustietoa päällysteiden käyttöiästä, urautumisesta, lajittumisesta, kierrätysasfaltin käytöstä sekä päällysteiden ympäristövaikutuksista. Kirjallisuuden, päästölaskelmien ja asiantuntijahaastattelun avulla

muodostetaan teoreettinen viitekehys, jonka pohjalta arvioidaan päällysteen käyttöön vaikutusta ympäristövaikutuksiin.

Haastatteluiden tavoitteena oli täydentää kirjallisuudesta saatua tietoa käytännön näkökulmilla erityisesti päällysteen laadun, työvirheiden, kierrätysasfaltin käytön sekä käyttöön seurannan osalta. Työssä viitataan muun muassa Mitta Oy:n, asfaltti- ja kiviaineslaboratorion palvelupäällikön Sami Similän haastatteluihin ja keskusteluihin. Lisäksi hyödynnetään käytännön päällystystyössä tehtyihin havaintoihin sekä Super Asfaltti Oy:n toimitusjohtajan Timo Mäen kanssa käytyihin keskusteluihin perustuvaa tietoa ja pohdintaa.

Luvussa 2 tarkastellaan päällysteiden elinkaaripäästöjä, elinkaariajattelua sekä päällystystyön keskeisiä päästölähteitä. Luvuissa 3 ja 4 käsitellään päällysteen käyttöikään vaikuttavia tekijöitä, kuten työvirheitä, lajittumista ja muita kestävyYTEEN vaikuttavia ilmiöitä. Luvussa 5 esitellään tutkimuksessa hyödynnetyt asiantuntijahaastattelut ja niiden merkitys tutkielman kannalta. Luvussa 6 esitetään ympäristövaikutusten laskelmat ja niiden toteutus. Luvussa 7 tarkastellaan työn johtopäätöksiä ja pohdintaa, ja luvussa 8 esitetään työn yhteenveto.

1.5.1 Tekoälyn käyttö tutkimuksessa

Tekoälyä on hyödynnetty ulkomaankielisten artikkelien ja tutkimusten kääntämisen tukena, tekstin oikoluvussa sekä kuvien 11 ja 12 ulkomuodon parantelussa.

2 Elinkaaripäästöjen tarkastelu

2.1 Elinkaariajattelu

Elinkaariajattelu on ajattelutapa, jossa tuotteen tai prosessin taloudelliset, ympäristölliset ja sosiaaliset vaikutukset huomioidaan koko sen elinkaaren ajan raaka-aineiden hankinnasta lopulliseen käsittelyyn [6]. Elinkaariajattelu auttaa kiinnittämään enemmän huomiota toiminnan tahattomiin vaikutuksiin ja tarjoaa mahdollisuuden pyrkiä ehkäisemään tai lieventämään näitä vaikutuksia [7]. Tieinfrastruktuurin näkökulmasta elinkaariajattelu ei tarkoita pelkästään sitä, kuinka pitkään päällysteen annetaan olla käytössä, vaan myös sitä, milloin kunnossapito- tai korjaustoimenpiteet ovat kokonaisuuden kannalta oikea-aikaisia ja järkeviä. Päällysteen käyttöiän jatkaminen voi vähentää lyhyen aikavälin päästöjä ja kustannuksia, mutta liian pitkään viivästetty korjaus voi kasvattaa kunnossapitokustannuksia, heikentää liikenneturvallisuutta ja johtaa lopulta suurempiin korjaustarpeisiin. Keskeiseksi kysymykseksi nouseekin, missä vaiheessa korjaaminen on elinkaaren kannalta optimaalisinta sekä taloudellisesta että ympäristöllisestä näkökulmasta.

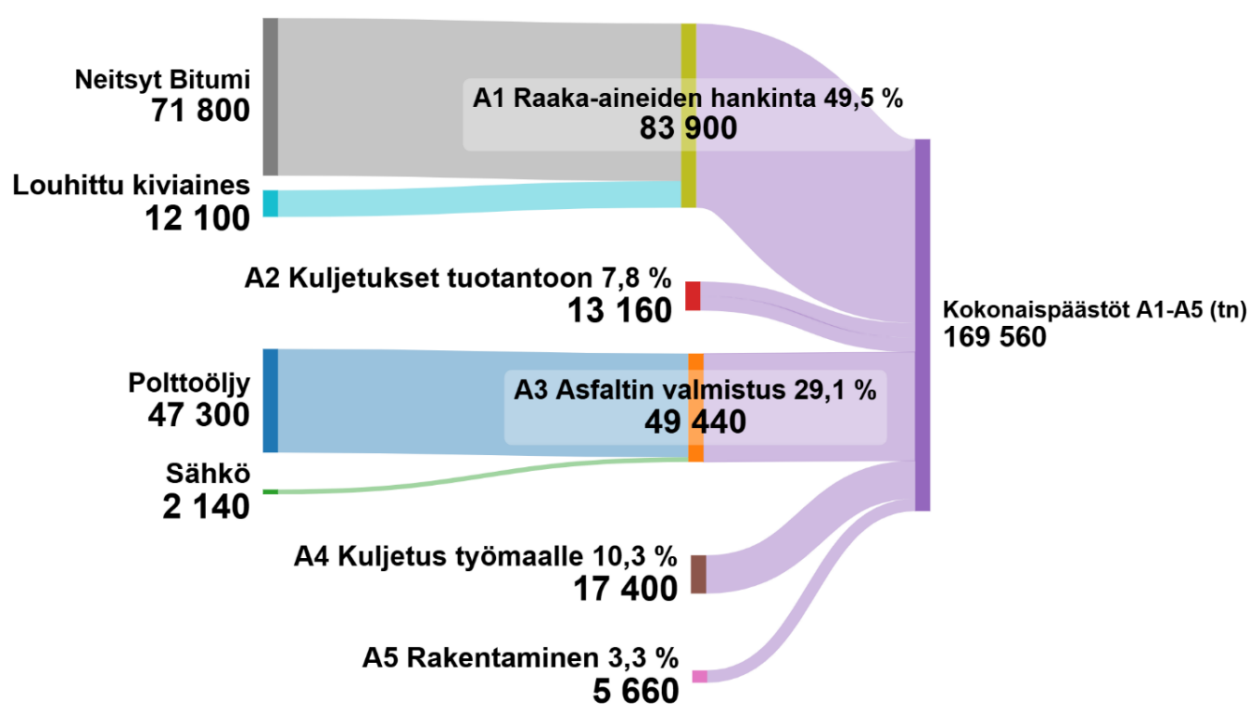
Päällystysten elinkaaritarkasteluissa on perinteisesti keskitytty materiaalien valmistukseen, rakentamiseen ja kierrätykseen, kun taas päällysteen käyttöikä ei olla huomioitu riittävästi. Käyttöikä jätettiin pitkään tarkastelujen ulkopuolelle sen haasteellisen seurannan vuoksi. Käyttöiän merkityksellisyys on tunnistettu vasta viimeaikaisissa tutkimuksissa. Päällysteen käyttöiästä aiheutuvat ympäristövaikutukset voivat energiankulutuksen ja ilmaston lämpenemispotentiaalin osalta olla useita satoja kertoja suurempia kuin muista elinkaaren vaiheista aiheutuvat vaikutukset. Tämän vuoksi päällysteen elinkaariarvioinnissa tulisi antaa suurempi painoarvo käyttöiälle, erityisesti päällysteen kestävyydelle sekä pinnan epätasaisuudelle [8]. Päällysteen käyttöiän kasvattaminen ja oikea-aikainen korjaaminen johtaa parhaimmillaan merkittäviin hyötyihin energiansäästön, ympäristövaikutusten, ihmisten terveyden, ekosysteemien säilymisen sekä luonnonvarojen ehtymisen minimoinnin kannalta [9].

2.2 Päästöt päällystystyössä

Päällystystyön päästöt syntyvät koko prosessin aikana raaka-aineiden tuotannosta valmiin asfaltin levitykseen, asfaltin hoito- ja korjaustoimenpiteistä sekä jälkikäsittelystä. Merkittävimmät päästölähteet ovat bitumin valmistus ja kuljetus, kiviaineksen louhinta ja

murskaus sekä muiden raaka-aineiden tuotanto. Toiseksi suurin osuus päästöistä muodostuu asfalttimassan valmistuksessa, erityisesti kiviaineksen kuivatuksessa ja kuumennuksessa, joissa käytetään fossiilisia polttoaineita. Kokonaispäästöihin vaikuttavat lisäksi kuljetusmatkat, kaluston tehokkuus ja käytetty polttoaine [10].

Kuvassa 1 havainnollistetaan ympäristövaikutusten laskennan A1–A5-vaiheiden päästöjen jakautumista. Tulosten perusteella merkittävimmät päästöt syntyvät raaka-aineiden hankintavaiheessa (A1) sekä materiaalin valmistusvaiheessa (A3).



Kuva 1: Ympäristövaikutusten laskennan vaiheet A1-A5, VAR ELY ET4 -urakkaan kuuluneesta kohteesta nro. 1, RAP25-massalla.

2.3 Ympäristövaikutusten laskelma Suomessa

Ympäristövaikutusten laskelma kokoaa yhteen tuotteen ja sen sovellusten tarkat, varmenneet ja luotettavat ympäristötiedot. Se perustuu elinkaariarviointiin, jossa asfalttialalla Suomessa huomioidaan vain elinkaaren alkuvaiheet A1–A5, eli raaka-aineiden hankinta, kuljetukset, valmistus sekä rakennusvaihe [10]. Laskelmat perustuvat EN 15804 -standardin mukaisiin

elinkaarilaskentoihin. [11]. Tällöin ei kuitenkaan huomioida sitä, että päästöt syntyvät eri aikoina päällysteen elinkaaren aikana, mikä voi vääristää ilmastovaikutusten arviointia. Siksi ajallinen näkökulma tulisi ottaa huomioon LCA-arvioinneissa, jotta tulokset olisivat tarkempia ja luotettavampia [9]. Ympäristövaikutukset esitetään standardin SFS EN 15804 mukaisesti [10].

Tällä hetkellä asfalttialla Suomessa laskennan ulkopuolelle on rajattu käyttövaiheen moduulit B1–B6 sekä yleisen laskentatyökalun rajoitusten takia elinkaaren loppuvaiheen moduulit C1–C4 ja moduuli D [11]. Vaiheet B1–B7 kuvaavat käyttövaihetta, C1–C4 elinkaaren loppua ja D kierrätyksestä saatavia hyötyjä. C1-C4 ja D vaiheita on huomioitu joissain yksittäisissä laskelmissa. Näitä ei tässä työssä lasketa, mutta ne ovat tärkeitä elinkaariajattelun kokonaisuuden ymmärtämiseksi.

3 Päällysteen käyttöikään vaikuttavat tekijät

Päällysteen käyttöikään vaikuttavat useat tekijät, kuten liikennekuormitus, materiaalivalinnat, sääolosuhteet, suunnittelu sekä työn laatu. Tietä voidaan pitää huonokuntoisena, jos sillä liikkua joutuu urien tai vaurioiden vuoksi vaihtamaan ajolinjaa tai jos epätasaisuus heikentää matkustusmukavuutta. Suomessa käytetään kuntoluokitusta yhdestä viiteen, 1 erittäin huono, 5 erittäin hyvä, liitteen D mukaisesti [12]. Kokonaisuutena päällysteen käyttöikä muodostuu materiaalin, rakenteen ja toteutuksen yhteisvaikutuksesta, ja laadunhallinnalla on keskeinen rooli pitkäikäisen lopputuloksen saavuttamisessa.

Asfalttimassojen valmistusta ohjaavat eurooppalaiset tuotestandardit, ja massan laatua valvotaan niiden mukaisella laadunvalvonnalla. Jokainen massakoostumus tyyppitestataan, jotta voidaan varmistaa sen täyttävän asetetut vaatimukset. Tyyppitestaus on uusittava vähintään viiden vuoden välein tai raaka-aineiden muuttuessa [13].

3.1 Kierrätysasfaltin (RAP) vaikutus

RAP:n käyttö mahdollistaa neitseellisten kiviaineksen ja sideaineen osittaisen korvaamisen, mikä vähentää raaka-aineiden louhintaa, tuotantoa ja kuljetusta. Elinkaaritarkasteluissa on havaittu, että kierrätyksen ympäristöhyödyt syntyvät pääasiassa neitseellisten materiaalien käytön vähenemisestä [9]. Korkea RAP-pitoisuus alentaa alkuvaiheen kustannuksia ja ympäristökuormitusta, mutta voi lisätä pitkän aikavälin päästöjä -ja kustannuksia, mikäli käyttöikä lyhenee tai kunnossapitotarve kasvaa. Näiden tekijöiden tasapainottaminen on keskeistä kestävästä massasuunnittelun kannalta.

Liitteessä A esitettyjen Väyläviraston vuoden 2025 päästölaskentatulosten perusteella RAP60- ja RAP0-massojen väliseksi päästövähennykseksi saadaan AB16-massalla 24,6 %. Tarkastelussa mukana olevat kohteet on valittu siten, että A4-vaiheen päästömäärä on ollut mahdollisimman yhtenäinen. Laskelmissa on käytetty uutta bitumin päästökerrointa [11], ja liitteessä A käytetyt arvot on esitetty ympyröityinä. Tämä tarkoittaa, että mikäli RAP60-massan käytöllä saavutettava päästöhyöty on 24,6 %, tulisi neitseellisestä RAP0-massasta valmistetun päällysteen käyttöikä olla noin 24,6 % pidempi kuin RAP60-massan, jotta elinkaaren aikaiset kokonaispäästöt olisivat yhtä suuret. Jos päällysteiden käyttöiät ovat samat, RAP60-massan käytöllä saavutetaan tarkastelussa tapauksessa 24,6 % pienemmät päästöt verrattuna RAP0-massaan. Tällöin päästöhyödyn säilyminen riippuu siitä, kuinka paljon RAP-massan käyttöikä poikkeaa neitseellisestä massasta.

3.1.1 RAP:n sekoittumisaste ja kosteuspitoisuus

Chenin ja Wangin tutkimuksen (2018) mukaan RAP-pitoisuuden kasvaessa kasvihuonekaasupäästöt yleensä vähenevät, mutta ympäristöhyödyt pienenevät, jos sekoittumistehokkuus heikkenee tai RAP:n kosteuspitoisuus kasvaa. RAP:n kosteuspitoisuus lisää massanvalmistuksen energiankulutusta, minkä vuoksi sen hallinta on tärkeää [4]. Korkea kosteuspitoisuus tulee poistaa ennen sekoitusta, jotta asfalttimassan laatu ei heikkene [11]. Lisäksi tutkimus osoitti, että RAP:n ympäristövaikutus voidaan yliarvioida, jos ajallista näkökulmaa ei huomioida, sillä päästöt eivät synny samanaikaisesti vaan hajoavat ajan kuluessa. RAP:n vaikutus on myös herkkä uuden sideaineen määrälle, ja raaka-aineiden säästöstä saatavat hyödyt voivat kumoutua suuremman kosteuspitoisuuden ja lyhyemmän käyttöiän vuoksi [4].

Sideaineen suorituskyky riippuu neitseellisen ja kierrätetyn sideaineen välisestä sekoittumisasteesta, joka jää usein alle 100 %:n. Tutkimusten mukaan sekoittuminen on usein vain osittaista, koska kierrätetyn kiviaineksen ympärillä olevan vanhentuneen sideaineen sisempi kerros on uutta ulompaa kerrosta jäykempi [4]. Useat muutkin tutkimukset tukevat Mitta Oy:n asiantuntijan näkemystä siitä, että makroskooppinen sekoittuminen ei välttämättä johda riittävään molekyyli-tason diffuusion, jolloin sideaineet voivat käyttäytyä täysin erillisinä faaseina [11], [4], [14].

Lehtimäen diplomityössä (2012) tutkittiin diffuusionopeutta tunkeuma-arvon muutosten avulla, lisäämällä elvytintä RAP-massan sekaan. Tulosten perusteella sekä lämpötilan nostaminen että elvyttimen vaikutusajan pidentäminen parantavat diffuusion etenemistä sisemmän ja ulomman sideaine kalvon välillä RAP-kiviaineksessa. Kyseisen tutkimuksen mukaan edullisin yhdistelmä saavutettiin 160 °C lämpötilassa ja 4 tunnin vaikutusajalla, kun käytettiin pienen viskositeetin omaavaa elvytintä [15].

3.1.2 Kierrätysasfaltin käyttömäärien vaikutukset

Monissa tutkimuksissa, liian suuri kierrätetyn asfaltin osuus on aiheuttanut ongelmia, vaikka useissa tutkimuksissa on onnistuttu hyödyntämään korkeita RAP-pitoisuuksia laboratorio- ja kenttämassoissa erilaisten lisäaineiden avulla. Elvyttimillä on potentiaalia palauttaa vanhentuneen RAP-sideaineen viskoelastisia ominaisuuksia ja kemiallista koostumusta, mikä voi parantaa kierrätetyn massan toimivuutta ja suorituskykyä [16]. Moins et al. (2022) tutkimuksen mukaan ilman kierrätysmateriaalia valmistetun kantavan kerroksen pohjamassan

käyttöiän tulisi olla noin 66 % pidempi, jotta sen taloudelliset ja ympäristövaikutukset vastaisivat ABK20 RAP70 -massaa. Kun ABK20 RAP70 -massaan lisättiin elvytinaineita, niiden käytöstä aiheutuvan lisäympäristökuorman kompensoiminen edellytti noin 13 % pidempää käyttöikää verrattuna vastaavaan RAP-massaan ilman elvytintä [17].

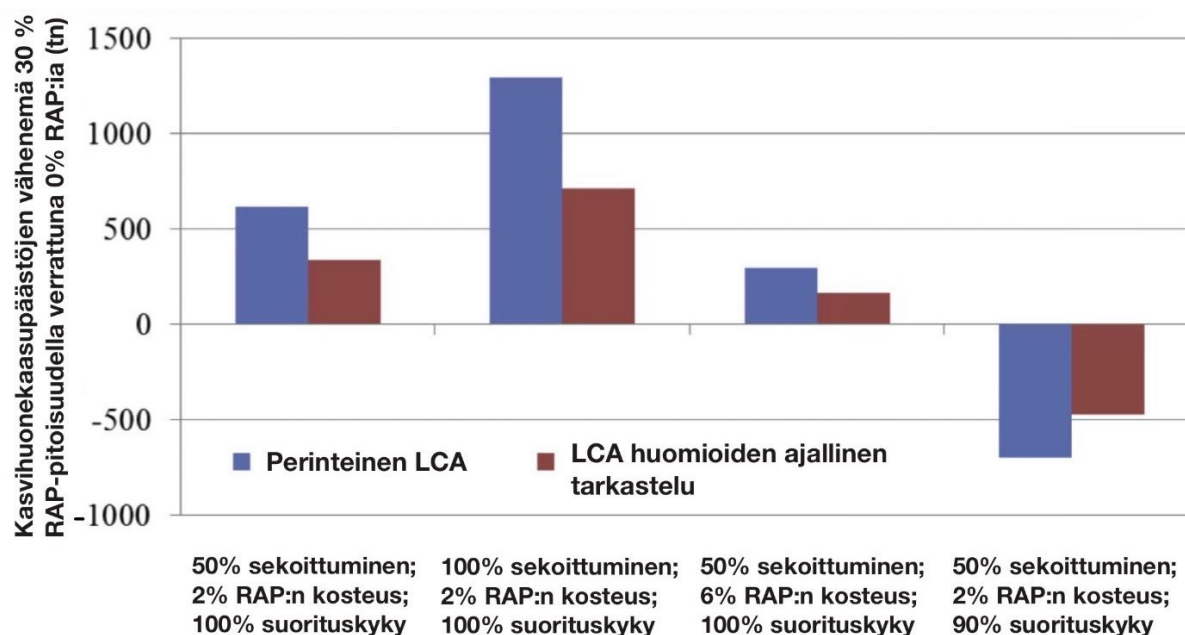
Chenin ja Wangin tapaustutkimus (2018) osoitti lisäksi, että RAP-materiaalin käyttö voi heikentää päällysteen kestävyyttä kulutuskerroksessa. Suurempi RAP-pitoisuus heikentää halkeilukestävyyttä ja saattaa heikentää myös urautumiskestävyyttä. [8], [4]. Asfalttimassan sideaineen vanheneminen parantaa päällysteen suorituskykyä korkeiden lämpötilojen alueella, mutta heikentää haitallisesti halkeilunkestävyyttä keski- ja matalien lämpötilojen alueella [18]. Bitumin vanhetessa sideaine kovenee ja jäykistyy, jolloin sen kuumakestävyysominaisuudet voivat parantua viskositeetin laskiessa, mutta kylmissä olosuhteissa kovettuminen huonontaa viskoelastisia ominaisuuksia ja altistaa päällysteen halkeilulle. Kylmien ja märkien olosuhteiden heikompi halkeilusta johtuva suorituskyky RAP:ia sisältäville massoille on yleisesti todettu. Ääriolosuhteissa kosteus ja jäätyminen aiheuttavat päällysteen purkautumista (ravelling), pysyvää muodonmuutosta ja väsymishalkeilua normaalia nopeammin kaikissa asfalttimassoissa [16]. Asfalttimassasuunnittelun tärkeys korostuu erilaisilla ilmastovyöhykkeillä lämpötila-alueet huomioiden [18]. Suomessa neljä vuodenaikaa luo haasteellisen pohjan kierrätysasfaltin laadukkaalle käytölle.

Wang et al. (2025) -tutkimuksessa todettiin RAP-pitoisuuden ja päällysteen toimivuuden välillä selvä kompromissi. Suurempi RAP-pitoisuus tuo tuotannon aikaisia ympäristöhyötyjä ja voi alentaa kustannuksia, mutta samalla se heikentää päällysteen kestävyyttä ja lisää kunnossapitotarvetta. Elinkaarikustannusanalyysin (LCCA) perusteella RAP:n vaikutus kustannuksiin on kaksijakoinen, pienet RAP-määrät voivat tuottaa taloudellisia hyötyjä, kun taas suuremmat pitoisuudet heikentävät suorituskykyä ja kasvattavat kunnossapitokustannuksia [6].

NPV (nettonykyarvo) kuvaa investoinnin koko elinkaaren aikaisten kustannusten ja hyötyjen kannattavuutta [19]. RAP-pitoisuuden kasvaessa NPV yleensä pienenee, mikä osoittaa, että kierrätysmateriaalien käyttö voi alentaa kokonaiskustannuksia. Kuitenkin osa korkean RAP-pitoisuuden kohteista osoittaa NPV:n kasvua, mikä viittaa siihen, että RAP:n epäasianmukainen käyttö voi johtaa päällysteen suorituskykyongelmiin, kuten urautumiseen ja halkeiluun. Tulokset korostavat, että RAP-pitoisuutta ja päällysteen suorituskykyä on

tarkasteltava samanaikaisesti. RAP-pitoisuuden ja suorituskyvyn välillä on selkeä yhteys. Kohtuullinen RAP:n käyttö voi tuottaa sekä taloudellisia että ympäristöllisiä hyötyjä, mutta liian suuri pitoisuus voi kääntää vaikutukset negatiivisiksi. Tämän vuoksi RAP-pitoisuus tulee optimoida siten, että saavutetaan tasapaino ympäristövaikutusten, kustannusten ja toimivuuden välillä koko käyttöiän aikana [6].

Kuvassa 2 esitetään Chenin ja Wangin (2018) tutkimuksen tulokset kasvihuonekaasupäästöistä sekä niiden vähenemästä 30 % RAP-pitoisuudella eri skenaarioissa verrattuna tilanteeseen ilman RAP-materiaalia. Tulokset osoittavat, että perinteinen elinkaariarviointi (LCA) ilman ajallista tarkastelua yliarvioi päästöjä kaikissa tapauksissa, koska päästöt oletetaan syntyvän samanaikaisesti. Dynaaminen tarkastelu huomioi päästöjen ajallisen hajoamisen ilmakehässä, mikä johtaa pienempään arvioituun ilmastovaikutukseen ja tarkempaan kuvaan RAP-materiaalin todellisista ympäristövaikutuksista [4].

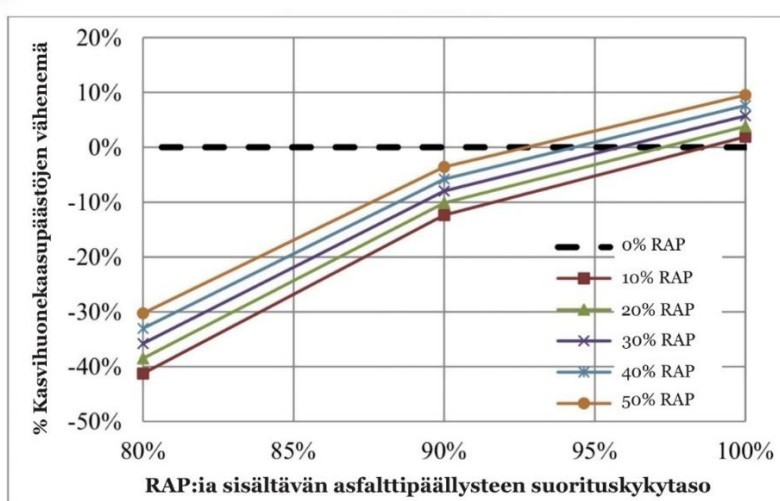


Kuva 2: päästövähennys (CO₂-ekv.) asfalttipäällysteellä, kun RAP-pitoisuus on 30 %, eri skenaarioissa. Muokattu kohteesta [4].

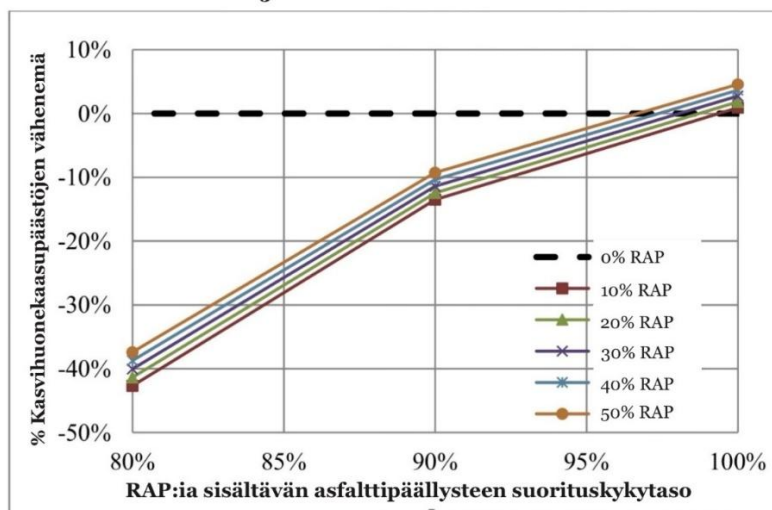
Chenin ja Wangin (2018) tutkimuksessa kuvassa 3 esitetään kasvihuonekaasupäästöjen prosentuaalinen vähenemä eri RAP-pitoisuuksilla ja suorituskykytasoilla verrattuna päällysteeseen ilman RAP-materiaalia. Nollataso tarkoittaa samaa päästömäärää, positiivinen arvo ympäristöhyötyä ja negatiivinen arvo lisääntyneitä ympäristökuormituksia RAP:n käytön seurauksena. Kuvaajassa a) RAP:n kosteuspitoisuus on 3 % ja kuvaajassa b) 6 %.

Laskelmissa bitumin päästökertoimena on käytetty arvoa 0,48 kgCO₂/kg, kun taas Suomessa uusi käytettävä arvo on 0,53 kgCO₂/kg.

Alhaisella kosteuspitoisuudella (3 %) suurempi RAP-pitoisuus voi tuottaa jopa noin 10 % päästövähennyksen, kun suorituskkyky on riittävän korkea. Pienemmillä RAP-pitoisuuksilla vastaavan hyödyn saavuttaminen edellyttää korkeampaa suorituskkykytasoa. Korkeammalla kosteuspitoisuudella (6 %) saavutettavat hyödyt jäävät pienemmiksi, noin 5 % tasolle. Käyrät ovat keskenään likimain yhdensuuntaisia, mikä osoittaa, että RAP-pitoisuus vaikuttaa pääasiassa päästöjen tasoon, ei niiden kehityssuuntaan. Kuvaajissa uuden ja vanhan bitumin sekoittumistehokkuudeksi on oletettu 50 % [4].



a) RAP:n kosteuspitoisuus 3%
50% sekoittumistehokkuus



b) RAP:n kosteuspitoisuus 6%
50% sekoittumistehokkuus

Kuva 3: Kasvihuonekaasupäästöjen prosentuaalinen vähenemä (CO₂-ekv.) eri suorituskkyky tasoilla ja RAP-pitoisuuksilla, kun RAP:n kosteuspitoisuus on (a) 3 % ja (b) 6 %, oletetulla 50 % sekoittumistehokkuudella. Muokattu kohteesta [4].

3.1.3 Kierrätysasfaltin optimointi

Suurempi sekoittumistehokkuus mahdollistaa neitseellisen sideaineen käytön vähentämisen. Esimerkiksi 50 % RAP-pitoisuudella ja oletetulla täydellisellä sekoittumisella asfaltin sideaineen säästö voi vähentää jopa 20 % syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä, mikä edustaa saavutettavien hyötyjen ylärajaa [4]. Myös Moins et al. tutkimuksen (2022) tulokset tukevat kierrätysasfaltin hyötyjä, tutkimuksessa AB- ja SMA RAP40 -massojen taloudelliset ja ympäristölliset hyödyt toteutuvat, vaikka niiden käyttöikä olisi jopa 27 % lyhyempi kuin vastaavilla neitseellisillä massoilla, kun tarkastellaan tasapainopistettä koko elinkaaren näkökulmasta [17]. Tutkimuksen tarkastelu perustuu laskennalliseen arviointiin, mikä voi aiheuttaa eroavaisuuksia käytännön kenttäolosuhteissa, erityisesti vaativissa ilmasto-olosuhteissa. Lisäksi tutkimuksessa käytetty 50/70-bitumi on Suomen olosuhteissa kierrätysasfalttiin sekoitettuna lähtökohtaisesti melko kova sideaine, mikä voi vaikuttaa tulosten sovellettavuuteen käytännössä. Mitta Oy:n asiantuntijan mukaan uuden ja vanhan sideaineen täydellinen sekoittuminen edellyttäisi kuitenkin kokonaan uusia menetelmiä ja lisätutkimusta Suomessa. Useaan kertaan kierrätetyn RAP:n sisältämä bitumi voi olla niin kovettunutta, ettei sitä voida elvyttää pelkästään pehmeämpää bitumia lisäämällä, vaan ominaisuuksien palauttaminen edellyttää erillisten elvyttävien lisäaineiden käyttöä [14], [20]. Chenin ja Wangin (2018) tutkimus puoltaa Mitta Oy:n asiantuntijan näkemystä ja tuo lisäksi esiin, että vastaavan käyttöiän saavuttaminen voi edellyttää myös suurempaa RAP:ia sisältävän päällysteen kerrospaksuutta sekä tiheämpää kunnossapitoa [4]. Kerrospaksuuden - ja kunnossapidon kasvatus lisää tieosuuden päästöjä sekä kustannuksia. Suurella RAP-pitoisuuden kasvatuksella materiaalista syntyviä päästöjä (A1 ja A2) ja kuluja pystytään alentamaan. Kerrospaksuuden kasvatus kuitenkin lisää tuotannon (A3), - kuljetuksen (A4) -ja levitysvaiheen (A5) päästöjä sekä kuluja, jolloin kokonaisuuden vertailu muuttuu hankalaksi. Yhteisvaikutusten arviointiin ei ole vielä sopivia keinoja tai menetelmiä.

Moins et al. tutkimuksen mukaan 40 % RAP:ia sisältävissä kulutuskerrosmassoissa elvyttävien aineiden käyttö voi parantaa käyttöikää siten, että tasapainopisteen saavuttamiseen vaadittava käyttöiän pidentyminen määräytyy ensisijaisesti ympäristövaikutusten eikä niinkään taloudellisten vaikutusten perusteella [17]. Ishaq et al. tutkimuksessa (2020) elvyttimien käyttö hidasti sulamis- ja jäätymissykleiden aiheuttamia vaurioita. Elvytetty RAP-massa kesti urautumista aiheuttavia kuormitusyklejä 20 % paremmin [16]. Yu et al.

tutkimuksessa (2024) laboratoriokokeiden lisäksi suoritettiin 17 kenttäkoetta, joissa huomattiin biopohjaisten elvytinaineiden parantavan RAP:ia sisältävien massojen lämpötilasta johtuvaa halkeilukestävyyttä. Tulokset osoittivat, että bioöljyjen kokonaisrasvahappopitoisuus voisi toimia suorituskyvyn indikaattorina. Korkeamman rasvahappopitoisuuden bioöljyt toimivat tehokkaammin, bioöljyjen rasvahappopitoisuuden tulisi olla yli 97 %, josta tyydyttyneiden rasvahappojen osuuden tulisi olla alle 50 % parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi [18]. Elvyttimien käytöstä aiheutuvat lisäkustannukset voidaan kompensoida paremmalla väsymiskestävyydellä ja pienentämällä kosteusvaurioiden aiheuttamaa heikkenemistä [10]. Biopohjaisten sideaineiden käytöllä on havaittu paljon parantavia vaikutuksia käyttöiän paranemisessa, mutta testausta tarvitaan lisää, ja kohdennetusti eri ilmasto-olosuhteet huomioiden.

Elvyttimen käytön määrään on myös kiinnitettävä erityistä huomiota, suurempi elvyttimen määrä voi tehokkaasti alentaa RAP-sideaineiden viskositeettia ja haurautta, liian suuri annostus voi aiheuttaa ongelmia, kuten heikkoa tartuntaa ja sideaineen irtoamista (stripping) kierrätetyn asfalttimassan sideaineen välillä [18]. Yu et al tutkimusten (2024) mukaan lineaaristen sekoittumiskäyrien käyttö suuria kierrätysmateriaalipitoisuuksia sisältävien sideaineseosten reologisten ominaisuuksien ennustamisessa on hankalaa ja rajallista. Tämän takia yksittäisten sideaineiden suoraa testaamista RAP:n sideaineen kanssa on suositeltavaa, sillä se mahdollistaa RAP-sekoitesideaineiden suorituskyvyn tarkemman arvioinnin [9].

3.2 Urautuminen

Urautuminen (rutting) on ilmiö, jossa tien pintaan muodostuu ajouria toistuvan liikennekuormituksen seurauksena. Raskaat ajoneuvot aiheuttavat urautumista deformatumisen seurauksena, kun taas nastarenkaat kuluttavat päällystettä renkaiden ajolinjan kohdista, jolloin tien pintaan syntyy vähitellen syvenemiä. Nastarenkaiden vaikutuksesta päällysteen pinta kuluu ja sen paksuus sekä massa vähenevät ajouran kohdalta. Nastarengaskulumisessa päällysteestä irtoaa kivrakeita ja sideainetta. Deformatumisen seurauksena osa massasta siirtyy sivusuunnassa ajourien reunoille [21]. Urautuminen heikentää liikenneturvallisuutta, koska syviin uriin kertyy helposti vettä. Tämä lisää vesiliirron riskiä erityisesti sateella. Jos uriin jää seisovaa vettä, se nopeuttaa päällysteen ja rakenteen vaurioitumista, sillä vesi tunkeutuu rakenteisiin ja altistaa ne kulumiselle sekä

pakkasrapautumiselle. Pitkällä aikavälillä urautuminen lyhentää tien käyttöikää ja lisää korjaustarvetta [22].

3.2.1 Liikenteen vaikutus

Suomessa henkilöautojen aiheuttamat rasitukset näkyvät teillä pääasiassa nastarenkaiden aiheuttamana kulumisurana, sillä nastarenkaat kuluttavat päällystettä erityisesti vilkasliikenteisillä päätieosuuksilla [3]. Kulumisen on voimakkainta päällysteen ensimmäisen käyttövuoden aikana, jolloin pinnasta irtaantuu pääasiassa sideainetta ja hienorakeista kiviainesta [23]. Päällysteen kulumiseen vaikuttavista tekijöistä merkittävin on nastarenkaiden aiheuttama kulumisen. Kokonaiskulumiskestävyyteen eniten vaikuttavat tekijät ovat: asfalttilaatu, kiviaineksen kuulamyllyarvo, lujuusluokka sekä raekoko. Liikennekuormitus, erityisesti raskaan liikenteen aiheuttamat akselikuormat, vaikuttaa merkittävästi päällysteen muodonmuutokseen ja rakenteelliseen kestävyys. Toistuva kuormitus kohdistuu samoihin ajouriin, se johtaa vähitellen päällysteen tiivistymiseen, muodonmuutokseen ja urautumiseen. Raskaan liikenteen vaikutus korostuu erityisesti vähäliikenteisillä teillä, joissa suuret akselipainot lisäävät päällysteen kuormitusta ja nopeuttavat vaurioiden syntymistä. Ilmiö korostuu etenkin teillä, joiden rakennetta ei ole koskaan mitoitettu oikein tai joissa päällyste on rakenteeltaan liian ohut.

3.2.2 Plastinen muodonmuutos

Asfalttimassan virheellinen seossuunnittelu voi aiheuttaa plastista muodonmuutosta (plastic deformation). Plastisessa muodonmuutoksessa viskositeettiltaan pehmentynyt seos puristuu sivusuunnassa rengasuran kohdalta kohti tien reunaa [24]. Plastinen muodonmuutos on materiaalin palautumaton muutos siihen kohdistuneen voiman ja rasituksen seurauksena [25]. Päällysteen riittämätön kerrospaksuus heikentää rakenteen kykyä vastustaa plastista muodonmuutosta [26].

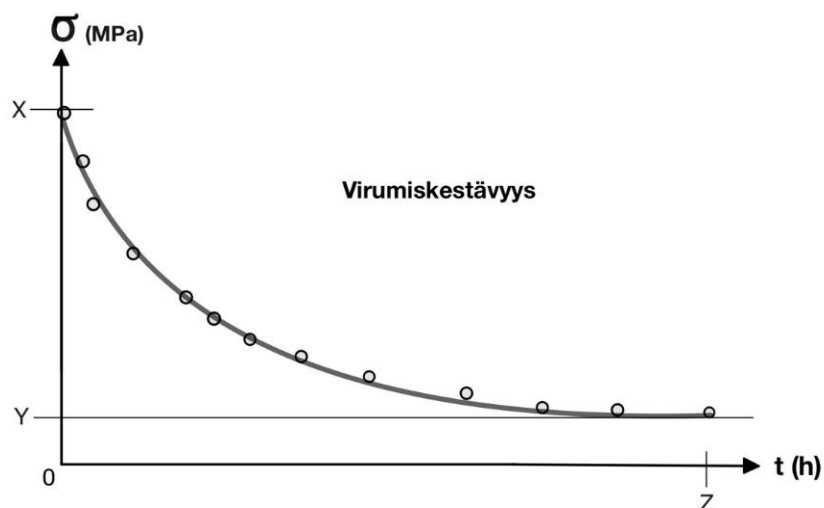
3.2.3 Sääolosuhteet

Kylmät sääolosuhteet haurastuttavat bitumia, jolloin nastarenkaan isku voi aiheuttaa murtumia [23]. Halkeamat ja murtumat kiihdyttävät rikkoutumista, koska vesi pääsee tunkeutumaan halkeamiin ja jäätyessään laajenee. Toisaalta lämpimällä säällä bitumin viskositeetti pienenee ja materiaali muuttuu alttiimmaksi deformatumiselle. Bitumin

reologiset ominaisuudet vaikuttavat sen käyttäytymisen muuttumiseen lämpötilojen vaihdellessa, jolloin bitumin käyttäytyminen voi muuttua viskoosisesta lähes elastiseen [27].

3.2.4 Virumiskestävyys

Pitkäaikaisessa kuormituksessa materiaalissa tapahtuu ajasta riippuvaa pysyvää muodonmuutosta, jota kutsutaan virumiseksi (creep) [25]. Virumiskestävyys (creep resistance) on myös lämpötilariippuvaista, ja heikko virumiskestävyys lisää urautumista [21]. Pitkällä aikavälillä bitumin virumiseen tarvittava voima pienenee materiaalin väsymisen vaikutuksesta. Bitumin elastisuus katoaa eikä palaudu enää vanhaan muotoonsa. Korkeammat lämpötilat kiihdyttävät mekanisme [25]. Kuvassa 4 havainnoidaan kyseistä ilmiötä.



Kuva 4. Virumiskestävyyttä havainnollistava kuvaaja, jossa jännityksen (σ) ja ajan (t) välinen riippuvuus osoittaa, että pitkäaikainen kuormitus voi aiheuttaa pysyvää muodonmuutosta myös pienillä kuormitustasoilla.

3.2.5 Sideaineen vaikutus

Sideaineluokan valinta vaikuttaa merkittävästi urautumiskestävyyteen. Pehmeämpi ja viskositeetiltaan pienempi bitumi voi vähentää talviaikaista murtumista, mutta lisää kesäaikaista deformatumista lämpimissä olosuhteissa. Kesällä auringon lämmittämä musta asfalttipinta nostaa päällysteen lämpötilaa huomattavasti, jolloin pehmeämpi sideaine altistaa asfaltin plastiselle muodonmuutokselle [24].

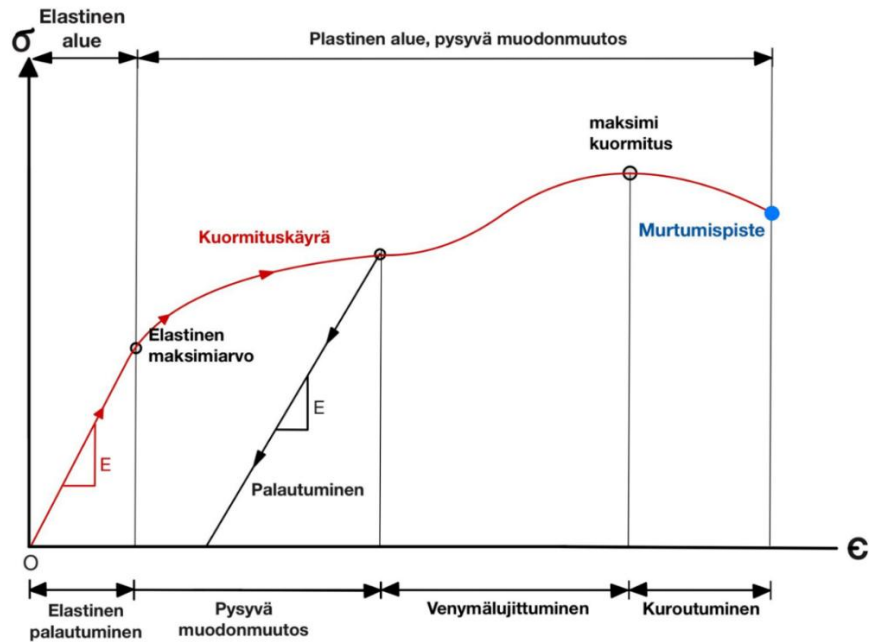
Suomessa asfaltin seos suunnittelussa käytetään bitumin jäykkyyttä kuvaavaa tunkeuma-arvoa. Arvo mitataan SFS-EN 1426 menetelmällä [28]. Laboratoriokokeiden perusteella voidaan todeta, että laboratoriossa mitattu tunkeuma-arvo ei välttämättä korreloi suoraan RAP-rouheesta saatavan bitumin viskositeetin tai pehmenemispisteen kanssa. Vaikka eri näytteiden tunkeuma-arvo olisi mittauksissa sama, niiden viskositeetit voivat poiketa toisistaan eri lämpötiloissa. Vaihtelevat ominaisuudet luovat haasteita suunnitteluun, joten ammattitaito ja pitkäaikainen testaus ovat välttämättömiä laadullisesti hyvän kierrätysasfaltin valmistuksessa ja suunnittelussa [14].

3.2.6 Sitkeysmoduuli

Bitumin elastisuuden muutokset vaikuttavat sitkeysmoduuliin (modulus of toughness), joka kuvaa materiaalin kykyä kestää elastista ja plastista muodonmuutosta ennen rikkoutumista. Sitkeysmoduuli on materiaalin kyky absorboida energiaa ennen sen murtumista [25].

Bitumille sitkeysmoduulin tarkka määrittäminen on hankalaa, sen vaihtelevien ominaisuuksien myötä. Eri lämpötiloissa käyttäytyminen voi vaihdella täysin viskoosisesta käyttäytymisestä lähes puhtaasti elastiseen käyttäytymiseen [27]. Kuitenkin bitumin ollessa elastisella alueella se käyttäytyy lineaarisesti pienillä muodonmuutoksilla, eli jännityksen ja venymän välillä on suora riippuvuus [27]. Kuvassa 5 havainnollistetaan ilmiötä. Elastisen palautumisen osuus kuvaa palautuvaa vaikutusta, ennen materiaalin pysyvää vauriota.

Pysyvän muodonmuutoksen alue kuvaa plastista muodonmuutosta, eli materiaali ei palaudu täysin alkuperäiseen muotoonsa. Venymälujittumisen alue kuvaa materiaalin venymistä, jolloin materiaali vastustaa eniten murtumista. Kuroutumisen alueella materiaali menettää muotonsa ja murtumista vastustava voima pienenee nopeasti, murtumispisteessä tapahtuu materiaalin rikkoutuminen.



Kuva 5: Sitkeysmoduuli -kuvaajalla havainnollistetaan materiaalin elastisia ja plastisia ominaisuuksia. Muokattu kohteesta [25].

$$\text{Sitkeysmoduuli} = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon, \sigma = \text{kuormitus}, \epsilon = \text{muodonmuutos} [25].$$

Kuvassa 5 venymälujittumisen alue korostuu erityisesti polymeerimodifioiduilla SMA-asfalteilla, joissa polymeeriverkosto lisää materiaalin kykyä vastustaa venymää lineaarista käyttäytymistä voimakkaammin. Tämä ominaisuus parantaa SMA-asfalttien sitkeyttä, halkeilunkestävyyttä ja väsymiskestävyyttä [29]. Suomessa selluloosakuitu SMA-asfalteissa ei suoranaisesti luo polymeeriverkostoa, mutta selluloosa mahdollistaa suuremman sideainepitoisuuden [30], mikä parantaa kiviainesten välistä tartuntaa ja rakenteen sisäisiä voimia sekä edistää mastiksin muodostumista.

Kuvan 5 kuroutumisen osuutta voidaan verrata virumiseen liittyvään muodonmuutosilmiöön, vaikka kuroutumisessa tapahtuma etenee selvästi nopeammin kuin virumisessa [25].

Kuroutumista voidaan kuvata nopeasti tapahtuvana asfaltin paikallisena deformatumisenä, jonka seurauksena saavutetaan murtumispiste ja rakenne vaurioituu [27], [29]. Esimerkkinä voidaan pitää tilannetta, jossa raskaan ajoneuvon rengas aiheuttaa päällysteeseen suuren hetkellisen kuormituksen epätasaisella tieosuudella. Mikäli päällyste tai sen alapuolinen rakenne ei kykene vastaanottamaan kuormitusta riittävästi, seurauksena voi olla päällysteen paikallinen murtuminen.

3.2.7 Tyhjätila

Asfalttipäällyste koostuu yleisimmin kiviaineksesta, sideaineesta ja tyhjätilasta (air void content). Sideaineena toimii bitumi, joka luo tartunnan kiviainesten välille. Karkea kiviaines luo kantavuutta ja kestävyyttä, hienoaaines täyttää suurempien rakeiden välejä ja bitumi sitoo kiviaineksen yhteen. Kiviainesten välille jää aina tyhjiä rakoja, joita kutsutaan tyhjätilaksi [31]. Suurempi tyhjätila lisää massan deformaatioherkkyyttä [11] sekä jälkitiivistymistä, jolloin liikennekuormitus painaa päällysrakennetta kasaan ja urautuminen nopeutuu. Jälkitiivistyminen johtaa nopeampaan urautumisilmiöön, kun suureksi jäänyt tyhjätila painuu alaspäin tai sivuille kohti tien reunaa [24], [26].

3.3 Urautumisen ehkäisy

Asfalttimassojen reseptisuunnittelu Suomessa on tasapainottelua erilaisten ominaisuuksien välillä, sillä vaihtelevat sääolosuhteet ja neljä vuodenaikaa asettavat merkittäviä vaatimuksia päällysteen pitkäikäisyydelle. Tyhjätilan määrä, sideaineen ominaisuudet sekä sideaineen modifiointi vaikuttavat olennaisesti päällysteen kestävyys. Urautumista voidaan ehkäistä oikealla seossuunnittelulla, sopivalla sideainevalinnalla, kiviaineen lujuudella, riittävällä rakennepaksuudella, tasalaatuisella asfalttimassalla sekä huolellisilla työmenetelmillä. Koska urautuminen johtuu useiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta, sen ehkäisy edellyttää materiaalin, rakenteen ja toteutuksen kokonaisvaltaista hallintaa.

Polymeerimodifioidut bitumit (PMB, Polymer modified bitumen) parantavat sideaineen mekaanisia ja reologisia ominaisuuksia muodostamalla bitumiin jatkuvan polymeeriverkoston. Tämä verkostorakenne lisää materiaalin elastista muodonmuutoksenkestävyyttä sekä parantaa väsymis- ja virumiskestävyyttä. Lisäksi polymeerimodifiointi parantaa bitumin kylmänkesto-ominaisuuksia vähentämällä halkeilualttiutta alhaisissa lämpötiloissa [29]. PMB-bitumeja ei käytetä Suomessa.

Riittävän pieni tyhjätila edellyttää oikeaa levityslämpötilaa suhteessa bitumin kovuuteen sekä huolellista tiivistystä. Jyräyksen suunnittelu sääolosuhteiden mukaisesti ja jyräkaluston ammattitaitoinen käyttö ovat keskeisiä tekijöitä laadukkaan lopputuloksen saavuttamisessa [5]. Eri asfalttimassoille määritetään tyhjätila vaatimukset asfalttinormeissa [30].

Kiviaineksen maksimiraekoko, lujuusluokka ja kulutuskestävyys vaikuttavat merkittävästi urautumiskestävyys. Suurempi raekoko parantaa kulumiskestävyttä erityisesti

nastarenkaiden aiheuttamaa kulumista vastaan, mutta liian karkea rakeisuus voi lisätä tyhjätilaa, liikenteen aiheuttamaa jälkitiivistymistä, renkaiden kulumista ja rengasmelua [14], [3].

Wang (2023) tutkimuksessa tarkasteltiin asfalttikerroksen paksuuden vaikutusta deformaatiokestävyyteen. Plastisen energiahäviön huippuarvoa sekä todellisen plastisen vaurioalueen muutoksia analysoimalla todettiin, että asfalttikerrosten optimaalinen yhteispaksuus deformaatiokestävyyden kannalta on noin 10–20 cm. Kun kerrospaksuus ylittää 20 cm, plastisen vaurioalueen pieneneminen jää vähäiseksi eikä energiahäviö enää merkittävästi vähene [32]. Tutkimuksen perusteella useat päällystekerrokset kykenevät absorboimaan suuremman osan kuormituksen aiheuttamasta energiasta, mikä vähentää plastisten muodonmuutosten syntymistä.

Ohuissa asfalttipäällysteissä pintakerroksen alaosaan kohdistuu suuri kuormitusjännitys ja jäykkyysero kantavaan kerrokseen voi aiheuttaa epäjatkovaa muodonmuutosta rajapinnassa. Kerrospaksuuden mitoitus on erityisen tärkeää heikon kantavuuden kohteissa, joissa kantavuutta voidaan osittain parantaa lisäämällä asfalttikerroksen paksuutta [33].

3.4 Lajittuminen

Lajittumista on kahta erilaista: mekaaninen lajittuminen ja lämpötilalajittuminen. Mekaaninen lajittuminen tarkoittaa ilmiötä, jossa asfalttimassan alkuperäinen homogeeninen koostumus muuttuu kiviaineksen raekokojakauman ja sideainepitoisuuden osalta, kun karkean ja hienon kiviaineksen rakeet liikkuvat erikseen seoksen käsittelyn aikana [34]. Lämpölajittumisella tarkoitetaan ilmiötä, jossa asfaltin lämpötila jakautuu epätasaisesti päällystysprosessin eri vaiheissa, kuten sekoituksen, kuljetuksen, levityksen ja tiivistyksen aikana [35]. Normaalisti asfalttimassa on tarkasti suunniteltu seos, jossa eri raekokoiset kiviainekset, sideaine ja mahdolliset lisäaineet on mitoitettu keskenään oikeissa suhteissa. Näiden suhteiden avulla pyritään saavuttamaan päällysteelle halutut ominaisuudet, kuten kestävyys, riittävä tiiviys sekä hyvä deformatiivisuus [30].

Lajittumisen seurauksena kiviaines ja sideaine eivät jakaudu tasaisesti massassa, jolloin päällysteen rakenteelliset ominaisuudet voivat poiketa suunnitellusta. Tämä voi heikentää päällysteen mekaanista kestävyyttä, lisätä vaurioitumisherkkyttä ja lyhentää tien käyttöikää. Lajittumiselle on kaksi pääasiallista syytä. Ensimmäinen on se, että asfalttimassa on jo alun perin epähomogeenista, ja toinen on se, että tasalaatuinen massa levitetään epätasaisesti.

Koska lajittumista esiintyy usein ja sen syntyyn vaikuttavat useat eri tekijät, se on yksi keskeisimmistä tarkasteltavista ilmiöistä päällystysalalla sekä laadunvalvonnassa että työn vastaanottovaiheessa [36].

Tuotannon ja levityksen aikaisilla toimenpiteillä on merkittävä vaikutus päällysteen laatuun, sillä oikein toteutetut työmenetelmät parantavat materiaalin tasalaatuisuutta ja rakenteen kestävyyttä, kun taas virheelliset työmenetelmät lisäävät lajittumista ja heikentävät päällysteen suorituskykyä. Tasalaatuinen asfalttipäällyste edellyttää hallittua tuotanto- ja rakennusprosessia, joka koostuu sekoituksesta, kuljetuksesta ja levityksestä. Näissä työvaiheissa esiintyvät vaihtelut massan ominaisuuksissa voivat johtaa epätasalaatuisuuteen ja heikentää päällysteen suorituskykyä [37]. Liialliset vaihtelut voivat lisäksi aiheuttaa asfalttimassan lajittumista, mikä altistaa päällysteen ennen aikaisille vaurioille. Tämän vuoksi lajittumisen ehkäisy ja laadun varmistaminen edellyttävät haitallisten tekijöiden hallintaa kaikissa työvaiheissa, jotta niiden vaikutukset eivät kasaannu ja heikennä rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä [38].

3.4.1 Lajittumisen syyt

Kiviaineksen mekaanista lajittumista voi tapahtua asfalttimassan valmistuksen, varastoinnin, purkamisen, kuljetuksen ja levityksen aikana. Lajittumaa syntyy, kun kiviainekseen kohdistuvat voimat, kuten painovoima ja keskipakoisvoima, ylittävät bitumin sitovan vaikutuksen eli kitkavoimat [38]. Massan valmistuksessa eri kokoisten kiviainesfraktioiden lämpötilaerojen kasvaessa kitkavoimat pienenevät entisestään. Karkea sekä hieno kiviaines alkavat liikkua toisiinsa nähden. Voimien vaikutus korostuu erityisesti silloin, kun asfalttikasojen sortumakulma ylittyy [39], jolloin hienoainesta raskaampi karkea kiviaines irtaantuu helpommin bitumin adheesiovoimien vaikutuksesta [36].

Lämpötilalajittumista esiintyy erityisesti varastoinnin ja kuljetuksen aikana.

Siilovarastoinnissa massan reuna-alueet voivat jäähtyä keskiosaa nopeammin, ja kuljetuksen aikana massa viilenee lavalla ympäröivän ilman lämpötilan ja tuulen vaikutuksesta lavan eristyksestä huolimatta [34]. Ilmiö korostuu kylmissä ja tuulisissa sääolosuhteissa, jolloin massan sisäiset lämpötilaerot kasvavat ja epätasaisen tiivistymisen riski lisääntyy [5], [39].

Hienorakeisissa asfalttimassoissa raekokojakauma ehkäisee yleensä lajittumista paremmin, kun taas karkea raekokojakauma lisää lajittumisriskiä [39]. Erityisesti SMA-massoissa lajittumariski kasvaa, kun rakeisuus painottuu voimakkaasti suurempiin raekokoihin [38].

Rakeisuus ja kiviaineksen oikeanlainen muoto ovat lajittumisen tärkeimmät tekijät, ja niiden vaikutus on suurempi kuin sideaineen vaikutus. Lajittumista syntyy erityisesti karkean kiviaineksen välisten heikkojen kitkavoimien ja hienoaineksen voitelevan vaikutuksen seurauksena, kun sideainepitoisuus ei ole optimi. Oikea sideainepitoisuus ja lämpötila parantavat sidontaa, ja ehkäisevät lajittumista [36].

3.4.2 Lajittumisen seuraukset

Lajittuminen heikentää asfalttimassan tilavuusominaisuuksia, vähentää mekaanista kestävyyttä ja heikentää päällysteen toiminnallisia ominaisuuksia. Rakeisen runkorakenteen ja seoksen koostumuksen muuttuessa massaa ei voida tiivistää riittävästi, mikä lisää huokoisuutta ja heikentää vedenkestävyyttä sekä urautumiskestävyyttä. Tiheyden pientyminen ja runkorakenteen muuttuminen heikentävät massan mekaanisia ominaisuuksia ja päällysteen kestävyyttä. Voimakkaasti lajittuneen massan ominaisuudet voivat olla jopa 50 % heikommalla verrattuna tasalaatuiseen asfalttimassaan [36]. Lajittunut päällyste on alttiimpi rapautumiselle, reikien muodostumiselle sekä veden aiheuttamille vaurioille. Rakeiden epätasainen jakautuminen heikentää tiivistystä, pienentää kitkavastusta ja lisää urautumisriskiä. Kohtalainen lajittuminen voi lyhentää päällysteen käyttöikää jopa viidellä vuodella ja lisätä kunnossapitokustannuksia noin 30 %. Tämän vuoksi päällysteen levityksen jälkeisten lajittumien seuraaminen on keskeinen tekijä asfalttipäällysteen laadun arvioinnissa [38]. Laadunarviointia ja -valvontaa tulisi toteuttaa koko tuotanto- ja levitysprosessin ajan, ja virheisiin tulisi puuttua mahdollisimman aikaisessa vaiheessa [39].

Lajittumisen seurauksena päällysteen rakenne muuttuu epähomogeeniseksi levitysvaiheessa, jolloin seoksen raekoko voi vaihdella kuorman aikana ja päällysteeseen muodostuu karkeampia tai hienompia alueita. Hienoaineslajittuma voi aiheuttaa sideaineen pintaan nousua, mikä liittyy usein virheelliseen suhteitukseen tai tuotantovirheisiin [34]. Sideaineen pintaan nousu heikentää kitkaa ja huonontaa liikenneturvallisuutta [38].

Epäjatkuva rakeisuuskäyrä, pieni raekoko tai paikallisesti liian suuri sideainepitoisuus heikentävät rakenneosasten välistä kitkaa ja pienentävät muodonmuutoskestävyyttä. Tällöin plastiseen deformaatioon [27], venymälujittumiseen ja kuroutumiseen tarvittavat voimat pienenevät, mikä lisää murtumispisteen ylittämisen riskiä [25] ja voi johtaa rakenteen vaurioitumiseen [26].

Lämpötilan epätasaisuus pahentaa lajittuman vaikutuksia, koska kylmä asfalttimassa ei tiivisty riittävästi [5]. Bitumin viskositeetin kasvaessa massa jäykistyy, jolloin tiivistys ei enää tasoi epähomogeenisuutta ja päällysteeseen jää paikallisia tiiveyseroja. Tällaiset vyöhykkeet poikkeavat rakenteeltaan ympäröivästä materiaalista ja lisäävät päällysteen vaurioitumisherkkyyttä.

Useiden tutkimusten mukaan lämpötilalajittuminen heikentää päällysteen ominaisuuksia siten, että tyhjätila kasvaa lämpötilaerojen suurentuessa. Yli 14 °C lämpötilaerot massassa ovat kriittisiä, sillä tällöin tyhjätila voi kasvaa yli 2 %, mikä voi lyhentää päällysteen käyttöikää merkittävästi [3].

Lajittumien vaikutukset korostuvat erityisesti vilkasliikenteisillä ja suurinopeuksisilla tieosuuksilla, joissa päällysteeseen kohdistuvat kuormitukset ovat suurempia. Näillä alueilla lajittumakohdat altistuvat tavallista voimakkaammalle rapautumiselle, halkeilulle ja reikiintymiselle, mikä heikentää päällysteen kestävyyttä ja liikenneturvallisuutta. Sideaineen pintaan nousut voivat olla liukkautensa vuoksi hyvinkin liikenteelle vaarallisia, joten ne on korjattava nopeasti. Korjaustoimenpiteet ovat usein haastavia ja aiheuttavat merkittäviä lisäkustannuksia, sillä liikenneturvallisuuden varmistaminen edellyttää laajoja liikennejärjestelyjä, jotka ovat vilkasliikenteisillä teillä erityisen vaativia ja kalliita. Lisäksi paikkauskohdat jäävät helposti epätasaisiksi suhteessa ympäröivään pintaan. Erityisesti valuasfalttipaikkauksissa korjatut kohdat voivat jäädä ympäröivään päällysteeseen nähden eri korkeuteen. Liian syväälle jäänyt paikkauskohta kerää helposti vettä, kun taas liian korkea kohta voi kerätä vettä saumaa vasten. Tämä lisää veden tunkeutumisen riskiä rakenteeseen ja nopeuttaa vaurioiden syntymistä. Epätasaisuudet aiheuttavat ajoneuvoihin pystysuuntaista liikettä, jolloin ajoneuvon liike-energia kohdistuu toistuvasti samaan kohtaan päällysteessä. Tämä lisää paikallista kuormitusta ja voi johtaa plastiseen muodonmuutokseen sekä sideaineen halkeiluun, mikäli materiaalin sitkeys- tai muodonmuutoskestävyyden raja-arvot ylittyvät.

3.4.3 Valmistuksen ja varastoinnin vaikutukset

Asfalttimassan valmistus on monivaiheinen prosessi, jossa kiviaineksen varastointi, annostelu, kuivaus, seulonta, sekoitus sekä valmiin massan varastointi vaikuttavat massan tasalaatuisuuteen. Prosessin aikana syntyvät virheet voivat muuttaa rakeisuutta, sideainepitoisuutta ja massan homogeenisuutta [39].

Kiviaineksen varastointi koneasemalla on keskeinen vaihe, sillä virheellinen varastointi tai toistuva uudelleenkuormaus voi muuttaa rakeisuuskäyrää ja aiheuttaa lajittumista.

Kiviainekset tulee varastoida kerroksittain matalina kasoina ja murskesiilojen täyttö tulee tehdä tasaisesti, jotta kiviainesfraktiot eivät erotu toisistaan. Myös murskeiden kylmäannostelun tasaisuus on tärkeää, koska annostelussa tapahtuvat poikkeamat siirtyvät suoraan valmiiseen asfalttimassaan. Hienofraktioiden alhainen kosteuspitoisuus helpottaa prosessin hallintaa ja vähentää kuivausrummun sekä pölynpoistojärjestelmän kuormitusta, mikä edistää rakeisuuden tasaisuutta erityisesti hienoaineksen osalta [39].

Valmistuksessa on usein virheellinen käsitys, että kuivausrummussa kuivattu ja kuumennettu kiviaines olisi lämpötilaltaan homogeenista. Asfalttiasemilla voi esiintyä merkittäviä lämpötilaeroja hienon ja karkean kiviaineksen välillä, jopa 100 °C. Tällöin hienoaines voi olla liian kuumaa ja karkea aines liian kylmää. Liian korkea lämpötila voi vaurioittaa bitumia, kun taas kylmä karkea aines heikentää tartuntaa. Näiden ilmiöiden seurauksena karkeilla kivillä on suurempi taipumus erottumiseen [39].

Sekoitusvaiheessa riittävä sekoitusaika, sekoittimen oikea täyttöaste ja sopiva lämpötila ovat välttämättömiä massan homogeenisuuden saavuttamiseksi. Liian lyhyt sekoitusaika, virheellinen täyttöaste tai liian suuri sekoitusnopeus voivat heikentää sideaineen jakautumista ja aiheuttaa vaihtelua rakeisuudessa ja sideainepitoisuudessa. Sideaine hienojakautuu paremmin korkeammissa lämpötiloissa, mutta liian korkea lämpötila voi vaurioittaa sekä kiviainesta että sideainetta [39].

Massan lämpötila on keskeinen tekijä valmistusvaiheessa. Liian korkea lämpötila voi heikentää sideaineen ominaisuuksia, kun taas liian alhainen lämpötila heikentää massan työstettävyyttä. Kierrätysasfalttia käytettäessä lämpötilan hallinta on erityisen tärkeää, koska rouheen kosteus ja sideaineen herkkyys rajoittavat kuumennusta. Valmis asfalttimassa siirretään varastosiiloon tai suoraan kuorma-auton lavalle kuljetusta varten. Tasalaatuisen massan kannalta jatkuva tuotantoprosessi on edullinen, koska se vähentää kuorma-autojen odotusaikaa ja pitää massan ominaisuudet mahdollisimman vakaina. Varastosiilot toimivat puskurina, jonka avulla tuotanto voidaan pitää tasaisena myös silloin, kun kuljetusten rytmi vaihtelee [39].

3.4.4 Lastaus, kuljetus ja purkaminen

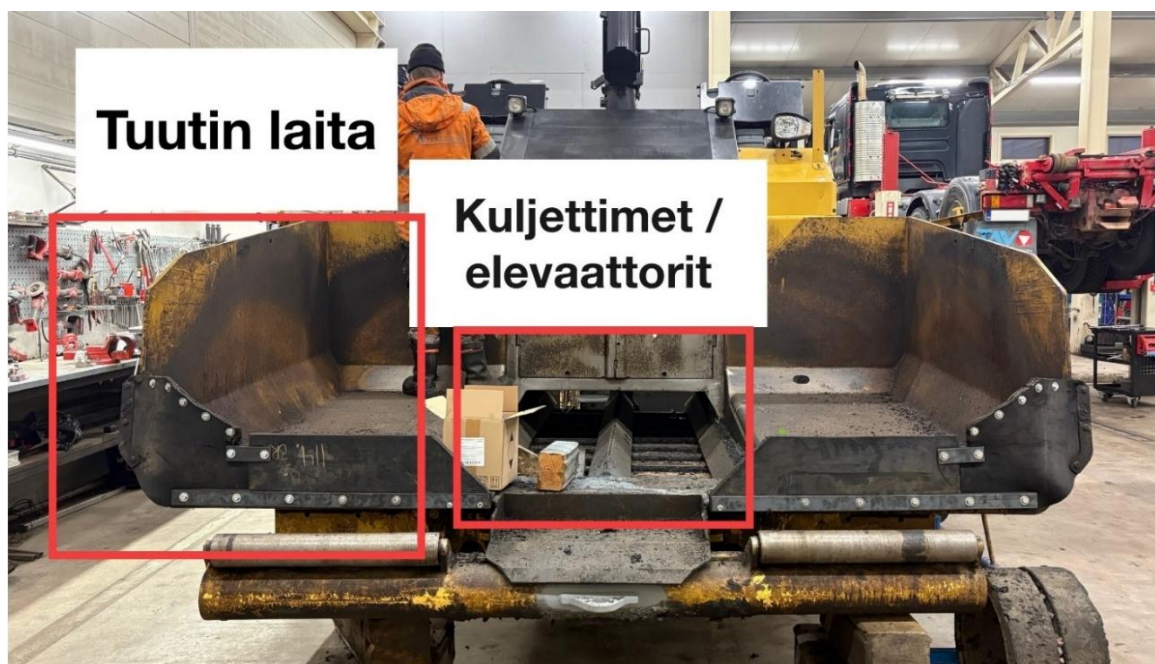
Asfalttimassan lastaus ja kuljetus edellyttävät ammattitaitoa myös kuljettajalta. Kuorman virheellinen lastaus varastosiilosta aiheuttaa tarpeetonta lajittumista. Massa tulisi jakaa mahdollisimman tasaisesti koko lavalle ja purkaa siilosta tasaisesti ja nopeasti, välttäen nykivää syöttöä. Erilaiset lavarakenteet vaativat erilaisia lastaustapoja, tärkeintä on kuitenkin pyrkiä välttämään pitkiä sortumakulmia, eli korkeita massakasoja [39].

Kuljetusvaiheessa kuorma-autot aiheuttavat lajittumista liikkeessaan. Epätasaisella pinnalla tai kaupunkiliikenteessä jatkuvat jarrutukset ja kiihdytykset synnyttävät tärinää. Painavammat partikkelit, kuten murskattu kivi, laskeutuvat alas, kun taas kevyemmät partikkelit, kuten bitumi ja hienoaines, nousevat ylös [34]. Joidenkin tutkimuksien mukaan asfalttimassan kuljetus asfalttiasemalta levityskohteeseen on työvaihe, joka voi aiheuttaa eniten häiriöitä lajittumisen ja lämpöhäviöiden muodossa. Asfalttiaseman omassa kuljetusjärjestelmän kuljetusvaunuissa, varastosiiloissa ja purkuluukuissa, jo aiemmin syntynyt lajittuminen voi lisääntyä edelleen kuljetuksen aikana [39].

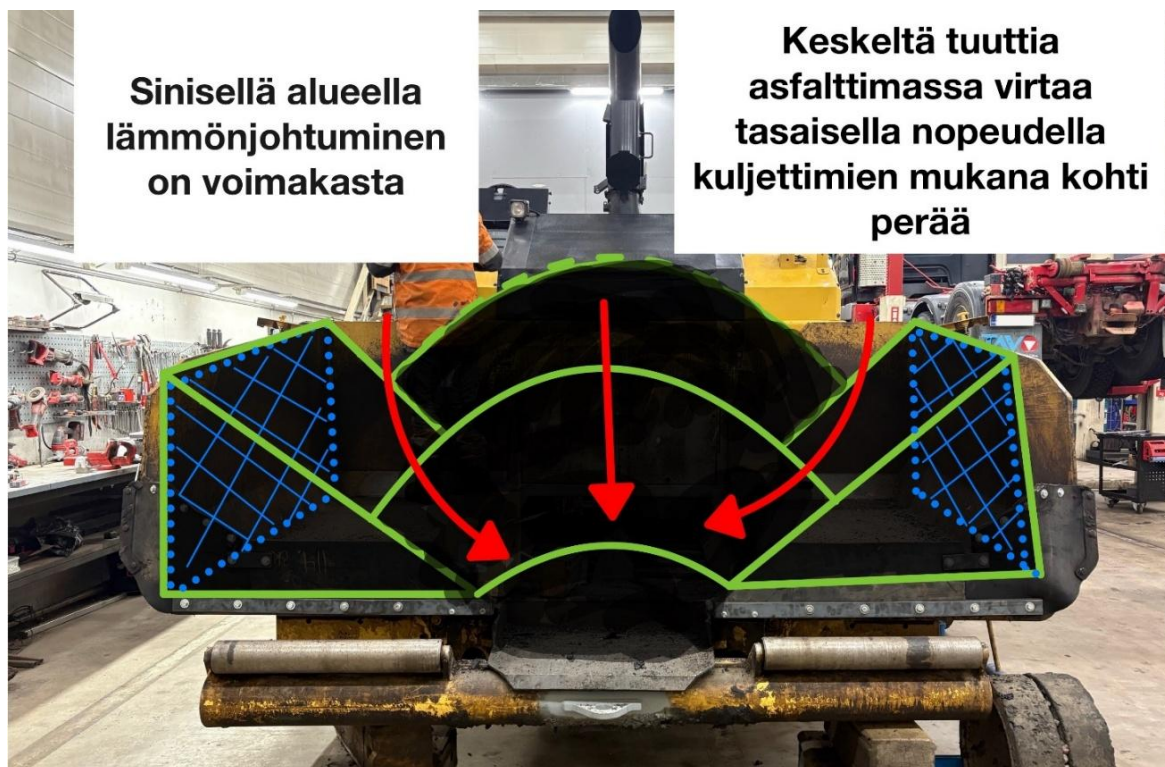
Virheellinen purku asfalttilevittimen tuuttiin voi aiheuttaa merkittävää lajittumista, jota kutsutaan kuormalajittumiseksi. Karkeammat kivet sijaitsevat usein kuormalavan reunoilla, ja kuormaa kipattaessa ne päätyvät tuutin laidoille [39]. Samalla kuorman putoamisesta aiheutuvat törmäykset ja massan liukuminen lisäävät karkean ja hienon kiviaineksen erottumista [38]. Tuutin toiminnan aikana kuljettimet syöttävät massaa pääasiassa kasan keskeltä, jolloin reunoille kertynyt massa ei pääse vaihtumaan. Reunoilla oleva massa jäähtyy nopeasti ollessaan kosketuksessa metallipintoihin. Ilmiötä havainnollistetaan kuvassa 9, jossa nähdään asfalttilevittimen tuutti ja siellä oleva kipattu asfalttimassa. Kuorman loppuessa tuutin laidat nostetaan, jolloin reunoille kertynyt, jäähtynyt ja lajittunut massa siirtyy kuljettimille ja edelleen päällysteen pintaan. Tämän seurauksena päällysteeseen muodostuu paikallisesti karkeampi ja epähomogeeninen vyöhyke. Ilmiö voimistuu erityisesti kylmällä - ja tuulisella säällä sekä kuljetusmatkojen kasvaessa [39]. Kuvissa 6 ja 7, havainnollistetaan asfalttilevittimen eri osia.



Kuva 6: Asfalttilevittimen kuva sivusta. Kuva: Kasper Lehtinen.



Kuva 7: Asfalttilevittimen syöttösuppilon (tuutin) osat, kuva koneen keulasta päin. Kuva: Kasper Lehtinen.



Kuva 8: Kuormaa purettaessa tuutin laidat ovat auki ja massa virtaa kasan keskeltä kohti koneen perää, reunoille jäänyt massa johtaa lämpöä pois ja syntyy lämpölajittumaa. Kuva: Kasper Lehtinen.

Pitkäaikaisen katumestarin mukaan lajittumia esiintyy yllättävän paljon valmiissa päällysteessä, hänen mukaansa kyse on usein työvirheistä, jotka voivat johtua levitystyöryhmän puutteellisesta ammattitaidosta [31]. Kuormalajittumista esiintyy kuitenkin kaikilla levitysryhmillä ammattitaidosta riippumatta, vaikka työmenetelmien ja käytännön toteutuksen erot voivat vaikuttaa ilmiön voimakkuuteen [3]. Lajittumisen vaikutukset korostuvat erityisesti tuulisissa ja kylmissä sääolosuhteissa. Tällöin suurempiraekoiset, jo lajittuneet kiviainekset jäähtyvät nopeammin, koska karkearakeinen rakenne sisältää enemmän ilmatilaa rakeiden välissä, mikä tehostaa lämmönsiirtymistä ja massan jäähtymistä [3].

4 Työvirheet

4.1 Työvirheet ja laadulliset haitat

Työvirheistä ja menetelmistä johtuvat laadun heikkenemiset päällysteessä ovat merkittäviä tien käyttöikään vaikuttavia tekijöitä. Uudessa päällysteessä ei saa esiintyä rakeisuuslajittumia, sideaineen pintaan nousua tai halkeamia [30]. Yleisimmät laadulliset ongelmat syntyvät juuri edellä mainituista virheistä, ja ne vaikuttavat tien käyttöikään. Lisäksi työvirheet toimivat eräänlaisena lisäkuormitustekijänä, joka voimistaa esimerkiksi liikennekuormituksen vaikutusta ja siten nopeuttaa päällysteen vaurioitumista [3].

Työvirheet toimivat eräänlaisina lisäkuormitustekijöinä, jotka voimistavat liikennekuormituksen vaikutusta ja nopeuttavat päällysteen vaurioitumista. Työnaikaiset laatu- ja toteutusvirheet voivat siten kumota materiaalivalinnoilla tavoiteltuja hyötyjä. Esimerkiksi voimakkaasti urautuvissa kohteissa käyttöikää pyritään pidentämään parantamalla nastarengaskestävyyttä lisäämällä kiviaineksen lujuutta ja räckokoa. Käytännössä lopputulos voi kuitenkin jäädä tavoitetta heikommaksi, jos asfalttimassa on epähomogeenista jo asfalttiasemalta lähdettäessä, kuljetusmatkat ovat pitkiä ja levitysvaiheessa syntyy työvirheitä sekä levittimen kuljettajan että jyräkuljettajien toiminnassa. Tällöin lajittumien synty ja liian suuret tyhjättila-arvot ovat todennäköisiä. Kalliimman kiviaineksen käyttö nostaa kustannuksia, mutta samanaikaiset työvirheet lyhentävät käyttöikää. Lopputuloksena kokonaisuus on sekä taloudellisesti että ympäristön kannalta epäedullinen.

4.1.1 Työvirhe esimerkki

Kuvassa 9 ja 10 näkyvä työvirhe on seurausta monesta eri tekijästä. Kuvat on otettu Valtatie 8:lta 2025 päällystetyllä valtion tieosuudelta. Uuden päällysteen pituus oli noin 4,5 km, ja kaistalla 1 havaittiin yhteensä noin 70 lajittumaa. Keskimäärin noin 65 metrin välein. Havainnot tehtiin ajoneuvosta käsin. Liitteessä B on esitetty samasta kohteesta otetut kuvat helmi- ja huhtikuulta 2026. Aiemmasta liitteen B kuvasta havaitaan, että kohdetta on paikattu valuasfaltilla ennen talvea tai sen aikana. Korjaustoimenpide on kuitenkin hajonnut jo kahden kuukauden kuluessa, ja sen alla oleva päällyste on kelvottomassa kunnossa.



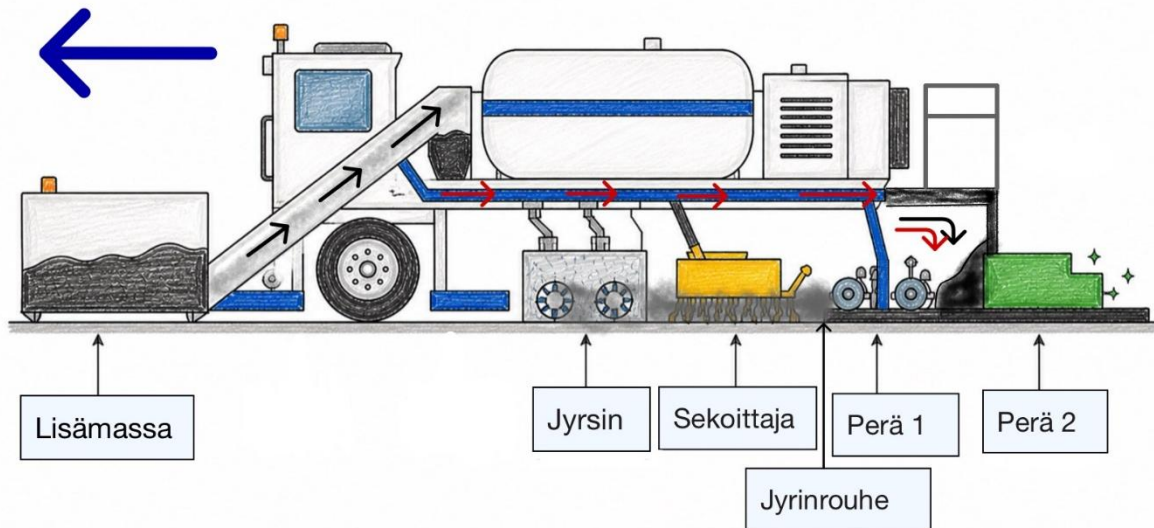
Kuva 9. 2025 VAR ELY -urakkaan kuulunut kohde. Päällystetty 15.10.2025. Kuva: Kasper Lehtinen, 12.4.2026.



Kuva 10. 2025 VAR ELY -urakkaan kuulunut kohde, sama kohta, kuin kuvassa 9. Kuva: Kasper Lehtinen, 12.4.2026.

Kohteessa työmenetelmänä käytettiin REM+ -menetelmää, jossa lisämäärä oli 80 kg/m² ja kierrätysasfaltin osuus 21 %. REM+ koneesta havainnoiva kuva 11. REM+ on erikoismenetelmä, jossa vanhan asfaltin pinta kuumennetaan nestekaasupolttimilla varustetuilla lämmityslaitteilla, niin sanotuilla grilleillä. Grillit ovat kuorma-autoja, joiden perässä vedetään useita kaasupoltinkkenoja sisältäviä peräkärriä. Grillejä käytetään yleensä useampi peräkkäin, riippuen sääolosuhteista ja tarvittavasta lämmitystehosta.

Kuumennettu päällystepinta jyrsitään ajourien pohjaan saakka, jyrситty rouhe tasataan remix-koneen väliperällä tasaiseksi laataksi. Lisämassa syötetään koneen jälkimmäiseen perään, jolla massa levitetään tavallisen päällysteen tapaan laataksi. Remixaus-kone muistuttaa rakenteeltaan asfalttilevitintä, jossa on tuutti ja perä, mutta lisäksi koneessa on jyrsimet ja sekoitin. Lopullinen levitys ja tiivistys tapahtuvat tavanomaisen päällystysprosessin mukaisesti [40].



Kuva 11. Hahmotelma kuva REM + koneesta. Havainnekuvan paranteluun on käytetty tekoälyä, liite F.

4.2 Työvirheiden ehkäisy ja korjaaminen

Asfalttipäällysteen pitkäaikainen suorituskyky ja käyttöikä ovat vahvasti sidoksissa rakentamisen laatuun sekoituksen, kuljetuksen ja levityksen aikana. Rakentamisprosessin aikana tapahtuvat vaihtelut asfalttimassan ominaisuuksissa sekä työvirheet voivat merkittävästi heikentää päällysteen suorituskyvyn tasalaatuisuutta ja lyhentää sen käyttöikää, mikä lisää kunnossapitotarvetta [37]. Tämän vuoksi päällystystyön laadulla on keskeinen vaikutus päällysteen toimivuuteen, palvelutasoon, kestävyYTEEN ja omaisuuden arvon ylläpitämiseen. Työvirheiden ehkäisy on usein kustannustehokkain keino parantaa päällysteen käyttöikää, ja niiden syntyyn voidaan vaikuttaa huolellisella suunnittelulla, materiaalinhallinnalla, oikeilla työmenetelmillä [38] sekä tehokkaalla laadunvalvonnalla [3].

4.2.1 Kohdekohtainen täsmäsuunnittelu

Kohdekohtaisella täsmäsuunnittelulla tarkoitetaan päällystysratkaisujen sovittamista tarkasteltavan tiekohteen olosuhteisiin. Suunnittelussa tulee huomioida muun muassa liikennemäärät, raskaan liikenteen osuus, nopeusrajoitukset, ilmasto-olosuhteet sekä alusrakenteen kunto [3]. Lisäksi työmaasuunnittelussa on tärkeää huomioida käytännön toteutukseen vaikuttavat tekijät, kuten kuljetusmatkat ja kuljetusreitit, jotka vaikuttavat massan lämpötilaan ja homogeenisuuteen työmaalle saavuttaessa. Pitkät kuljetusmatkat lisäävät lämpöhäviöitä ja lajittumariskiä, mikä tulee huomioida massan valmistuksessa ja aikataulutuksessa [39].

Jyräyksen suunnittelu on keskeinen osa täsmäsuunnittelua. Jyrien määrä, jyräyskerrat sekä jyräyksen ajoitus suhteessa massan lämpötilaan vaikuttavat suoraan saavutettavaan tiiveyteen ja tyhjättila-arvoon. Massan lämpötilan on oltava riittävä koko levitys- ja tiivistysvaiheen ajan, jotta saavutetaan suunnitellut mekaaniset ominaisuudet [34].

Erityisesti kohteissa, joissa esiintyy heijastuvia vaurioita tai voimakasta urautumista, pelkkä päällysteen uusiminen ei ole riittävä ratkaisu. Tällöin suunnittelussa tulee huomioida rakenteelliset ongelmat ja tarvittaessa valita kohteeseen sopivampi massatyyppi, kerrospaksuus tai lisäaineistus. Täsmäsuunnittelun avulla voidaan vähentää työnaikaisia riskejä ja varmistaa, että valittu päällysteratkaisu toimii suunnitellusti koko käyttöiän ajan [3].

4.2.2 Massan lämpötila

Päällystettäessä on tärkeää saavuttaa massan lämpötilan tasaisuus, sillä liian kylmä seos ei tiivisty tehokkaasti jyrätessä. Huonosti tiivistyneen massan tyhjättila-arvo kasvaa [34]. Asfaltin levityslämpötilan on oltava riittävä, jotta saavutetaan tarvittava tiiveys, työstettävyys ja laadullinen lopputulos. Kylmemmissä sääolosuhteissa työmaasuunnittelussa tulee huomioida useita tekijöitä, kuten mahdollisimman lyhyet kuljetusmatkat koneaseman ja työmaan välillä, kuljetuskaluston tauottaminen vasta massakuorman purkamisen jälkeen sekä massakuormien tasainen porrastus. Lisäksi voidaan vaikuttaa asfaltin lämpötilaan tuotantovaiheessa sekä massan varastointiaikaan koneaseman siilossa.

Kaikkiin tekijöihin ei kuitenkaan pystytä vaikuttamaan. Etäisyydet työmaan ja koneaseman välillä voivat kasvaa ihanteellista suuremmiksi, jolloin massan lämpötilaa joudutaan nostamaan. Lämpötilan kasvattaminen ei kuitenkaan ole kaikissa tilanteissa hyvä ratkaisu,

sillä eri sideaineilla on erilaiset viskositeetit ja niille ominaiset sekoituslämpötilat. Liiallinen kuumennus johtaa bitumin vanhenemiseen ja jäykistymiseen, jolloin se menettää kestävyysominaisuuksiaan suunnitellussa käyttötarkoituksessa.

Asfalttinormeissa 2023 on esitetty HMA-massojen (Hot Mix Asphalt) valmistuksessa käytettävät enimmäislämpötilat asfalttiasemalla. Kuumennuslämpötilat vaihtelevat välillä 120–200 °C riippuen bitumiluokasta ja sen viskositeetista. Jäykempiä sideaineita kuumennetaan enemmän ja juoksevia vähemmän. Maksimiarvoista voidaan poiketa vain perustelluista syistä, kuten pitkien kuljetusmatkojen tai haastavien sääolosuhteiden vuoksi. Kylmissä tai tuulisissa olosuhteissa massa on levitettävä ja tiivistettävä nopeasti. Mikäli tämä ei ole käytännössä mahdollista, massan tyhjätila jää puutteelliseksi. Erityisesti kylmissä olosuhteissa lisääntynyt huokoisuus on haitallinen ominaisuus ja lyhentää päällysteen käyttöikää. Tämä koskee sekä uutta asfalttimassaa että kierrätysasfalttia [39].

4.2.3 Asfaltin homogeenisuus

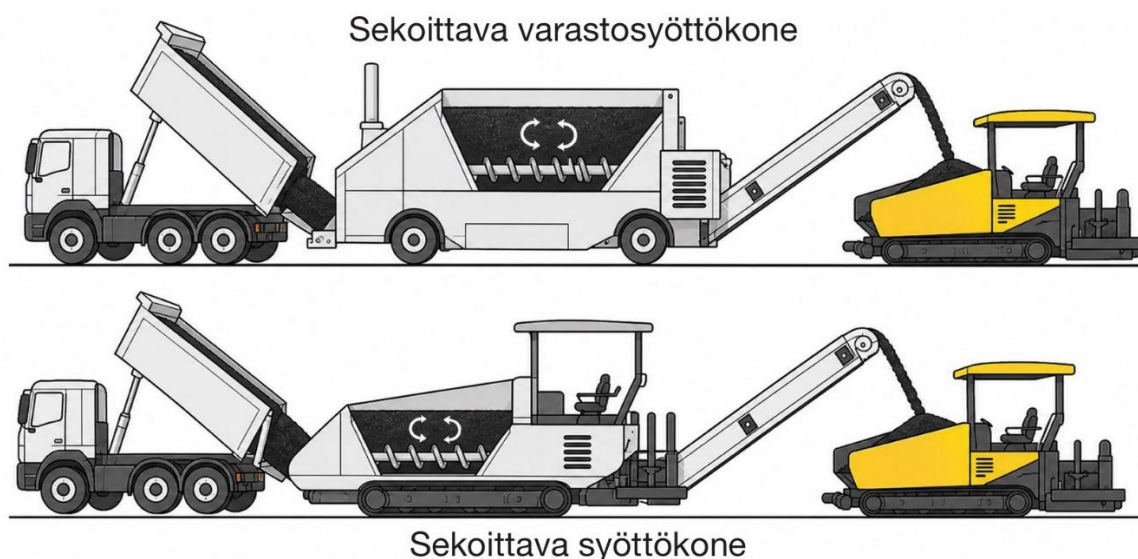
Asfalttimassan homogeenisuus on keskeinen tekijä päällysteen laadun kannalta. Epähomogeeninen massa lisää lajittumisen riskiä ja heikentää päällysteen mekaanisia ominaisuuksia, mikä voi johtaa ennen aikaiseen vaurioitumiseen [38]. Homogeenisuuteen vaikuttavat kaikki tuotantoketjun vaiheet, kuten kiviaineksen varastointi, annostelu, kuivaus, sekoitus sekä kuljetus [39]. Lämpötilaerojen hallinta on erityisen tärkeää, sillä suuret lämpötilaerot heikentävät sideaineen jakautumista ja lisäävät lajittumista [34]. Myös kuljetus ja levitys vaikuttavat massan tasalaatuisuuteen. Pitkät kuljetusmatkat, epätasainen lastaus ja virheellinen purku levittimeen lisäävät työvirheiden riskiä [39].

4.2.4 Syöttökoneen käyttö

Syöttökoneiden eli feedereiden käyttö on keino parantaa asfalttimassan tasalaatuisuutta ja vähentää lajittumista. Syöttökone toimii massan välivarastona ja sekoittimena, joka tasoittaa massan rakeisuutta ja lämpötilaa ennen levitystä [41]. Erityisesti suurissa urakoissa ja vilkasliikenteisillä teillä syöttökoneen käyttö voi parantaa lopputuloksen laatua merkittävästi, sillä sekoittavat syöttökoneet vähentävät kuormalajittumista ja tasoittavat massan ominaisuuksia ennen levittimeen syöttöä. Syöttökoneen käytöllä voidaan ylläpitää tasaisempaa levitysnopeutta, koska laite toimii puskurivarastona massalle ja mahdollistaa jatkuvan syötön levittimelle. Lisäksi syöttökone ei ole mekaanisesti kosketuksissa levittimeen, jolloin levitin pääsee liikkumaan tasaisesti ilman kuorma-auton aiheuttamia

häiriöitä. Perinteisessä työskentelyssä kuorma-autosta kipataan massa suoraan levittimen tuuttiin, jolloin levitin joutuu työntämään kuorma-autoa. Tällöin liikkeen tasaisuus on herkkä kuljettajan toiminnalle, kuten jarrutukselle. Liian voimakas jarrutus aiheuttaa epätasaisuutta levittimen liikkeeseen, kun taas liian kevyt jarrutus voi johtaa tilanteeseen, jossa massan liike-energia työntää kuorma-auton irti levittimestä. Tällöin kuorma voi purkautua hallitsemattomasti levittimen eteen tielle, mikä aiheuttaa työkatkoksia, lisätyötä ja kiirettä työmaalla.

Sekoittava varastosyöttökone kuvan 12 yläosassa, toimii massan välivarastona ja siirtolaitteena, joka mahdollistaa kuormien tasaisen purkamisen ja jatkuvan syötön levittimelle. Sen varastokapasiteetti (15–25 tn) auttaa tasaamaan massan välisiä lämpötilaeroja, mikä parantaa massan työstettävyyttä ja vähentää lämpötilalajittumista. Lisäksi laitteessa oleva sekoitusjärjestelmä vähentää kuormalajittumista ennen massan siirtymistä levittimelle. Sekoittava syöttökone kuvan 12 alaosassa puolestaan keskittyy ainoastaan massan homogenisointiin. Laitteen sekoitustekniikka ehkäisee lajittumia. Tuutissa olevat kierukat sekoittavat massan, ja lisäksi erillinen sekoitusyksikkö kuljetinhihnan päässä varmistaa massan tasalaatuisuuden ennen levittimelle syöttöä. Tuutin varastokapasiteetti on 4 tonnia [41]. Syöttökoneiden käyttö lisää kuitenkin kustannuksia, minkä vuoksi niiden käyttöä tulee arvioida kohdekohtaisesti suhteessa saavutettaviin hyötyihin [34]. Näiden laitteiden avulla voidaan vähentää työnaikaisia virheitä, parantaa päällysteen laatua ja pidentää sen käyttöikää erityisesti vaativissa ja vilkasliikenteisissä kohteissa.



Kuva 12. Syöttökoneet: yläosassa sekoittava varastosyöttökone, alaosassa sekoittava syöttökone. Havainnekuvan paranteluun on käytetty tekoälyä, liite F.

4.2.5 Tiivistyksen vaikutus

Asfalttipäällysteen ominaisuuksien toteutuminen on monen tekijän yhteisvaikutus, mutta lähes kaikkiin suunniteltuihin ominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi päällysteen tiivistäminen. Tiivistyksen onnistuminen edellyttää oikeanlaista jyräyskalustoa [5].

Päällysteen tyyppi, paksuus, lämpötila ja sääolosuhteet vaikuttavat jyräyksen suunnitteluun. Suunnittelussa tulee huomioida jyrien painoluokat, lukumäärä sekä jyrien toiminnalliset tyypit. Päällysteen tiivistykseen vaikuttavat jyräyslämpötila, liikkumiskaavio sekä jyräyskertojen ja jyräystavan lukumäärät. Alustan kantavuus vaikuttaa merkittävästi tiivistymisen onnistumiseen, pehmeä tai vaihteleva alusta saa aikaan epätasaisen lopputuloksen [5].

Nykyaikaisissa jyrissä on täryominaisuus, jonka käyttö voi joko parantaa tai heikentää tiivistyksen lopputulosta. Liiallinen tärytys voi aiheuttaa bitumin pintaan nousua massan koostumuksen muuttuessa. Lisäksi täryn ollessa päällä, pysähtyminen voi synnyttää päällysteeseen epätasaisuuksia hetkellisen, voimakkaasti paikallisen painekuormituksen seurauksena. Runsaasti hienoainesta sisältävän massan liiallinen täryttäminen voi johtaa halkeiluun tai paikallisiin epätasaisuuksiin, kun päällyste leviää tiivistyessään epätasaisesti tien reunaan kohti. Oikein ja hallitusti käytettynä täryjyräys parantaa päällysteen ominaisuuksia mahdollistamalla pienemmät tyhjätilat sekä pinnasta rakeisten alueiden tehokkaamman tiivistymisen. Täryn tarkoituksenmukainen käyttö edellyttää ammattitaitoa ja kykyä mukautua muuttuviin olosuhteisiin, kuten tien kaltevuuteen, ajosuuntaan suhteessa tiehen, massan lämpötilaan, massatyyppiin, kerrospaksuuteen, sääolosuhteisiin sekä ajonopeuteen.

Sääolosuhteiden, massanlämpötilan ja levitysnopeuden huomiointi suunnittelussa on tärkeää, koska liian nopeasti jäähtyvän päällysteen tyhjätilat jäävät vajavaisiksi [5]. Kylmä tai tuulinen sää, pitkä massan kuljetusmatka sekä suuri levitysnopeus, erityisesti niiden yhteisvaikutukset, asettavat vaatimuksia tiivistyksen huolelliselle suunnittelulle. Erityisolosuhteissa tiivistyksessä voidaan joutua käyttämään tavanomaista enemmän kalustoa. Tavoitteena on varmistaa, että jokainen päällysteen kohta ehditään jyrätä riittävän monta kertaa massan ollessa vielä riittävän kuumaa tehokkaan tiivistymisen saavuttamiseksi.

4.2.6 Ohjeistus ja valvonta

Työvirheiden ehkäisy edellyttää selkeitä ohjeita ja niiden systemaattista noudattamista.

Työvaiheiden onnistuminen riippuu työntekijöiden ammattitaidosta sekä työmaalla käytössä olevista toimintatavoista [38], [39]. Ohjeistuksen tulee kattaa koko prosessi massan valmistuksesta levitykseen ja tiivistykseen. Erityistä huomiota tulee kiinnittää massan lämpötilaan, levitysnopeuteen, jyräykseen sekä työsaumojen toteutukseen [5] [34]. Jokaisella työntekijällä on vastuu oman työsuorituksen onnistumisesta, mutta esimiehen tulisi valvoa, ohjeistaa ja puuttua toteutukseen tarvittaessa. Kaikilla on kuitenkin vastuu ilmoittaa havaitsemistaan työvirheistä esimiehelleen [5].

Niin urakoitsijan kuin tilaajan valvonnan rooli on keskeinen osa laadun varmistamisessa.

Laadunvalvontaa tulisi toteuttaa jatkuvasti koko työprosessin ajan, jotta mahdollisiin virheisiin voidaan puuttua mahdollisimman varhaisessa vaiheessa [39]. Tehokas ohjeistus ja valvonta yhdessä ammattitaitoisen työvoiman kanssa vähentävät työvirheitä, parantavat päällysteen laatua ja pidentävät sen käyttöikää [3].

5 Haastattelut

Tutkimuksessa hyödynnettiin asiantuntijahaastatteluja, joiden tavoitteena oli täydentää kirjallisuudesta saatua tietoa sekä tuoda esiin käytännön kokemuksia päällystystyön laadun, materiaalien, käyttöiän ja elinkaarivaikutusten välisistä yhteyksistä. Haastattelut toteutettiin keväällä 2026. Haastateltavaksi valittiin Sami Similä, joka toimii palvelupäällikkönä asfaltti- ja kiviaineslaboratoriossa sekä vastaa kiertotaloustuotteista Mitta Oy:llä. Samilla on pitkä kokemus päällysteiden suunnittelusta, testauksesta ja laadunvalvonnasta. Haastattelut toteutettiin Teams-yhteydellä ja puhelimitse, ja niiden kestot olivat 32, 47 ja 60 minuuttia. Haastattelujen teemoina olivat päällysteen käyttöikään vaikuttavat tekijät, yleisimmät työvirheet sekä niiden vaikutukset päällysteen kestävyys. Erityistä huomiota kiinnitettiin materiaalivalintoihin, massan suunnitteluun, lajittumisen ja lämpötilapoikkeamien vaikutuksiin sekä siihen, miten nämä tekijät voivat lisätä kunnossapitotarvetta ja vaikuttaa epäsuorasti elinkaaren aikaisiin päästöihin. Lisäksi tarkasteltiin näkemyksiä siitä, kuinka hyvin käyttöiän vaikutukset huomioidaan nykyisessä päästölaskennassa ja päätöksenteossa. Haastatteluista saatuja havaintoja hyödynnettiin kirjallisuuskatsauksen tukena ja aiheen kokonaisuuden hahmottamisessa. Tarkoituksena ei ollut tuottaa tilastollisia tuloksia, vaan syventää ymmärrystä kirjallisuudessa tunnistettujen ilmiöiden käytännön merkityksestä päällystysalan asiantuntijan näkökulmasta. Haastattelun pohjakysymykset ovat liitteessä E

Työn aikana käytiin lisäksi useita asiantuntijakeskusteluja Super Asfaltti Oy:n toimitusjohtajan Timo Mäen kanssa. Hänellä on pitkä kokemus asfalttialalta, ja hän on työskennellyt koko työuransa päällystealan eri tehtävissä sekä toiminut yli 30 vuoden ajan Super Asfaltti Oy:n johdossa. Mäki on vastannut laaja-alaisesti yrityksen toiminnasta, mukaan lukien urakoiden suunnittelusta, kiviainesten tuotannosta, asfalttiaseman toiminnasta sekä päällysteiden laadunhallinnasta, mikä on antanut hänelle kokonaisvaltaisen näkemyksen alan teknisistä, taloudellisista ja laadullisista tekijöistä. Keskusteluissa käsiteltiin muun muassa päällysteiden käyttöikään, työvirheisiin, materiaalivalintoihin ja kunnossapitoon liittyviä käytännön näkökulmia. Erityisesti esille nousi laadun merkitys, sillä Mäen näkemyksen mukaan päällysteen pitkä käyttöikä ja hyvä toimivuus perustuvat laadukkaisiin materiaaleihin, huolelliseen suunnitteluun sekä korkeatasoiseen työn toteutukseen. Keskusteluja ei toteutettu varsinaisina tutkimushaastatteluina, eikä niitä käytetty työn tutkimusaineistona, mutta niistä saatu asiantuntijatieto auttoi hahmottamaan tutkimusaiheen käytännön merkitystä sekä arvioimaan tulosten sovellettavuutta käytännön päällystystoiminnassa.

6 Ympäristövaikutusten laskelmat

6.1 Laskentamenetelmät

Päästölaskennat perustuvat työn tekijän laatimiin urakkakohtaisiin päästölaskelmiin. Esimerkkitapauksena hyödynnetään vuoden 2025 VAR ELY ET4 -urakkaa, jonka laskelmat on laadittu Motivan ohjeistuksen mukaisesti käyttäen liitteessä C esitettyjä päästökertoimia ja toimitettu tilaajan käyttöön. Laskennoissa on käytetty urakkakohteiden virallisia toteumien arvoja ja määriä. Lisäksi tarkastellaan vuoden 2026 DHJ LOU ET2 -urakan yhtä kohdetta, jonka avulla arvioidaan kuljetusmatkan vaikutusta päällystystyön kokonaispäästöihin. Laskennassa on käytetty urakkakohteiden virallisia toteumien arvoja ja määriä.

Päästötarkastelu toteutetaan eri käyttöikä- ja kuljetusskenaarioiden välisenä vertailuna, eikä kyseessä ole kattava elinkaariarviointi. Tarkastelun tarkoituksena on havainnollistaa käyttöiän ja kuljetusmatkojen vaikutusta päällysteen ympäristövaikutuksiin. Tulokset ovat suuntaa antavia, ja niihin liittyy lähtötietoihin sekä käytettyihin päästökertoimiin liittyviä epävarmuuksia. Koska päästökertoimet päivittyvät vuosittain ja laskentamenetelmät kehittyvät jatkuvasti, tuloksia ei tule tulkita absoluuttisina totuuksina, vaan vertailukelpoisina arvioina tarkasteltujen skenaarioiden välillä. Laskelmissa on käytetty liitteen C mukaisia päästöarvoja.

6.2 Päästökertoimien vaikutukset

Taulukosta 1 voidaan tarkastella päästöjen jakautumista vuoden 2025 päällystysurakan yksittäisen kohteen päästölaskelmassa. Tutkimuksen kaikissa laskelmissa on käytetty Eurobitumenin päivitettyä bitumin päästökerrointa (0,53 kgCO_{2e}/kg bitumia), jotta tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Päästökertoimissa tapahtui merkittävä muutos vuosien 2025 ja 2026 vaihteessa, jolloin bitumin päästökerroin kasvoi arvosta 0,16 kgCO_{2e}/kg arvoon 0,53 kgCO_{2e}/kg, mikä vastaa noin 231 % kasvua. Päivitetyyn päästökertoimen käyttö lisäsi taulukon 1 esimerkkikohteen laskennallisia kokonaispäästöjä 30,8 % verrattuna aiemmin käytettyyn päästökertoimeen. Muutos osoittaa, että käytetyillä päästökertoimilla on merkittävä vaikutus laskentatuloksiin, minkä vuoksi eri ajankohtina laaditut päästölaskelmat eivät ole aina suoraan vertailukelpoisia.

Työmenetelmä: AB16-LTA125-RAP25-kiinteä		
Vaihe:	CO2 -päästöt (kg)	Kokonaisosuus (%)
A1 Raaka-aineiden hankinta	44259	50,0 %
A2 Kuljetus valmistukseen	3478	3,9 %
A3 Valmistus	27427	31,0 %
A4 Kuljetukset työmaalle	10397	11,7 %
A5 Työmaatoiminnot	2945	3,3 %
yhteensä:	88505	100,0 %

Taulukko 1. VAR ELY ET4 -urakkaan kuuluneen kohteen nro. 2 päästölaskelman päästöjen jakautuminen, vaiheet A1 – A5.

6.3 Kuljetusmatkan vaikutus päästöihin

Kuljetusmatkan pituus asfalttiaseman ja työkohteen välillä on myös suuri päästötekijä matkan kasvaessa ihanteellista pidemmäksi. Esimerkki laskelmassa vertailtiin kolmen eri yrityksen kuljetusmatkan vaikutusta päästöihin. Kohde on vuoden 2026 urakasta DHJ LOU ET2, kohteena 207 Kt 41 Virttaan varalaskupaikka. Laskelma on tehty työkohdesuunnitelman mukaisten arvojen ja määrien avulla. Laskelma pohjautuu samaan laskelmapohjaan, jolla 2025 VAR ELY ET4 -laskelma on tehty. Laskelmassa huomioidaan kierrätysasfaltin pitoisuus, jonka perusteella määritetään tarvittavien neitseellisten raaka-aineiden määrät. Kuljetusten päästövertailu perustuu vaiheittaisiin kokonaispäästöihin, jotka lasketaan tonnakilometrien ja kuljetuskalustolle määritetyn päästökertoimen tulona. Päästökertoimien arvot on määritetty liitteessä C.

Työmenetelmä kohteella on laatta AB 16/100 kg/m² sekä kohteen tasausjyrsintä. Kierrätysasfaltin määrä laskelmassa on 20 %. Laskennallinen asfalttimassan määrä kohteella on 4228 tonnia. Jyrsintätyöt on suunniteltu 10–40 mm syvyydeltä, joten laskennassa on käytetty jyrsinsyvyyden keskiarvona 25 mm syvyyttä, sekä jyrsinrouheen tiheytenä 2200 kg/m³. Laskelmien välillä on muutettu ainoastaan kuljetusmatkan arvoa eri yritysten välillä. Eri yritysten matkat koneasemalta kohteelle ovat 14 km, 60 km ja 75 km. Laskennassa vertailuarvona käytetään tilannetta, jossa kuljetus matka on 0 km eli A4:n päästöt ovat 0.

Vertailuarvon kokonaispäästöt ovat 218,5 tn CO₂. Taulukosta 2, nähdään kaikki laskelmasta saadut päästöarvot.

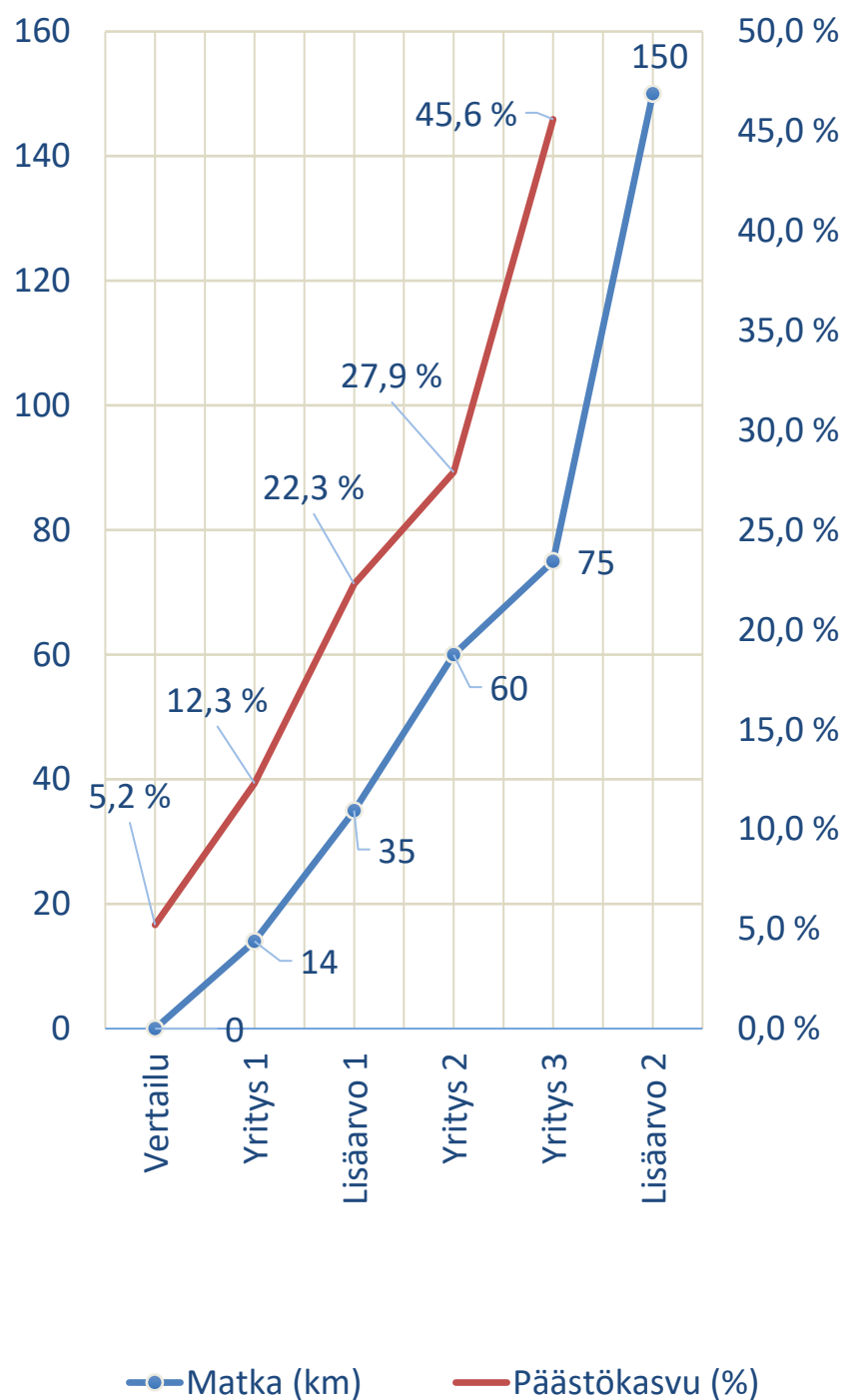
	Matka (km)	Kokonaispäästöt (tn)	Kuljetuspäästöt (tn)	Päästökasvu (%)
Vertailu	0	218,5	0	0,00 %
Yritys 1	14	229,9	11,4	5,20 %
Yritys 2	60	267,2	48,7	22,30 %
Yritys 3	75	279,4	60,9	27,90 %
Lisäarvo 1	35	246,9	28,4	12,30 %
Lisäarvo 2	150	340,3	121,7	45,60 %

Taulukko 2. Esimerkkilaskennan tulokset kuljetusmatkan vaikutuksista päästöihin.

Seuraavan sivun kaaviosta 1, huomataan että päästöjen kasvu kiihtyy ajomatkan kasvaessa. Laskelman lisäarvot 1 ja 2, on valittu mielivaltaisesti täydentämään kuvaajan tulkittavuutta. Laskelma eroaa Suomessa käytössä olevasta asfaltin ympäristölaskennasta, koska laskelmassa on huomioitu myös jyrityn asfalttirouheen kuljetusmatka yritysten omille koneasemille. Jyrinrouheen kuljetusta ei huomioida normaalisti.

Kuljetuskaluston Euro -luokkien muutoksilla luokista 4 luokkaan 6 on hyvin vähäinen. Väyläviraston tutkimuksen (2025) mukaan päästövähennäminen on A1-A5 vaiheet huomioiden vain 0,6 % [11].

Kuljetusmatkan vaikutus CO₂ -päästöihin



Kaavio 1. Kuvaaja esimerkkilaskelmasta kuljetusmatkan vaikutuksesta urakan päästöihin.

7 Johtopäätökset ja pohdinta

7.1 Käyttöikä ja päästöt

Kirjallisuuden, haastatteluiden ja päästölaskennan pohjalta, käyttöikä on yksi keskeisimmistä päällysteen päästöihin vaikuttavista tekijöistä. Jos päällysteen käyttöikä lyhenee esimerkiksi työvirheiden, lajittumisen tai puutteellisen tiivistyksen vuoksi, tie joudutaan päällystämään uudelleen useammin. Tällöin myös A1-A5-vaiheiden päästöt toistuvat useammin koko tarkastelujakson aikana.

Työn perusteella tarkoituksenmukaisempi vertailutapa voisi olla päästöjen tarkastelu käyttövuotta kohti. Tällöin voidaan erottaa toisistaan tilanteet, joissa yksittäinen urakka näyttää vähäpäästöiseltä laskelmien perusteella, mutta lyhyen käyttöiän vuoksi johtaa suurempiin kokonaispäästöihin pitkällä aikavälillä. Näin tarkastelu kohdistuu materiaalityökalujen ja työnaikaisen laadun yhteisvaikutukseen. Kasvavaa tiestön korjausvelkaa voitaisiin kuroa umpeen tai ainakin saavuttaa tasapaino, jolloin tulevaisuudessa jopa sen taittaminen ja teiden yleiskunnon paraneminen voisivat olla mahdollisia.

Kuva 13 havainnollistaa työn keskeistä ajatusta, vaikka yksittäisen päällystyskerran päästöt pysyisivät samoina, käyttöiän lyheneminen kasvattaa päästöjä käyttövuotta kohti. Tästä syystä työnaikaisten virheiden vaikutus ei rajoitu pelkästään laatuun tai kustannuksiin, vaan ulottuu myös ilmastovaikutuksiin.

Skenaario	Käyttöikä	Suhteelliset päästöt/ päällystyskerta	Tulkinta
Hyvä laatu	Pitkä	vakio	Päästöt -ja kustannukset käyttövuotta kohti pienenevät
Keskinkertainen laatu	keskiverto	vakio	Vertailutaso
Heikentynyt laatu	lyhyt	vakio	Päästöt -ja kustannukset käyttövuotta kohti kasvavat

Kuva 13. Taulukko havainnollistaa työn perusajatusta käyttöiän vaikutuksesta laadun, kustannusten ja päästöjen välillä.

Kierrätysasfalttia (RAP) käytettäessä olisi tärkeää puntaroida päästö- ja kustannusvaikutuksia verrattuna käyttöikään. Esimerkiksi, jos kierrätysasfaltin käytöllä saavutetaan 20 % parannus käyttöikään sekä kustannuksiin, käyttöikä voisi olla 20 % lyhyempi vertailumenetelmään nähden.

7.1.1 Kuljetusmatkan vaikutus päästöihin sekä laatuun

Asfalttiaseman ja työkohteen välimatka tulisi pitää järkevän mittaisena, koska se vaikuttaa suoraan syntyviin päästöihin ajettujen kilometrien mukaisesti. Varsinkin työmailla, joissa suoritetaan suuria määriä jyräintöjä päällystysten lisäksi, esimerkiksi laatikkojyräintä koko kohteelle. Levitettävän massan paksuuden ja jyräinsyvyyden kasvaessa kuljetuspäästöjen vaikutus kasvaa entisestään. Kuljetuskaluston päästöluokkien vaikutus kokonaispäästöihin on suhteellisen pieni. Väyläviraston ympäristövaikutuslaskelmien vertailussa (2026) CO₂-päästöt vähenivät vain noin 0,6 % siirryttäessä EURO 4 -päästöluokan kalustosta EURO 6 -luokan kalustoon. Tulosten perusteella uudempien kuljetuskaluston päästöluokkien vaikutus kokonaispäästöihin on suhteellisen pieni.

Lyhyempi kuljetusmatka on myös laadullisesti edullinen, sillä se helpottaa massan tuotannossa bitumin kuumennuslämpötilan pitämistä ihanteellisella tasolla, jolloin sen ominaisuudet eivät heikkene liiallisen kuumuuden vuoksi. Kuljetusmatka vaikuttaa lisäksi massan viilenemiseen ja lajittumiseen. Lajittumisen vaikutus korostuu erityisesti kaupunkiympäristössä, jossa toistuvat kiihdytykset ja pysähdykset lisäävät ilmiötä.

7.2 Laadullisten tekijöiden vaikutus käyttöikään

Päällystystyön laatu vaikuttaa suoraan päällysteen käyttöikään ja toimivuuteen. Työvirheet voivat lyhentää käyttöikää merkittävästi ja lisätä kunnossapitotarvetta, minkä vuoksi niiden ehkäisy on usein kustannustehokkain keino parantaa päällysteen kestävyyttä. Tämän työn perusteella keskeisimmät käyttöikää lyhentävät tekijät ovat lajittuminen, työnaikaiset virheet sekä puutteellinen suunnittelu. Näihin voidaan vaikuttaa jo ennen toteutusta ja työmaan aikana, mikä tekee niiden hallinnasta tehokkaan tavan pidentää päällysteen käyttöikää.

Syöttökoneen käytöllä voitaisiin vähentää lajittumariskiä erityisesti kylmissä olosuhteissa, kylmään vuodenaikaan tai kohteissa, joissa kuljetusmatkat ovat pitkiä, koska keskiverto lajittuminen voi lyhentää tien käyttöikää jopa viidellä vuodella.

7.3 Materiaalivalinnat

Materiaalivalintojen vaikutus käyttöikänsä ei ole yksiselitteinen, vaan valinnat tulee tehdä kohdekohtaisesti pitkäaikaislaatu -ja päästöt huomioiden. Erityisesti kiviaineksen ominaisuudet, sideaineen valinta sekä kierrätysasfaltin määrä ja suunnittelu vaikuttavat päällysteen mekaaniseen kestävyys, urautumisherkkyyteen ja halkeilualttiuteen. Suomen ilmasto-olosuhteet huomioiden RAP-pitoisuuden ja käytettävän elvyttävän sideaineen sekä elvyttimen optimointi on todella tärkeää. Suomen ilmastossa vaihtelevat olosuhteet luovat haastavan pohjan kierrätysasfaltin ja elinkaaren väliseen optimointiin.

RAP:n käytöllä voidaan saavuttaa merkittäviä ympäristö- ja kustannushyötyjä vähentämällä neitseellisen sideaineen tarvetta, mutta hyödyt riippuvat ratkaisevasti sideaineiden sekoittumistehokkuudesta, RAP:n laadusta sekä elvyttimien käytöstä. Korkeat RAP-pitoisuudet voivat alentaa materiaalivaiheen päästöjä, mutta mahdollinen kerrospaksuuden kasvattaminen ja tiheämpi kunnossapito voivat lisätä rakentamisen ja korjauksen päästöjä sekä kustannuksia, jolloin kokonaisvaikutusten arviointi vaatii laajempaa elinkaaritarkastelua.

Elvyttimillä voidaan parantaa RAP-massojen väsymis-, kosteus- ja halkeilunkestävyyttä sekä pidentää käyttöikää, mutta niiden annostelu ja soveltuvuus on määritettävä huolellisesti. Biopohjaiset elvyttimet ja polymeeripohjaiset lisäaineet näyttävät lupaavilta erityisesti kylmissä olosuhteissa, mutta niiden pitkäaikaisesta toimivuudesta eri ilmastoissa tarvitaan edelleen lisää tutkimusta. Suomen olosuhteissa, joissa päällyste altistuu suurille lämpötilavaihteluille, pakkasrasitukselle sekä toistuville jäätymis-sulamissyklille, materiaalien toimivuus ja pitkäaikaiskestävyys korostuvat. Materiaalivalinnoissa on pyrittävä tasapainoon kestävyys, käyttöikä ja päästöjen välillä. Erityisesti sidotuissa kantavissa kerroksissa RAP:n käytöstä saatavat hyödyt voivat olla merkittävästi suurempia kuin kulutuskerroksissa, koska rakenne ei ole suorassa kosketuksessa kosteuden, UV-säteilyn ja liikenteen aiheuttaman pintarasituksen kanssa. Tämän vuoksi sidotut kantavat kerrokset voivat tarjota paremman käyttöympäristön korkeammille RAP-pitoisuuksille, jolloin materiaalisäästöjen ja päästövähennysten potentiaali korostuu ilman yhtä suurta riskiä käyttöikänsä heikkenemisestä. Myös kantavissa kerroksissa elvyttimien käyttö voi olla tärkeää, sillä niiden avulla voidaan parantaa sideaineen elastisuutta ja siten lisätä rakenteen kykyä mukautua pohjarakenteessa tapahtuviin muutoksiin, kuten routimisesta tai painumisesta aiheutuviin muodonmuutoksiin. Tämä voi vähentää halkeiluriskiä ja parantaa rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä. Kantavan kerroksen halkeamat heijastuvat usein myös ylempään

kulutuskerrokseen, jolloin päällysteeseen muodostuu yhtenäinen halkeamareitti koko asfalttirakenteen läpi. Tällöin vesi pääsee tunkeutumaan rakenteeseen koko päällystepaksuuden matkalla, mikä lisää kosteusvaurioiden, jäätymis-sulamissykliä sekä rakenteen ennen aikaisen vaurioitumisen riskiä.

7.4 Seurantatyökalun runko

Työn pohjalta laaditaan seurantatyökalun runko, jonka tavoitteena on yhdistää päällysteen käyttöikä ja siitä aiheutuvat päästöt urakkatasolla. Työkalussa seurataan keskeisiä tekijöitä, kuten liikennemäärää, käytettyä massatyyppejä ja RAP-pitoisuutta, kuljetusmatkoja, sääolosuhteita, massan lämpötilaa sekä työn laatuun vaikuttavia tekijöitä, kuten tiivistystä ja mahdollista lajittumista. Näiden tietojen avulla voidaan arvioida päällysteen käyttöiän toteutumista ja vertailla eri ratkaisujen päästövaikutuksia järjestelmällisesti. Työkalu kehitetään yhteistyössä Väyläviraston kanssa, ja sen tarkoituksena on yhdistää jo kerätty tieto tulevaisuudessa kerättävään dataan. Pitkällä aikavälillä tavoitteena on tarkastella eri tekijöiden sekä niiden yhteisvaikutusten merkitystä päällysteen laatuun ja sitä kautta käyttöikään. Työkalua pyritään jatkokehittämään myöhemmin tehtävässä diplomityössä.

7.5 Työn rajoitteet ja epävarmuudet

Työ perustuu kirjallisuuskatsaukseen, esimerkkilaskelmiin ja asiantuntijahaastatteluun, minkä vuoksi tulokset ovat suuntaa antavia eivätkä yleispäteviä kaikissa kohteissa. Päästölaskenta on toteutettu vertailuperiaatteella eikä täydellisenä elinkaariarviointina, ja tarkastelu on rajattu elinkaaren alkuvaiheisiin A1–A5. Lisäksi käyttöiän arviointiin liittyy epävarmuuksia, sillä siihen vaikuttavat useat muuttuvat tekijät, kuten liikenne, sääolosuhteet ja toteutuksen laatu.

7.6 Jatkotutkimustarpeet

Jatkotutkimuksessa tulisi tarkastella päällysteen käyttöikää ja päästöjä pidemmällä aikavälillä todellisten kohteiden seurantadatan perusteella, jotta käyttöiän ja päästöjen välistä yhteyttä voitaisiin arvioida luotettavammin käytännön olosuhteissa. Erityisesti työaikaisten laadullisten tekijöiden, kuten lajittumisen, massan lämpötilan, tiivistyksen onnistumisen ja työvirheiden vaikutusta käyttöikään olisi hyödyllistä tilastoida systemaattisemmin. Tiivistyksen seurannan liittäminen osaksi esitettyä seurantatyökalua voisi tarjota tärkeää tietoa päällysteen toteutuneesta laadusta ja sen yhteydestä käyttöikään.

Lisäksi kierrätysasfaltin optimaalista käyttöä eri kohteissa tulisi tutkia siten, että tarkastelussa huomioidaan yhtäaikaaisesti materiaalivaiheen päästöt, päällysteen suorituskkyky, kunnossapitotarve sekä koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset. Erityisesti Suomen vaihtelevissa ilmasto-olosuhteissa olisi tärkeää tutkia RAP-massojen, elvyttimien ja muiden lisäaineiden pitkäaikaista toimivuutta sekä niiden vaikutusta päällysteen kestävyYTEEN.

Esitetyn seurantatyökalun kehittäminen ja käyttöönotto käytännön urakoissa edellyttää jatkotyötä ja pitkäjänteistä tiedonkeruuta. Erityisen tärkeää olisi tunnistaa sekä hyvin että heikosti kestäneet kohteet ja analysoida niiden välisiä eroja. Näin voitaisiin tunnistaa ne tekijät ja työmenetelmät, jotka mahdollistavat pitkän käyttöiän, sekä ne virheet ja olosuhteet, jotka altistavat päällysteen ennen aikaiselle vaurioitumiselle.

Tulevaisuuden seurannassa ja vertailussa keskeiseksi haasteeksi nousee kuitenkin kohteiden keskinäinen vertailukelpoisuus, sillä jokainen päällystyskohde on yksilöllinen.

Päällysrakenteen kantavuus, pohjarakenteen ominaisuudet, liikennemäärät, raskaan liikenteen osuus sekä ilmasto-olosuhteet vaikuttavat merkittävästi päällysteen kuormitukseen ja käyttöikään. Tämän vuoksi jatkotutkimuksessa olisi tärkeää kehittää vertailumenetelmiä, joilla eri kohteiden ominaisuuksia voidaan vakioda tai painottaa, jotta laadullisten tekijöiden todellinen vaikutus käyttöikään ja päästöihin voidaan erottaa luotettavammin.

7.7 Pohdinta

Päällysteen käyttöikä on keskeinen tekijä sekä päästöjen että kustannusten hallinnassa. Vaikka materiaalivalinnoilla, kuten kierrätysasfaltin (RAP) käytöllä, voidaan saavuttaa merkittäviä päästö- ja kustannushyötyjä, niiden todellinen vaikutus riippuu siitä, kuinka hyvin päällysteen käyttöikä säilyy. Jos käyttöikä lyhenee työvirheiden, lajittumisen, puutteellisen tiivistyksen, lämpötilapoikkeamien tai väärin materiaalivalintojen vuoksi, joudutaan päällyste uusimaan useammin, jolloin myös elinkaaren alkuvaiheen (A1–A5) päästöt toistuvat useammin. Joten pelkkä yksittäisen urakan vähäpäästöisyys ei riitä, vaan tarkastelun tulee kohdistua käyttövuotta kohti syntyviin päästöihin.

Kierrätysasfaltin käyttö tulee tulevaisuudessa olemaan entistä tärkeämmässä roolissa, sillä tieverkoston uusimisesta syntyy suuria määriä RAP-materiaalia, jolle asfaltin valmistus on käytännössä tärkein ja ainoa hyödyntämiskohde. Sen käyttö vähentää neitseellisten materiaalien tarvetta, mutta on selvää, että RAP:n käyttöä ei voida arvioida pelkästään materiaalivaiheen päästöjen tai kustannusten perusteella. Erityisesti suuret RAP-pitoisuudet

voivat heikentää käyttöikää, ellei massan toimivuutta pystytä varmistamaan riittävällä suunnittelulla, elvyttimillä ja laadukkaalla toteutuksella. Tämä korostuu erityisesti Suomen hankalissa sääolosuhteissa, joissa suuret lämpötilavaihtelut, pakkasrasitus ja jäätymissulamissyklit asettavat päällysteille poikkeuksellisen korkeat vaatimukset.

RAP-massojen reseptisuunnittelussa haasteena on usein kierrätysmateriaalin mukana tuleva suuri hienoainesmäärä. RAP-pitoisuuden kasvaessa seoksen rakeisuuskäyrä sijoittuu usein hienoaineksen ylärajan tuntumaan tai joissain tapauksissa jopa sen yli. Tämä voi johtaa pieniin tyhjätila-arvoihin, mikä voi näennäisesti näyttää laadullisesti hyvältä tulokselta, mutta seoksen kokonaiskoostumus ei välttämättä ole toiminnallisesti optimaalinen. Liiallinen hienoaines voi heikentää asfalttimassan ja kiviaineksen runkorakennetta, lisätä sideaineen pintaan nousun riskiä sekä heikentää päällysteen muodonmuutos- ja halkeilunkestävyyttä. Vähäisempi määrä karkeampaa kiviainesta aiheuttaa huonomman vastuskyvyn nastarengaskulutusta vastaan, joka on Suomessa merkittävin syy teiden urautumiselle.

Laboratorio-olosuhteissa saadut tulokset eivät välttämättä vastaa todellista kenttätoimivuutta, koska laboratoriosekoitettu asfalttimassa on yleensä tasalaatuista eikä siinä esiinny tuotannon, kuljetuksen tai levityksen aikana syntyvää mekaanista- tai lämpötilalajittumista. Lisäksi kohdalle osuneiden tutkimusten pohjalta laboratoriossa massan lämmitys- ja sekoitusajat ovat usein pidempiä ja hallitumpia kuin koneasematuotannossa, mikä voi parantaa sideaineen sekoittumista ja massan homogeenisuutta. Myös useasti käytettävällä kiertotiivistimellä saavutetaan usein pienemmät tyhjätila-arvot kuin käytännön työmaalla, minkä vuoksi laboratoriotulokset voivat antaa päällysteen todellisesta suorituskyvystä optimistisemmän kuvan. Kiertotiivistyksen sijaan laboratoriosekoittimella valmistetusta massasta tehdyistä koelaatoista poratuista näytteistä tehdyt tutkimukset antavat todenmukaisemman kuvan päällysteen suorituskyvystä.

Käytännön toteutuksen merkitys on erittäin suuri. Työmaasuunnittelussa tulisi huomioida kuljetusmatkat, sääolosuhteet, massan lämpötila, kuormien rytmitys sekä jyräyksen onnistuminen. Erityisesti syöttökoneen käyttö voi vähentää mekaanista- ja lämpölajittumista sekä parantaa massan homogeenisuutta, mikä voi olla merkittävä tekijä käyttöiän pidentämisessä kylmissä olosuhteissa ja pitkien kuljetusmatkojen kohteissa. Tämä korostaa sitä, että laadukas toteutus ja työnaikainen laadunhallinta voivat olla yhtä merkittäviä kuin itse materiaalivalinnat.

Käytännön työvaihe, johon tulisi kiinnittää enemmän huomiota, on koneaseman päivän ensimmäinen kuorma. Päivän alussa koneaseman komponentit, eivät ole vielä saavuttaneet tasaista käyttölämpötilaa, mikä voi aiheuttaa massaan suurempia lämpötilaeroja verrattuna päivän aikana vakiintuneeseen tuotantoon. Tämä lisää lämpölajittumisen riskiä jo valmistusvaiheessa. Seuraavaksi ensimmäinen kuorma siirtyy usein kylmään varastosiiloon ja edelleen työmaalla kylmään levittimen tuuttiin, mikä kasvattaa massan jäähtymistä ja epähomogeenisuutta entisestään. Käytännössä tämä näkyy erityisesti lähtösaumassa, jossa joudutaan usein tekemään käsityötä kolalla, saumalta työnnetään isommat kylmettyneet kivet jo valmiiksi jäähtyneeseen aloituskohtaan. Mikäli nämä kylmät ja lajittuneet kivet jäävät päällysteen pintaan, ne voivat muodostaa paikallisesti harvan kohdan, josta vaurioituminen voi alkaa ennen aikaisesti. Sauma kohdat ovat jo valmiiksi päällysteen heikkoja kohtia. Tämän vuoksi ensimmäisen kuorman laadunhallintaan tulisi kiinnittää enemmän huomiota.

Toinen käytännön työvaihe, johon tulisi kiinnittää enemmän huomiota, on päivän lopetussauma. Lopetussauma on laadun kannalta kriittinen kohta, erityisesti silloin kun massamäärät mitoitetaan liian tiukasti. Tällöin levittimen tuutin reunoille kertynyt kylmentynyt ja lajittunut massa joudutaan usein käyttämään loppusaumaan, mikä heikentää sauman laatua ja lisää paikallisen vaurioitumisen riskiä. Lopetussauma työstetään kolalla, mikä lisää epähomogeenisuuden mahdollisuutta verrattuna koneellisesti tasaisesti levitettyyn massaan. Koska alku- ja lopetussaumat ovat rakenteellisesti herkkiä kohtia, niiden toteutuksen huolellisuuteen tulisi kiinnittää erityistä huomiota jo työmaasuunnittelussa esimerkiksi massamäärien mitoituksella ja työvaiheiden ennakkoinnilla. Tulevaisuudessa voisi olla hyödyllistä pohtia myös kannustinjärjestelmiä, joilla laadukkaasti toteutetut alku- ja lopetussaumat huomioitaisiin osana työn laatua.

Pohjamassan levityksen huolellisuus on tärkeä tekijä päällysteen pitkäaikaisen toimivuuden kannalta. Urien tasauksessa voidaan pohtia, saadaanko urakohdat tiivistettyä valssijyrällä riittävän tehokkaasti, jos jyrän reuna kantaa osittain vanhan, kovan päällysteen päällä eikä tiivistysenergia kohdistu tasaisesti uuteen massaan. Mikäli urakohtiin jää paikallisesti heikompi tiiveys, aiheuttaako liikenne myöhemmin jälkitiivistymistä, mikä kiihdyttää urautumisilmiötä. Tämän vuoksi olisi perusteltua selvittää, voisiko kumipyöräjäyrä soveltua paremmin pohjamassojen ja uratäyttöjen tiivistämiseen, koska sen pyörien aiheuttama paine kohdistuisi paremmin ura kohtiin ja epätasaiseen pintaan. Testaus vaatisi kuitenkin käytännön kokeita, joissa verrattaisiin eri tiivistysmenetelmien vaikutusta pohjamassan tiiveyteen, jälkitiivistymiseen ja urautumisen kehittymiseen. Testit olisi mahdollista toteuttaa yhdeltä

urautuneelta kohteelta poranäytteiden avulla. Eri näytteidenotto kohtiin käytettäisiin valssi- ja kumipyöräjäriä.

Tulevaisuuden näkökulmasta olisi tärkeää kehittää systemaattista seuranta, jossa hyvin ja huonosti kestäviä kohteita vertaillaan keskenään. Näin voitaisiin tunnistaa ne tekijät, jotka mahdollistavat pitkän käyttöiän, sekä ne virheet ja olosuhteet, jotka altistavat päällysteen ennen aikaiseen vaurioitumiseen. Suomen tieverkolla on jo nähtävissä, että osa kohteista kestää hyvin myös korkeammilla RAP-pitoisuuksilla, kun taas osa kohteista vaurioituu nopeasti. Tämä osoittaa, että lopullinen suorituskyky on monen tekijän yhteisvaikutus, eikä sitä voida selittää yhdellä yksittäisellä muuttujalla.

Tieverkon kasvava korjausvelka tekee laadukkaasta toteutuksesta entistä tärkeämpää. Kun korjausbudjetit pienenevät, tulisi kiinnittää erityistä huomiota sellaisiin työvaiheisiin, jotka eivät merkittävästi nosta urakan hintaa, mutta voivat vaikuttaa käyttöikään ratkaisevasti. Tällaisia ovat esimerkiksi sisäinen laadunvalvonta, työntekijöiden ohjeistus, sääolosuhteiden huomioiminen suunnittelussa sekä työnaikaisten virheiden nopea korjaaminen. Käyttöikää parantaviin toimenpiteisiin panostaminen vaatii urakoitsijoilta ammattitaitoa ja vastuullisuutta, mutta pitkällä aikavälillä hyöty kohdistuu koko tieverkkoon, yhteiskuntaan ja myös urakoitsijoiden omaan toimintaan vähentyneiden takuukorjausten ja paikkaustarpeiden kautta. Kokonaisuutena voidaan todeta, että käyttöikä muodostaa keskeisen linkin laadun, kustannusten ja päästöjen välillä, ja sen huomioiminen mahdollistaa kestävämmän ja realistisemmän päätöksenteon päällystysalalla.

8 Yhteenveto

Tässä työssä tarkasteltiin päällystystyön laadullisten tekijöiden, päällysteen käyttöiän ja päästöjen välistä yhteyttä. Työn lähtökohtana oli ajatus siitä, että yksittäisen päällystysurakan päästöjen tarkastelu ei yksin riitä kuvaamaan päällysteen todellisia ympäristövaikutuksia, vaan huomioon tulee ottaa myös päällysteen käyttöikä. Jos päällyste vaurioituu ennen aikaisesta esimerkiksi työvirheiden, lajittumisen, puutteellisen tiivistyksen tai lämpötilapoikkeamien vuoksi, päällyste joudutaan uusimaan aikaisemmin. Tällöin myös materiaalien tuotannosta, kuljetuksista, massan valmistuksesta ja levityksestä syntyvät päästöt toistuvat useammin.

Työssä havaittiin, että käyttöikä toimii keskeisenä yhdistäjänä päällysteen laadun, kustannusten ja päästöjen välillä. Päästöjä voidaan monissa tapauksissa vähentää tehokkaammin pidentämällä päällysteen käyttöikää kuin tarkastelemalla pelkästään yksittäisen urakan materiaalivalintoja. Tämä korostaa laadukkaan toteutuksen, kohdekohtaisen suunnittelun, päällysteen suunnittelun ja työnaikaisen laadunhallinnan merkitystä. Erityisesti lajittuminen, massan epätasainen lämpötila, pitkät kuljetusmatkat ja epäonnistunut tiivistys voivat muodostaa päällysteeseen heikkoja kohtia, jotka nopeuttavat vaurioitumista ja lisäävät kunnossapitotarvetta.

Kierrätysasfaltin eli RAP:n käyttö vähentää neitseellisten materiaalien tarvetta ja voi pienentää päällystysten alkuvaiheen päästöjä sekä kustannuksia. Työn perusteella RAP:n käyttö on perusteltua, mutta sen hyödyt riippuvat olennaisesti RAP-materiaalin laadusta, kosteuspitoisuudesta, sideaineiden sekoittumisasteesta, käytetystä massatyypistä sekä päällysteen toteutuneesta käyttöiästä. Suuri RAP-pitoisuus voi vähentää materiaalivaiheen päästöjä, mutta jos se heikentää päällysteen kestävyyttä tai lisää kunnossapitotarvetta, kokonaisvaikutus voi muuttua epäedulliseksi. Tämän vuoksi RAP:n käyttöä tulisi arvioida aina kohdekohtaisesti käyttöikä, päästöt ja suorituskyky huomioiden. RAP:n käytössä korostuvat oikeanlaisten elvyttimien käyttö sekä huolellinen massasuunnittelu. Laadukkaasti toimiva ja suuren kierrätysasfalttimäärän sisältävä seos mahdollistaisi merkittävät päästö- ja kustannusvähennykset.

Työssä tarkasteltiin myös keinoja, joilla päällysteen laatua voidaan parantaa. Keskeisiä keinoja ovat huolellinen työmaasuunnittelu, kuljetusmatkojen hallinta, massan lämpötilan seuranta, oikea jyräyskalusto ja tiivistyksen ajoitus sekä lajittumisen ehkäisy. Välisyöttimen

käyttö voi olla perusteltua erityisesti vaativissa kohteissa, joissa pitkät kuljetusmatkat, kylmät olosuhteet tai suuri liikennemäärä lisäävät laaturiskejä. välisyöttimen avulla voidaan vähentää kuormalajittumista, tasata massan lämpötilaeroja ja parantaa levityksen jatkuvuutta.

Työn pohjalta laaditaan Väylävirastolle seurantatyökalun runko, jonka tarkoituksena on yhdistää päällysteen käyttöikä ja päästöt urakkatasolla. Työkalun avulla pyritään tulevaisuudessa keräämään tietoa muun muassa liikennemääristä, massatyypeistä, RAP-pitoisuuksista, kuljetusmatkoista, sääolosuhteista, massan lämpötilasta, tiivistyksestä ja lajittumisesta. Pitkällä aikavälillä tällainen seuranta voisi auttaa tunnistamaan, mitkä tekijät johtavat pitkäikäisiin päällysteisiin ja mitkä altistavat ennenaikaisille vaurioille. Näin päällystysratkaisuja voitaisiin kehittää nykyistä järjestelmällisemmin sekä taloudellisesti että ympäristön kannalta kestävämpään suuntaan.

Lähteet

- [1] N. Liu *et al.*, “Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 9, no. 4, pp. 532–555, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jtte.2022.06.001.
- [2] S. Bai, L. Varga, and E. Manola, “Unexplored challenges in quantifying and reducing carbon emissions in road maintenance,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 204, p. 104844, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.tra.2025.104844.
- [3] N. Väättäinen, “Asfalttipäällysteiden takuu aika – Urautumisen ja vaurioitumisen seuranta,” Tampereen Yliopisto, Tampere, 2020. [Online]. Available: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202006186152>
- [4] X. Chen and H. Wang, “Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 187, pp. 148–157, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.207.
- [5] P. Pohjola, “Asfaltin tiivistysopas 2013,” no. 1, p. 16, 2013.
- [6] J. Wang, R. Zhang, H. Zhou, W. Huang, D. Feng, and X. Li, “Optimization of asphalt mix design considering mixture performance, environmental impact, and life cycle cost,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 512, p. 145618, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145618.
- [7] S. H. Farjana, M. A. P. Mahmud, and N. Huda, “Introduction to Life Cycle Assessment,” in *Life Cycle Assessment for Sustainable Mining*, Elsevier, 2021, pp. 1–13. doi: 10.1016/B978-0-323-85451-1.00001-9.
- [8] J. Li, F. Xiao, L. Zhang, and S. N. Amirkhanian, “Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 233, pp. 1182–1206, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.061.
- [9] A. Farina, M. C. Zanetti, E. Santagata, and G. A. Blengini, “Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 117, pp. 204–212, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.10.015.
- [10] O. Marko, “Päästölaskentamallien hyödyntäminen CO₂-päästöjen optimoinnissa asfalttialalla,” Opinnäytetyö, Centria Ammattikorkeakoulu, Teknologiaosaamisen johtamisen koulutusohjelma, 2018. [Online]. Available: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/145077/MarkoOlli5_2018.pdf?sequence=1
- [11] N. Teirasvuori, E. Silvola, and Varis Taneli, “Päällystyshankkeiden päästöraja-arvojen kehitys, Väyläviraston julkaisuja 2026.” Motiva Oy, Väylävirasto, 2026.
- [12] “Tien kunnan arviointi.” Väylävirasto, Oct. 05, 2020. Accessed: Mar. 02, 2026. [Online]. Available: <https://vayla.fi/kunnossapito/tieverkon-kunnossapito/tien-kunnan-arviointi>
- [13] M. Pitkanen, “Asfalttipäällysteiden urautuminen,” Hämeen Ammattikorkeakoulu, 2023. [Online]. Available: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/811963/Pitkanen_Martina.pdf?sequence=2
- [14] S. Similä, Teams, Apr. 17, 2026.
- [15] H. Lehtimäki, “Asfalttirouheen elvyttäminen keveillä öljytuotteilla,” Aalto Yliopisto, 2012. [Online]. Available: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201209213137>
- [16] M. A. Ishaq and F. Giustozzi, “Rejuvenator effectiveness in reducing moisture and freeze/thaw damage on long-term performance of 20 % RAP asphalt mixes: An Australian case study,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 13, p. e00454, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00454.
- [17] B. Moins, D. Hernando, M. Buyle, C. France, W. Van Den Bergh, and A. Audenaert, “On the road again! An economic and environmental break-even and hotspot analysis of reclaimed asphalt pavement and rejuvenators,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 177, p. 106014, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.106014.
- [18] J. Yu, Z. Lin, G. Zou, H. Yu, Z. Leng, and Y. Zhang, “Long-term performance of recycled asphalt mixtures containing high RAP and RAS,” *Journal of Road Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 36–53, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jreng.2024.01.003.

- [19] “Nettonykyarvo.” Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://pankkiasiat.fi/nettonykyarvo>
- [20] M. Fakhri, T. Ahmadi, E. Shahryari, and M. Jafari, “Evaluation of fracture behavior of stone mastic asphalt (SMA) containing recycled materials under different loading modes at low temperatures,” *Construction and Building Materials*, vol. 386, p. 131566, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131566.
- [21] P. Virtala, P. Alanaatu, and E. Huuskonen-Snicker, “Tien urautuminen kesällä ja talvella 2017-2019.” [Online]. Available: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/176830/vt_2019-23_978-952-317-747-5.pdf?sequence=5
- [22] “Päällysteiden kunto ja vauriot,” Sep. 2024, [Online]. Available: <https://vayla.fi/kunnossapito/tieverkon-kunnossapito/paallysteiden-kunto>
- [23] N. Hietala and P. Kuula, “Asfalttikiviaineksen raemuodon ja murskaustavan vaikutus kuulamylyyarvoon.” Väylävirasto, 2019. [Online]. Available: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/172718/vt_2019%2015_978-952-317-724-6.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [24] T. Shoukat, P. J. Yoo, J. H. Kim, and Y. Kim, “Comparative study on fiber reinforcement and geogrid for enhancing the long-term performance of asphalt pavements against rutting failure,” *Construction and Building Materials*, vol. 499, p. 144083, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144083.
- [25] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 10th ed., vol. 2015. USA: Pearson Education, Inc, 2015.
- [26] E. Coleri, J. T. Harvey, K. Yang, and J. M. Boone, “A micromechanical approach to investigate asphalt concrete rutting mechanisms,” *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 36–49, May 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.041.
- [27] E. Behzadfar and S. G. Hatzikiriakos, “Viscoelastic properties and constitutive modelling of bitumen,” *Fuel*, vol. 108, pp. 391–399, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.12.035.
- [28] H. Väisänen, “Kierrätysasfaltin tekninen hyödyntäminen,” Lahden ammattikorkeakoulu, Ympäristöteknologia, 2014. [Online]. Available: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/76740/Vaisanen_Henri.pdf?sequence=1
- [29] O.-V. Laukkanen, H. Soenen, H. H. Winter, and J. Seppälä, “Low-temperature rheological and morphological characterization of SBS modified bitumen,” *Construction and Building Materials*, vol. 179, pp. 348–359, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.160.
- [30] P. Kuula *et al.*, “Asfalttinormit 2023.” PANK ry, Suomi, 2023.
- [31] P. Halkola, “Asfalttipäällystesuunnittelu katuhankkeessa,” Tampereen ammattikorkeakoulu, 2016. [Online]. Available: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/107897/Halkola_Paula.pdf;jsessionid=A653A3E2497CF59B2B30BC4F44B12804?sequence=1
- [32] Y. Wang, “Research on thickness problem of pavement asphalt layer based on energy dissipation,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 839–846, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.04.168.
- [33] Y. Hu, L. Sun, H. Cheng, and R. Yang, “Modulus back-calculation method for asphalt pavements with limited surface layer thickness based on interlayer stiffness coordination factors,” *NDT & E International*, vol. 160, p. 103652, May 2026, doi: 10.1016/j.ndteint.2026.103652.
- [34] N. M. Andryukhov and S. A. Pavlov, “Technology and principles of asphalt paving,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1159, no. 1, p. 012003, Jun. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1159/1/012003.
- [35] X. Chen, D. Ren, C. Ai, Y. Cao, C. Yan, and M. Tang, “Numerical simulation study on fracture behavior of asphalt concrete under temperature segregation effect,” *Construction and Building Materials*, vol. 497, p. 143866, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143866.
- [36] J. Shi, H. Gong, L. Cong, H. Liang, and M. Ren, “Evaluating and quantifying segregation in asphalt pavement construction: A state-of-the-practice survey,” *Construction and Building Materials*, vol. 383, p. 131205, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131205.
- [37] Z. Wei *et al.*, “Impact of aggregate gradation and asphalt-aggregate ratio on pavement performance during construction using back propagation neural network,” *Automation in Construction*, vol. 165, p. 105569, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105569.

- [38] C. Sun, P. Li, Y. Ma, X. Gou, and Z. Ma, "Experimental simulation evaluation and control measures of paving segregation for the stone matrix asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 440, p. 137360, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137360.
- [39] F. Kiraly, "FKE F.Kiraly Engineering asfalttiaseman käyttöohjeet -opas." FKE Engineering, Suomi, 1991.
- [40] M. Euren, "Remix-menetelmän prosessista johtuvien arvonmuutosten minimoiminen," Mestarityö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, 2021. [Online]. Available: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/495608/Eure%20n_Markus.pdf?sequence=2
- [41] "BMF 2500 feeder with FLEXMIX: Material as it should be," Bomag Fayat Group. Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://www.bomag.com/ww-en/machinery/categories/pavers-feeders/feeders/bmf-2500-s-flexmix-94060/>

Liitteet

Liite A: Väylävirasto, Ympäristövaikutusten laskennat 2025.pptx, sivu 22, kuva 8 [11].

Liite B. Kulumisen vertailukuvat

Liite C. Päästölaskennoissa hyödynnetyt arvot

Liite D. Tien kunnon arviointi, teiden kuntoluokitus [12].

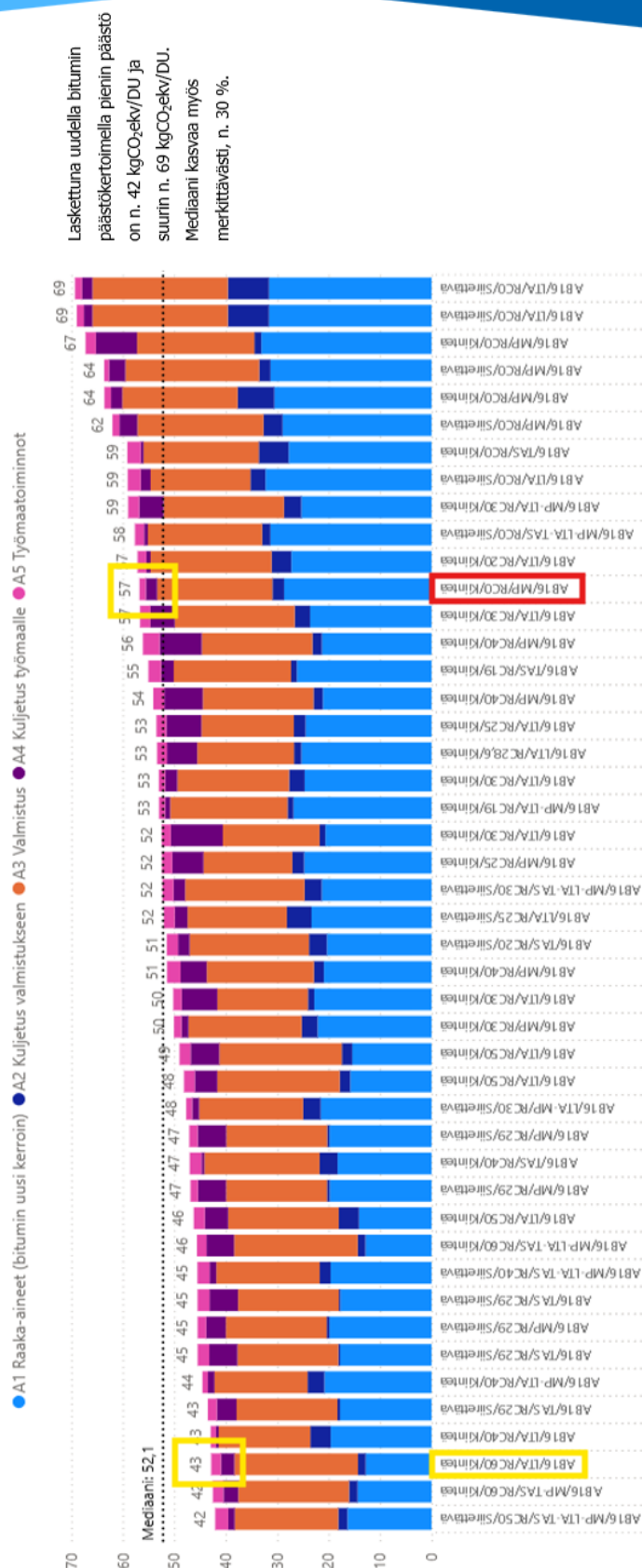
Liite E. Haastattelukysymykset, Mitta Oy Sami Similän haastattelu

Liite F. Koneiden havainnekuvat

Liite A. Väylävirasto, ympäristövaikutusten laskennat 2025

Kuva 8. Ympäristövaikutusten laskennat 2025: AB16, LTA+MP+TAS [kgCO₂ekv/DU]

Moduulit A1-A5 yhteensä uudella bitumin päästökertoimella



Liite B. Kuluminen vertailun kuvat

Saman kohdan kuluminen valuasfaltti korjauksen jälkeen.



20.2.2026



12.4.2026

Liite C. Päästölaskennoissa hyödynnetyt arvot

id	Versio	Ryhmä	Alaryhmä	Panos, FIN	CO ₂ e,		Hukkakerroin		Updated date
					Yksikkö	kg/yksikkö	CO ₂ e, kg/kg	työmaalla	
7100000713	01.00.000	asfaltti	asfaltti	asfaltti, AB	kg	0,047	0,047	1.05	2022-12-08
7100000716	01.00.010	asfaltti	asfaltti	bitumi	kg	0,16	0,16	1.05	2025-06-03
7100000719	01.00.010	asfaltti	asfaltti	bitumiemulsio	kg	0,14	0,14	1.05	2025-06-03
7100000721	01.00.000	kiviainekset	hiekkä	hiekkä, saumaushiekkä	kg	0,004	0,004	1.05	2022-12-08
7100000748	01.00.000	kiviainekset	murske	murske, kalliomurske, KaM 0/16	kg	0,006	0,006	1.05	2022-12-08
7100000777	01.00.010	kuljetus	kuljetus	Maansiirtoautot 32t, 100 %, maantieajo	tkm	0,051			2025-06-03
7100000783	01.00.000	kuljetus	kuljetus	Maansiirtoautot 32t, 80 %, maantieajo	tkm	0,061			2022-12-08
7100000807	01.00.000	kuljetus	kuljetus	Täysperävaunun yhdistelmä, 60t, 80 % maantieajo	tkm	0,045			2022-12-08
7100000801	01.00.010	kuljetus	kuljetus	Täysperävaunun yhdistelmä, 60t, 100 % maantieajo	tkm	0,038			2025-06-03
7100000780	01.00.010	kuljetus	kuljetus	Maansiirtoautot 32t, 50 %, katuajo (massatavaran kuljetus)	tkm	0,15			2025-06-03
7100000813	01.00.000	kuljetus	kuljetus	Täysperävaunun yhdistelmä, 76t, 50 %, maantieajo	tkm	0,058			2022-12-08
7100000835	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Asfaltin jyrä	h	13			2025-06-03
7100000836	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Asfaltin levityskone, koko 1, 75 kW	h	27			2025-06-03
7100000837	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Asfaltin levityskone, koko 3, 160 kW	h	58			2025-06-03
7100000838	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Asfaltin levityskone, koko 2, 120 kW	h	44			2025-06-03
7100000843	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Jyrä 7-15 tn	h	28			2025-06-03
7100000844	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Jyrä alle 7 tn	h	10			2025-06-03
7100000845	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Jyrä yli 15 tn	h	45			2025-06-03
7100000959	01.00.010	työkoneet	työkoneet	kasteluauto	h	51			2025-06-03
7100000878	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Pyöräkuormaaja, KUP 100-130 (13-19tn)	h	38			2025-06-03
7100000879	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Pyöräkuormaaja, KUP 100-130 (13-19tn) harjalla	h	38			2025-06-03
7100000880	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Pyöräkuormaaja, KUP 150-210 (20 tn tai yli)	h	60			2025-06-03
7100000881	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Pyöräkuormaaja, KUP 30-90 (alle 12,5 tn)	h	20			2025-06-03
7100000882	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Pyöräkuormaaja, KUP 30-90 (alle 12,5 tn) harjalla	h	20			2025-06-03
7100000855	01.00.010	työkoneet	työkoneet	KKH 21, kaivinkone, tela-alustainen	h	33			2025-06-03
7100000894	01.00.010	työkoneet	työkoneet	Traktori, TR 80	h	25			2025-06-03
7100000786	01.00.010	kuljetus	kuljetus	Pakettiauto 2,7t, 40 %, katuajo	tkm	0,67			2025-06-03
7100000787	01.00.010	kuljetus	kuljetus	Pakettiauto 2,7t, 40 %, maantieajo	tkm	0,52			2025-06-03
7100000762	01.00.010	kuljetus	kuljetus	Jakelukuorma-auto 15t, 40 %, katuajo	tkm	0,19			2025-06-03
7100000763	01.00.010	kuljetus	kuljetus	Jakelukuorma-auto 15t, 40 %, maantieajo	tkm	0,14			2025-06-03
7100001179	01.00.010	polttoaineet	polttoaineet	Kevyt polttoöljy, fossiilinen	l	3,31			2025-06-03
7100001172	01.00.010	polttoaineet	polttoaineet	Sähkö, CHP	kWh	0,068			2025-06-03

Taulukon lähteet:

<https://co2data.fi/infra/reports/INFRA%20ty%C3%B6koneet%20R01.05.pdf>

<https://co2data.fi/infra/>

Muut lähteet:

Väylävirasto: 2025 Eurobitumen päivitetty bitumin päästökerroin (0,53 kgCO₂/kg)

https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/CE_Delft_190325_STREAM_Freight_Transport_2020_FINAL.pdf

<https://www.nynas.com/en/about/business/our-production-and-supply-network/>

-rahtilaiva, lyhyet merimatkat, 5,000–9,999 dwt; 0,0296 CO₂ kg/tkm

-bitumin kuljetus reitti merellä: 546 km

-bitumin ajomatka Suomessa: 193 km

-kiviaineksen kuljetusmatka 0,4 km (koneaseman yhteydessä louhos)

<https://carbonneutralshipping.com.au/c02-in-shipping/>

https://co2data.fi/infra/#fi_id7100000719

-bitumiemulsio

<https://www.openco2.net/fi/emission-factor/1730/>

-vesi

<https://www.climateq.io/data/emission-factor/265e01dd-de54-405d-a6ad-6972d6c82560>

-nestekaasu

Laskelmat on tehty Excel -taulukkolaskenta ohjelmassa.

Liite D. Tien kunnan arviointi, teiden kuntoluokitus

Kuntoluokitus

Millainen tie on hyvässä ja millainen huonossa kunnossa?

Tietä voidaan pitää huonokuntoisena, jos sillä liikkua on vaikeaa ajolinjoja, tai jos tie on niin epätasainen, että se haittaa matkustuskavuutta.

Päällystetty tie on vielä hyväkuntoinen, kun sen päällyste on uraton, ja korkeintaan vanhuuttaan väriltään haalistunut. Sillä ei ole suuria painumia eikä heittoja ja halkeamat ovat kapeita tai hyvin paikattuja.

Tiet luokitellaan niiden kunnan mukaan

Päällystetyt tiet jaetaan viiteen kuntoluokkaan. Kuntoluokan määrittäminen pohjautuu mittaus- ja inventointitietoihin, tien liikennemäärään ja nopeusrajoitukseen. Teillä, joilla liikennemäärät ovat suuret, kuntoluokka määrittyy pitkälti urasyvyyden mukaan. Vähäliikenteisillä teillä taas inventoidut vauriot ovat tärkeässä roolissa.

Kuntoluokitus toimii päällystetöiden suunnittelijoiden työkaluna. Lisäksi luokituksen avulla seurataan Suomen teiden kunnan ja kunnan kehittymistä.

Kuntoluokitus

5. Erittäin hyvä: Uutta vastaava kunto. Ylläpitotarpeita ei ole.
4. Hyvä: Kunto on hyvä, vaikka normaalia kulumista jo esiintyykin. Ylläpitotarpeita ei ole.
3. Tyydyttävä: Tyydyttävä kunto. Tarvitaan yleensä kunnan tehostettua seurantaa ja yksittäisiä ylläpitotoimia saatava olla perusteltua tehdä.
2. Huono: Korjausta vaativa kunto. Tämä on kestävä tienpidon kannalta oikea ylläpito- ja peruskorjaustoimenpiteiden toteutushetki.
1. Erittäin huono: Heikko, ei enää hyväksyttävissä oleva kunto. Aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia niin tienpitäjälle kuin tienkäyttäjille.

Päivitetty: 5.10.2020



Liite E. Haastattelukysymykset, Mitta Oy Sami Similän haastattelu

1. Mitä asioita RAP:n käytössä tulee erityisesti huomioida?
2. Miten RAP:n ominaisuudet muuttuvat kierrätysprosessin aikana?
3. Kuinka monta kierrätys sykliä RAP voi käydä läpi ennen kuin sen laatu heikkenee merkittävästi?
4. Miten erilaiset ilmasto-olosuhteet vaikuttavat RAP:n käyttöön ja toimivuuteen?
5. Millaisia RAP:n käyttöön liittyviä tutkimuksia Suomessa on tehty?
6. Millä keinoilla RAP:ia sisältävän päällysteen laatua ja käyttöikää voidaan parantaa?
7. Kuinka suuria vaihteluita RAP:n kosteuspitoisuudessa esiintyy?
8. Miten RAP:n käyttö vaikuttaa asfalttimassan suhteitukseen?
9. Miten RAP:n käyttö vaikuttaa massan rakeisuuskäyrään?
10. Mitä lisäaineita voidaan käyttää asfalttimassan ominaisuuksien ja laadun parantamiseksi?
11. Millaiset elvyttimet soveltuvat parhaiten RAP:n sisältämän bitumin elvyttämiseen?
12. Millaiselle RAP:n käyttöön liittyvälle jatkotutkimukselle Suomessa olisi tarvetta?

Liite F. Koneiden havainnekuvat

Alkuperäiset havainnekuvat, joita on paranneltu tekoälyn (ChatGPT) avulla siistimpään muotoon. Alkuperäiset hahmotelmat: Kasper Lehtinen.

