



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

HULEVESIEN LÄPÄISEVIEN RAKENTEIDEN TUKKEUTUVUUS POHJOISISSA OLOSUHTEISSA

Johanna Sirviö

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Kesäkuu 2021

TIIVISTELMÄ

Hulevesien läpäisevien rakenteiden tukkeutuvuus pohjoisissa olosuhteissa

Johanna Sirviö

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 78 s. + 1 liite

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: TkT Pekka Rossi

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää läpäisevien rakenteiden soveltuvuutta pohjoisissa olosuhteissa. Työssä selvitettiin erityisesti läpäisevien rakenteiden tukkeutuvuutta ja sen vaikutusta rakenteen toimintakykyyn. Lisäksi läpäiseviä rakenteita tarkasteltiin suunnittelun ja kunnossapidon kannalta. Työ toteutettiin perehtymällä aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen ja julkaisuihin, sekä toteuttamalla haastatteluita Oulun, Espoon ja Vantaan hulevesistä vastaaville työntekijöille. Haastatteluiden painopiste oli kaavoituksessa, suunnittelussa sekä käytössä ja kunnossapidossa.

Läpäisevistä päällysteistä yleisimpiä ovat avoin asfaltti, läpäisevä betoni sekä läpäisevät päällystekivet ja -laatat. Päällysteiden tukkeutumista tapahtuu varsinkin silloin, kun päällysteen päälle joutuu hienojakoista sedimenttiä. Pohjoisissa olosuhteissa tukkeutumista aiheuttaa etenkin hienojakoisen hiekoitushiekan käyttö. Haastateltavissa kunnissa läpäisevät päällysteet eivät olleet yleisesti käytössä hulevesien hallinnassa vaan käyttö kohdistui urheilukenttiin. Haastattelujen perusteella kunnissa ei ole riittävästi tietoa läpäisevistä päällysteistä ja niiden toimivuudesta pohjoisissa olosuhteissa. Haastatteluissa kuitenkin selvisi, että kunnilla olisi kiinnostusta käyttää läpäiseviä päällysteitä, mikäli niiden toimivuudesta saataisiin lisää tietoa.

Diplomityön tuloksien perusteella läpäisevät päällysteet voisivat olla toimiva vaihtoehto hulevesien hallintaan pohjoisissa olosuhteissa. Kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltujen tutkimusten perusteella tukkeutumisriskiä pystytään vähentämään päällysteen oikeaoppisella käytöllä, joka tarkoittaa esimerkiksi sopivan hiekoitushiekan käyttöä. Läpäiseviä päällysteiden käyttöikää saadaan pidennettyä, kun päällystettä huolletaan säännöllisesti ja huoltotoimenpiteet valitaan rakenteeseen sopivaksi. Läpäisevien päällysteiden käyttöä Suomessa voisi lisätä pilottikohteilla, joilla havainnollistettaisiin päällysteen toimivuutta Suomessa.

Asiasanat: läpäisevä rakenne, hulevesi, tukkeutuminen

ABSTRACT

Clogging of permeable surfaces in cold region stormwater management

Johanna Sirviö

University of Oulu, Degree Programme of Civil and Construction Engineering

Master's thesis 2021, 78 pp. + 1 Appendix

Supervisor at the university: PhD (Tech) Pekka Rossi

The aim of this thesis was to find out whether permeable structures would be a suitable alternative to stormwater management in northern conditions. Especially clogging of permeable surfaces and its effect on the functional capacity of the structure were considered in the thesis. In addition, permeable surfaces were considered from the point of view of design and maintenance. The thesis was carried out with literature review concerning the subject, and by executing interviews to city staff of Oulu, Espoo and Vantaa. The focus of the interviews was especially on the land use planning, designing, operation and maintenance.

The most common surface layers and surface layer materials are porous asphalt, pervious concrete and permeable interlocking concrete pavement, and permeable natural stone pavement. Clogging of the pavements occur especially when fine sediment gets into the pavement. In northern conditions, clogging is caused in particular by the use of fine-grained sand for slippery control. Permeable surfaces in the interviewed municipalities were not commonly used in stormwater management but were targeted at sports fields. According to the interviews, the municipalities do not have enough information about permeable surfaces and their functionality in northern conditions. However, the interviews revealed that municipalities would be interested in using permeable surfaces if more information was available on their functionality.

Based on the results of the thesis, permeable coatings could be a viable alternative to stormwater management in northern conditions. Based on the studies reviewed in the literature review, the risk of clogging can be reduced by the correct use of the surface, which means, for example, the use of slippery control sand. The service life of permeable surfaces can be extended by regular maintenance of the surface and selection of maintenance measures to suit the structure. The use of permeable surfaces in Finland

could be increased by a pilot projects to illustrate the functionality of the coating in Finland.

Keywords: permeable surface, stormwater, clogging

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty FCG Finnish Consulting Group Oy:lle tammikuun ja kesäkuun välisenä aikana 2021. Työn tavoitteena oli tutkia läpäisevien päällysteiden tukkeutumista pohjoisissa olosuhteissa.

Kiitän FCG Finnish Consulting Group Oy:tä mahdollisuudesta tutkia tätä mielenkiintoista aihetta. Työn ohjaajina ovat toimineet Pekka Rossi ja Kari Koivisto. Haluan kiittää heitä työhön liittyvistä rakentavista kommentteista ja hyvästä ohjauksesta. Kiitos haastatteluihin osallistuneille ajasta ja vaivannäöstä. Lisäksi haluan kiittää Maa- ja vesitekniikan tuki ry:tä diplomityöhön myönnetystä apurahasta.

Opinnot ovat vaatineet runsaasti aikaa ja hermoja. Kiitän puolisoani Rikua tuesta ja kärsivällisyydestä opintojen sekä diplomityön aikana. Kiitos opiskelukavereille yhteisistä opiskeluvuosista sekä yhteistyöstä kursseilla.

Oulu, 7.6.2021

Johanna Sirviö
Johanna Sirviö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	8
2 HULEVESIEN HALLINTA LÄPÄISEVILLÄ PÄÄLLYSTEILLÄ	10
2.1 Hulevesien hallinta	10
2.1.1 Muodostuminen	10
2.1.2 Hallinta	11
2.1.3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset	12
2.2 Kylmä ilmasto	13
2.2.1 Lumi	13
2.3 Lämpäisevien päällysteiden tyypit ja rakenne	14
2.4 Pintamateriaalit	16
2.4.1 Päällystekivet ja -laatat	18
2.4.2 Avoin asfaltti	23
2.4.3 Lämpäisevä betoni	25
2.4.4 Muita vaihtoehtoja	30
2.5 Rakennekerrosten materiaalit	31
2.6 Täydentävät materiaalit	33
3 LÄPÄISEVIEN PÄÄLLYSTEIDEN TUKKEUTUVUUS- JA KUNNOSSAPITOTUTKIMUKSET	37
3.1 Päällystekivet ja -laatat	40
3.2 Avoin asfaltti	46
3.3 Lämpäisevä betoni	50
4 HAASTATTELUTUTKIMUS – TILANNE VALIKOIDUISSA KUNNISSA	59
5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	60
5.1 Kaavoitus	60
5.2 Suunnittelu	61
5.3 Käyttö ja kunnossapito	64
5.4 Mahdollisuuksia edistää lämpäisevien rakenteiden käyttöä kunnissa	65
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	66
7 YHTEENVETO	69
LÄHDELUETTELO	72

LIITTEET:

Liite 1. Haastattelukysymykset

1 JOHDANTO

Hulevedellä tarkoitetaan maan pinnalta, rakennuksen katolta tai muilta vastaavilta pinnoilta pois johdettavaa sade- tai sulamisvettä. Hulevesien muodostumisessa yksi olennaisimmista tekijöistä on läpäisemättömän pinnan määrä, koska mitä enemmän alueella on läpäisemätöntä pintaa, sitä enemmän pintavaluntaa muodostuu. Taajamissa sadanta on jopa 5-10 % suurempaa kuin luonnontilaisessa ympäristössä. Samaan aikaan haihdunta on luonnontilaista pienempää. (Suomen Kuntaliitto 2012)

Hydrologiset tekijät huomioon ottavalla kaupunkisuunnittelulla on mahdollista ehkäistä kaupungistumisen aiheuttamia hydrologisia muutoksia ja niiden aiheuttamia vesistövaikutuksia. Luonnolliset hydrologiset olosuhteet pitäisi pyrkiä säilyttämään mahdollisimman hyvin ja rakentaminen kohdistaa alueille, joissa hydrologiset vaikutukset ovat pienempiä. Huleveden muodostumista saadaan pienennettyä minimoimalla päällystetyn ja vettä läpäisemättömän pinnan määrää sekä käsittelemällä muodostuneet hulevedet luonnonmukaisilla johtamis-, viivyttämisen- ja laskeutusmenetelmillä. Luonnonmukaisilla menetelmillä voidaan huleveden vähentämisen lisäksi tasata virtaamavaihteluita ja parantaa veden laatua sekä ylläpitää pohja- ja pintavesivarastoja ja maan kosteustasapainoa. Lisäksi asuin ympäristö saadaan viihtyisämmäksi. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi läpäisevät pinnoitteet, avo-ojat ja kasvillisuuspainanteet. (Vakkilainen ym. 2005)

Läpäisevien päällysterakenteiden pintakerros on vettä läpäisevää ja sen alapuolella on karkeasta kiviaineksesta tehty rakennekerros. Hulevesi varastoituu hetkeksi rakennekerrokseen, josta se imeytyy maaperään tai johdetaan eteenpäin salaojilla. Vettä läpäisevät päällysteet luokitellaan pintamateriaalista riippuen huokoisiksi tai läpäiseviksi ja ne voivat olla joko yhtä kappaletta olevia tai koostua toisiinsa liitettävistä kappaleista. Vesi läpäisee huokoisen materiaalin kauttaaltaan. Läpäisevät päällysteet sen sijaan koostuvat kivistä tai laatoista, joiden välissä oleva kiviaines päästää veden lävitseen. Laattoina voidaan käyttää myös huokoista materiaalia, jolloin vesi läpäisee päällysteen kauttaaltaan. (Kling ym. 2015)

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, minkälainen vaihtoehto läpäisevät päällysteet ovat osana hulevesien hallintaa pohjoisissa olosuhteissa. Erityisesti tavoitteena oli selvittää, miten tukkeutuminen vaikuttaa päällysteen toimintaan. Työssä ei tarkastella nurmialueita tai muita viheralueiden läpäiseviä rakenteita ja työ keskittyy tyypillisesti tiiviiden pintamateriaalien tilalla käytettäviin vettä läpäiseviin materiaaleihin. Kyseinen aihe valikoitui diplomityön aiheeksi, sillä läpäisemättömän pinnan määrä kasvaa kaupungistumisen seurauksesta ja hulevesien hallintaan tarvitaan uusia ratkaisuja. Myös ilmastonmuutos lisää painetta kehittää kuntien hulevesien hallintaa, koska sademäärien ennustetaan tulevaisuudessa kasvavan ilmastonmuutoksen seurauksesta.

Tässä diplomityössä käsiteltiin erityisesti avointa asfalttia, läpäisevää betonia sekä läpäiseviä päällystekiviä ja -laattoja. Työ toteutettiin perehtymällä aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen ja julkaisuihin, sekä toteuttamalla haastatteluita kolmeen eri kuntaan Suomessa. Haastatteluiden tarkoituksena oli selvittää läpäisevien päällysteiden käyttöä tällä hetkellä Suomessa. Haastatteluissa keskityttiin kolmeen teemaan: kaavoitus, suunnittelu sekä käyttö ja kunnossapito.

2 HULEVESIEN HALLINTA LÄPÄISEVILLÄ PÄÄLLYSTEILLÄ

Rakennetulla alueella maan pinnalle tai muille vastaaville pinnoille kertyvä sade- ja sulamisvesi on hulevettä. Huleveden määrään vaikuttavat useat tekijät, kuten sateen intensiteetti ja kesto, sadetapahtumaa edeltävän kuivan ajan pituus, maanpinnan kaltevuus ja maaperän ominaisuudet. Olennaisin tekijä hulevesivalunnan muodostumiseen on läpäisemättömän pinnan osuus, koska mitä enemmän alueella on läpäisemätöntä pintaa, sitä nopeammin ja runsaammin hulevedet muodostavat pintavaluntaa. Myös ilmastonmuutos lisää hulevesien määrää, mutta ensisijainen hulevesien lisääntymiseen ja taajamatulviin vaikuttava tekijä on rakentamisen aiheuttama valuntaolojen muutos. (Suomen Kuntaliitto 2012)

2.1 Hulevesien hallinta

2.1.1 Muodostuminen

Veden kiertokulku jaetaan neljään osaan: sadantaan, valuntaan, haihduntaan ja infiltraatioon eli suotautumiseen maaperään. Luonnollisen kiertokulun mukaan huomattava osa sadannasta imeytyisi maaperään pohjavedeksi ja virtaisi hitaasti kohti vesistöjä ja merta, jonka lisäksi osa vedestä valuisi pintavaluntana vesistöihin ja edelleen mereen. Merestä osa vedestä haihtuisi ilmakehään. Taajamissa kaikki hydrologisen kierron komponentit poikkeavat luonnontilaisesta kierrosta. Sadanta on jopa 5-10 % suurempaa ja haihdunta luonnontilaista pienempää. Luonnonoloissa vallitsee kaikissa maalajeissa yhteys pinta- ja pohjavesien välillä, mutta taajamissa tämä yhteys on poikki läpäisemättömien pintojen takia. Hulevesien käyttäytymistä ohjaa hydrologinen mitoittaminen. Se on tärkeää läpäiseviä päällysteitä ja muita imeytys- ja viivytyrakenteita suunnitellessa. Suunnittelussa ja mitoituksessa tulee huomioida erityisesti sadanta, haihdunta, pintavalunta, ylivuoto, kuivatus ja imeytyminen maaperään. (Suomen Kuntaliitto 2012; Kling ym. 2015)

Sadanta tarkoittaa tietylle alueelle tietynä aikana satanutta vesimäärää. Sadannan määrä on taajamissa suurempi kuin luonnontilaisessa ympäristössä. Tämä johtuu

tiivistymisytimien runsaudesta ilmakehässä, korkeiden rakennusten vaikutuksesta tuulikenttään sekä paikallisesti voimistuneesta konvektiosta. (Suomen Kuntaliitto 2012)

Haihdunta muodostuu kolmesta osatekijästä, joita ovat transpiraatio, evaporaatio ja interseptio. Transpiraatio tarkoittaa kasvien elintoimintoihin liittyvää haihduntaa, evaporaatio haihduntaa maan, veden tai lumen pinnasta ja interseptiohaihdunta kasvien pinnoille pidättyneen veden haihtumista. Taajamissa haihdunta on suhteellisen vähäistä, koska kasvillisuuden määrä on vähäistä ja näin ollen transpiraatio- ja interseptiohaihdunnan määrä vähenee. Toisaalta päällystettyjen pintojen määrä taajamissa on suuri. Päällystetyiltä pinnoilta pyritään johtamaan vesi nopeasti pois, joten evaporaatiohaihtumista ehtii tapahtua vain vähän. (Suomen Kuntaliitto 2012; Vakkilainen ym. 2005)

Pintavalunta muodostuu sitä tehokkaammin, mitä enemmän alueella on päällystettyjä ja vettä läpäisemättömiä pintoja. Pintavalunnan ajalliset vaihtelut ovat suurempia rakennetuilla kuin rakentamattomilla alueilla. Pintavalunnan osuus kokonaisvalunnasta on luonnonoloissa yleensä vähäinen, vaikka sataisikin rankasti. Tiiviisti rakennetuissa taajamissa voi kuitenkin jo pienten sateiden aikaan muodostua paljon pintavaluntaa. (Vakkilainen ym. 2005; Suomen Kuntaliitto 2012)

2.1.2 Hallinta

Hulevesien hallinta tarkoittaa kokonaisvaltaista ratkaisua, jonka avulla rakennettujen alueiden hydrologista kiertoa ja valunnan laatua pyritään parantamaan rakentamista edeltävälle tasolle. Hulevesien hallinnalla pyritään taajamien kuivatukseen ja taajamatulvien torjuntaan, pohja- ja pintavesien suojeleluun sekä myötävaikuttamiseen vesien hyvän tilan saavuttamiseksi. Taajamarakentaminen ei saisi lisätä ylivirtaamia ja tulvia, mutta ei myöskään pienentää alivirtaamia. Hulevesien hallinnalla tulisi luoda edellytykset taajamavesien virtaamien tasoittamiselle muun muassa hulevesiä imeyttämällä. Jotta hyviä tuloksia olisi mahdollista saavuttaa, tulee toteuttaa riittävän laaja-alaista, usein valuma-aluelähtöistä, tarkastelua sekä toimenpiteitä tulisi ulottaa hulevesien syntypaikoilta lopullisiin purkupisteisiin saakka. Hulevesien hallinnassa ensisijaisen tärkeää on tehdä toimenpiteitä hulevesien syntypaikassa, jotta hulevesien

muodostuminen ja niihin kohdistuva laatuhaitta saadaan ehkäistyä. (Suomen Kuntaliitto 2012)

Enimmäkseen hulevedet päätyvät hulevesiviemäriin, mutta viemäröinnin rinnalle on kehitetty erilaisia toimintatapoja ja rakenteellisia ratkaisuja, jotka noudattavat luonnonmukaisen hulevesien hallinnan periaatteita. Hulevesien muodostumista tai niiden aiheuttamia tulva- ja ympäristöhaittoja ehkäiseviä toimintatapoja voivat olla esimerkiksi maankäytön suunnittelu siten, että liikennealueiden läpäisemättömän pinnan määrä on mahdollisimman vähäinen. Luonnonmukaiset hulevesien hallintamenetelmät voidaan jakaa toimintaperiaatteensa perusteella hulevesien vähentämiseen, käsittelyyn, viivyttämiseen ja johtamiseen. Luonnonmukaisilla menetelmillä saadaan hulevesien määrän vähentämisen lisäksi tasattua virtaamavaihteluja ja parannettua veden laatua. Lisäksi maan kosteustasapainoa ja pohjavesi- ja pintavesivarastoja saadaan hyvin ylläpidettyä. Menetelmät ovat kokonsa ja sijoittumisensa perusteella joko alueellisia tai paikallisia (tontti- tai korttelikohtaisia) menetelmiä. Paikallisilla menetelmillä pyritään useimmiten vähentämään hulevesien määrää, tasaamaan huleveden virtaamia ja poistamaan huleveden mukana kulkeutuvia epäpuhtauksia mahdollisimman lähellä huleveden syntypaikkaa. Alueellisilla menetelmillä sen sijaan pyritään vähentämään ja tasoittamaan huleveden aiheuttamaa tulvariskiä. Hulevesien hallinnassa toteutetaan yleensä useampaa periaatetta yhtä aikaa. (Suomen Kuntaliitto 2012; Vakkilainen ym. 2005)

2.1.3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset

Ilmastonmuutoksen aiheuttamien muutosten arvioidaan lisääntyvän olennaisesti vuosisadan loppupuolelle edettäessä. Pohjois-Suomea lukuun ottamatta Suomen sisävesissä virtaamien, valunnan ja vedenkorkeuksien vuodenaikainen jakauma muuttuu huomattavasti. Etelä-Suomessa ilmastonmuutoksen ennustetaan muun muassa keskilämpötilan nousuna ja pienenevän lumipeitteen paksuutena. Rankkasateiden voimakkuuden ennustetaan lisääntyvän Etelä-Suomessa sadassa vuodessa 10-30 % ja kesäsateilla jopa 40 %. Keskimääräisen valunnan lisääntyminen selittyy sillä, että talviaikainen valunta kasvaa merkittävästi lumen sulamisen ja vesisateiden lisääntymisen myötä. Kesäisin yksittäisten sateiden rankkuus lisääntyy, mutta sadesumma

todennäköisesti pienenee. Etelä-Suomessa arvioidaan siis talviaikaisten tulvien lisääntyvän, kevättulvien pienenevän ja kesäisin purotulvien lisääntyvän. Virtaaman sekä vesiuomien kohdistuvan eroosion ja haitallisten aineiden kulkeutumisen ennustetaan lisääntyvän valunnan lisääntyessä. Pohjois-Suomessa lumisateiden ennustetaan pysyvän ennallaan tai lisääntyvän, joten kevättulvat ovat yleisiä jatkossakin. (Vantaan kaupunki 2009; Vienonen ym. 2012)

2.2 Kylmä ilmasto

2.2.1 Lumi

Kylmässä ilmastossa lumella on suuri merkitys hydrologisessa kierrossa. Lumen sulaminen ja sulantakauden sadanta aiheuttavat kevätvaluntaa, joka on Suomessa keskimäärin 100-180 millimetriä eli noin 40-60 % vuosivalunnasta. Talvivalunta tarkoittaa pysyvän lumipeitteen aikana syntyvää valuntaa. Suomessa talvivalunnan keskimääräinen suuruus on alle 50 millimetriä. Lumiolosuhteet vaihtelevat kaupunkivaluma-alueilla suuresti johtuen erilaisista lumenkäsittelytavoista. Joiltain alueilta lumi poistetaan kokonaan ja siirretään toiseen paikkaan tai lumi siirretään kokonaan pois valuma-alueelta. Periaatteena voidaan pitää sitä, että ihmistoimet, kuten auraus ja läjitys, vaikuttavat lumioloihin sitä enemmän, mitä kaupungistuneempi valuma-alue on. Lumi, joka on säilynyt kaupungissa koskemattomana, on tiheydeltään ja heijastuskyvyltään hyvin samankaltaista kuin lumi maaseudulla. Sen sijaan kaupunkialueelle auratuissa lumikasoissa lumen ominaisuudet vaihtelevat suuresti. (Hyvärinen & Puupponen 1986; Kotola & Nurminen 2003; Kotola & Nurminen 2005)

Hulevesijärjestelmälle aiheutuu jäätyamisen seurauksesta monenlaisia ongelmia. Liian matalalle rakennetut sadevesiputket voivat jäätyä ja myös kattojen vedenpoistojärjestelmät voivat jäätyä. Puroihin, lampiin ja kosteikkoihin muodostuva jääpeite aiheuttaa omanlaisiaan ongelmia. Jääpeitteen seurauksesta seuraavan sade- tai sulamistilanteen aikana vesi voi virrata jään päälle ja muodostaa näin paannejäätä. Ritiläkaivot tukkeutuvat helposti jäästä ja sohjosta. (Suomen Kuntaliitto 2012)

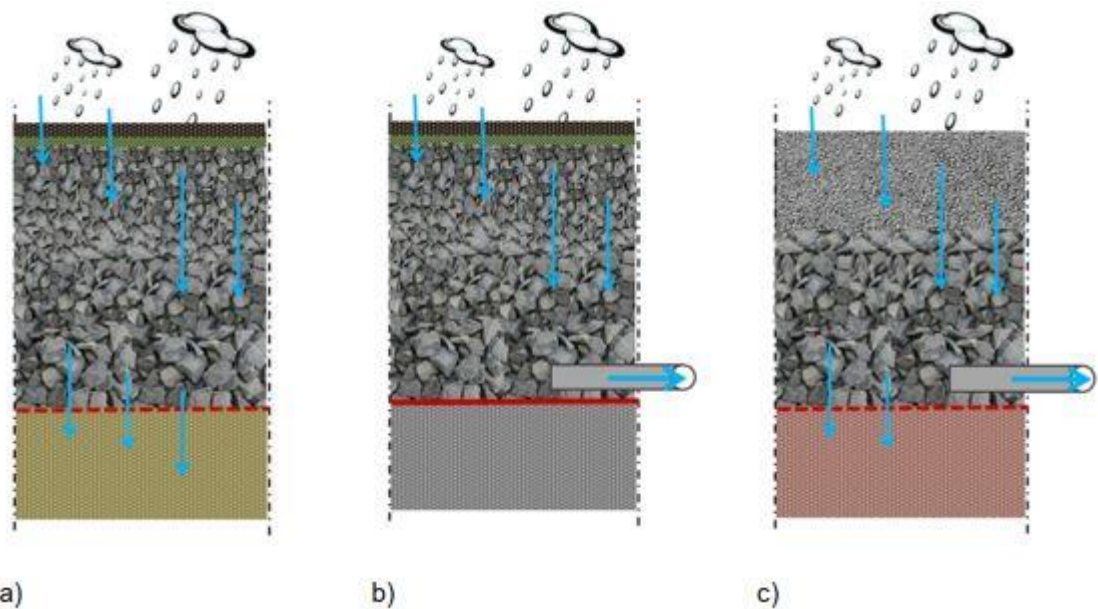
2.3 Lämpäisevien päällysteiden tyypit ja rakenne

Lämpäisevät päällysteet kuuluvat hulevesien hallinnassa menetelmiin, joilla pyritään vähentämään hulevesien määrää, joka tarkoittaa hulevesien muodostumisen ehkäisyä sekä muodostuneiden hulevesien määrän pienentämistä. Menetelmät voivat olla ei-rakenteellisia, kuten ohjeistuksia tai rakenteellisia, kuten lämpäisevät päällysteet. Hulevesien vähentäminen on tärkein osa hulevesien hallintaa, koska vain siten hydrologista kiertoa voidaan ennallistaa rakentamista edeltänyttä tilannetta vastaavaksi. Lämpäisevien päällysteiden avulla pystytään myös lisäämään maa- ja pohjaveden muodostumista. (Suomen Kuntaliitto 2012)

Lämpäisevien päällysteiden peruseräite on, että vesi lämpäisee pintakerroksen, jonka jälkeen hulevesi varastoituu hetkellisesti karkean kiviaineksen huokostilaan, josta se imeytyy joko ympäröivään maaperään tai se johdetaan eteenpäin salaojilla (Suomen Kuntaliitto 2012). Vettä lämpäisevät päällysteet voidaan jakaa kolmeen eri järjestelmään veden imeyttämisen tai johtamisen perusteella (Kling ym. 2015). Avoimessa järjestelmässä vesi imeytetään kokonaan maaperään. Tätä järjestelmää kutsutaan myös nimellä nollavirtaus (zero discharge), koska vettä ei tarvitse johtaa eteenpäin käsiteltäväksi, jolloin ei ole tarvetta muun muassa putkille ja saadaan aikaiseksi kustannussäästöjä (Interpave 2018).

Päinvastainen tilanne on suljetussa järjestelmässä, jonka alapuoli on suljettu vettä lämpäisemättömällä pinnalla, kuten georisteellä ja vesi johdetaan muualle esimerkiksi salaojia pitkin (Kling ym. 2015). Suljettua järjestelmää voidaan käyttää esimerkiksi silloin, kun pohjamaa on heikosti vettä lämpäisevää tai sillä on matala lujuus. Jos alueen pohjamaa on saastunut, suljetun järjestelmän käyttö on erityisen suositeltavaa, koska se estää saasteiden huuhtoutumisen syvemmälle ja estää pohjaveden saastumista. Sen käyttö voi olla perusteltua myös tilanteissa, joissa alueella on vedenottoa tai pohjaveden pinta on lähellä suunnitellun rakenteen pohjaa. Vettä voidaan varastoida katualueella esimerkiksi kantavassa ja jakavassa kerroksessa, josta se johdetaan putkia pitkin eteenpäin. Suljettua järjestelmää voidaan hyödyntää myös viivytyalueena ja kerättyä vettä voidaan puhdistamisen jälkeen hyödyntää esimerkiksi vessojen huuhteluvetenä. (Interpave 2018)

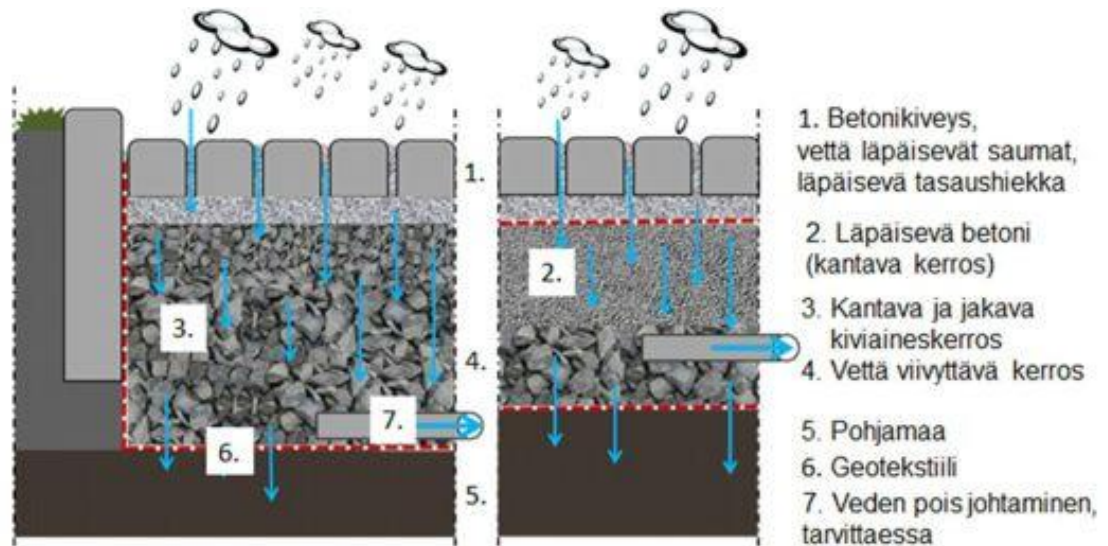
Kolmantena vaihtoehtona on kahden edellisen yhdistelmä, jossa osa vedestä imeytetään maahan ja osa johdetaan muualle. Tämä voi tulla kyseeseen tilanteessa, jossa pohjamaa pystyy imeyttämään vain osan vedestä, jolloin osa vedestä täytyy johtaa pois muilla keinoilla. Putket varmistavat, että vesi ei jää seisomaan pohjamaan päälle ja pohjamaa ei pehmene. Sekä avoimessa että puoliläpäisevässä vaihtoehdossa pohjaveden tason pitää olla vähintään 1000 millimetrin päässä läpäisevän rakennekerroksen pohjasta. Tällä tavoin mahdollistetaan haitta-aineiden suodattuminen maaperään rakennekerrosten alla. Lisäksi saadaan estettyä pohjaveden nousua liian ylös, joka saattaisi vähentää rakennekerroksissa olevaa tyhjätilaa, johon päällysteen läpi suodattuva vesi varastoituisi hetkeksi. (Interpave 2018) Kuvassa 1 on esitetty nämä erilaiset rakenteet.



Kuva 1. a) Avoin järjestelmä b) Suljettu järjestelmä c) Yhdistetty järjestelmä (Kling ym. 2015).

Vettä läpäisevät päällysteet muodostuvat yleensä pintakerroksesta ja alapuolisesta rakennekerroksesta, joka koostuu kiviaineksesta sekä pohjalla olevasta suodatinkerroksesta tai -kankaasta. Olemassa on myös erilaisia muunnelmia, joissa voi olla esimerkiksi erilaisia läpäiseviä materiaaleja. Putkirakenteita, säiliöitä ja muita systeemejä voidaan lisätä rakenteeseen erityisesti silloin, kun pohjamaa on vettä läpäisemätöntä. Suunnittelussa tulee varautua poikkeustilanteisiin ja varmistua syntyvän

pintavalunnan halitusta pois johtamisesta. Tulvareitti voi mennä pintoja pitkin tai ylivuodolle voi olla järjestetty myös maanalainen putkitus. Kuvassa 2 on esitetty läpäisevän päällysteen rakennekerroksia. (Kling ym. 2015; Suomen Kuntaliitto 2012)



Kuva 2. Vettä läpäisevän päällysteen rakennekerrokset (Kling ym. 2015).

2.4 Pintamateriaalit

Taulukko 1. Pintamateriaalien ominaisuuksia (Kling ym. 2015).

Päällyste	Vedenläpäisevyys puhtaana [10^{-3} m/s]	Vedenläpäisevyys tukkeutuneena (noin 7 vuoden käytön jälkeen) [10^{-3} m/s]	Puristuslujuus [MPa]
Päällystekivet ja -laatat, joissa on vettä läpäisevät saumat	1,1-14	0,015-0,5	-
Avoin asfaltti	0,1-3,5	0,004-0,01	-
Läpäisevä betoni	0,5-12	0,007-0,2	3,5-28 (Tyypillinen vaatimus kantavana pintana 17)

Kuosan ym. (2013a) mukaan yksi pintamateriaalien luokitteluperuste on luokitella pintamateriaali huokoiseksi tai läpäiseväksi. Huokoinen pintamateriaali tarkoittaa

rakennetta, jossa vesi läpäisee koko pinta-alan. Läpäisevät päällysteet tarkoittavat rakennetta, joka koostuu yleensä vettä läpäisemättömistä kivistä tai laatoista, joiden välissä on kiviainesta, joka päästää veden lävitseen. Pintamateriaalit voivat siis olla monoliittisia (yhtä kappaletta olevia) tai modulaarisia (toisiinsa liitettävistä kappaleista koostuvia). (Kuosa ym. 2013a)

Yleisimpiä pintoja tai pintamateriaaleja läpäiseville päällysteille ovat päällystekivistä tai -laatoista tehdyt pinnat, joiden saumat sekä täyttömateriaali mahdollistavat veden pääsyn alapuolisiin rakenteisiin. Myös avoin asfaltti ja läpäisevä betoni ovat yleisesti käytössä läpäisevinä pintoina. Käytössä on lisäksi erilaisia vettä läpäiseviä erikoismateriaaleja, joita voidaan käyttää esimerkiksi päällystekivien tai -laattojen materiaalina tai saumamateriaalina. On myös mahdollista käyttää muovi- tai muita kennostoja, jotka kytketään toisiinsa kiinni ja täytetään kiviaineksella tai nurmetetaan (Kuosa ym. 2013a; Suomen Kuntaliitto 2012).

Pintamateriaalin valinnassa tulee kiinnittää huomiota tyhjätilaan ja avoimeen huokoisuuteen, koska ne vaikuttavat vedenläpäisevyyteen. Pintakerroksen tarkoituksena on päästää vesi läpi eikä sillä pyritä viivyttämään vettä. Näin ollen pintakerrosta ei sisällytetä mitoitettavaan veden viivytykskapasiteettiin. (Kling ym. 2015)

Läpäisevät pintamateriaalit ovat tarpeen etenkin kohteissa, joissa on ongelmia hulevesien määrällisen tai laadullisen hallinnan suhteen. Läpäiseville päällysteille voi olla myös paikallisia käyttötarkoituksia esimerkiksi tilanteissa, joissa pohjavedet imeytyvät hitaasti tai vesiä halutaan kerätä viheralueiden käyttöön poisjohtamisen sijasta. Läpäisevillä päällysteillä voidaan torjua ilmastonmuutoksen vaikutuksia esimerkiksi siten, että läpäisevät päällysteet vähentävät lämpösaarekeilmiötä kaupunkiympäristössä. Lämpösaarekeilmiö tapahtuu kaupunkialueilla, joissa on paljon tummia pintoja, joka johtaa paikallisen lämpötilan nousemiseen. Läpäisevien päällysteiden vaaleampi väri vähentää lämpösaarekeilmiöt. (Wahlgren & Kling 2013; Henderson 2012)

Vettä läpäisevien päällysteiden keskeisimpiä käyttökohteita ovat alimpien katuluokkien kadut, kevyen liikenteen väylät, pysäköintialueet, välialueet, peli-, urheilu- ja liikunta-alueet, pihat, torit ja kentät sekä yhdistetyt alueet. Vähäliikenteiset alueet ovat sopivimpia

käyttökohteita läpäiseville päällysteille, koska läpäisevät pintamateriaalit kestävät tavallista vähemmän kulutusta. Nastarenkaiden ja muun suuremman kuormituksen kuluttava vaikutus tulee ottaa huomioon, jos läpäiseviä päällysteitä käytetään liikennöidyillä teillä ja kaduilla, joiden keskivuorokausiliikenne enintään 50...1000 ajoneuvoa päivässä. (Wahlgren & Kling 2013; Kling ym. 2015)

Läpäisevien päällysteiden käyttö ei ole suositeltavaa kohteissa, joissa on teollista toimintaa, raskasta liikennettä tai tienpinnan kulutus on muuten suuri. Läpäiseviä päällysteitä ei käytetä, mikäli tien tai kadun keskivuorokausiliikenne on yli 1000 autoa päivässä. Alueilla, joissa tukkeutumisen vaara on poikkeuksellisen suuri, ei tule käyttää läpäiseviä päällysteitä. Tällaisia alueita voivat olla esimerkiksi runsaasti hiekoitettavat kohteet tai alueet, joissa pintavalumavesien tiedetään sisältävän paljon hienoainesta. Tukkivan hienoaineksen määrää lisää nastarenkaiden käyttö. (Kling ym. 2015)

Hulevesien laatu tulee ottaa huomioon läpäisevien päällysteiden käytössä, koska esimerkiksi teollisuusalueille hulevedet voivat sisältää huomattavia määriä epäpuhtauksia. Lisäksi teollisuusalueilla on olemassa riski kemikaalipäästöille. Läpäiseviä päällysteitä ei tule käyttää tai käyttö on suunniteltava harkiten, jos hulevesien imeyttäminen aiheuttaa riskin pohjaveden tai maaperän pilaantumiseen. Avoimia rakenteita ei suositella raskaan liikenteen käyttämille pysäköinti- ja levähdysalueille, koska silloin on kohonnut riski öljypitoisten vesien pääntymiselle maaperään. Pohjavesialueilla läpäisevien rakenteiden käytön tulisi rajautua asuinkortteleihin, puhtaisiin kattovesiin ja kevyen liikenteen väyliin. Läpäiseviä rakenteita voidaan käyttää myös veden laadun parantamiseen. Kaikkien läpäisevien rakenteiden on havaittu pystyvän sitomaan tehokkaasti veteen suspensoitunutta hienoainesta, joka absorboi ja kuljettaa monia saasteita. Vedenpuhdistusominaisuuksilla on kuitenkin eroja erilaisten läpäisevien rakenteiden välillä. (Loimula & Kuosa 2013; Kling ym. 2015; Liikennevirasto 2018)

2.4.1 Päällystekivet ja -laatat

Päällystekivien ja -laattojen toiminta perustuu siihen, että saumakohtat päästävät veden kulkemaan alapuolisiin rakennekerroksiin, jolloin vesi ei jää päällysteen pinnalle

(Interpave 2018). Klingin ym. (2015) mukaan päällystekivet tai -laatat voidaan valmistaa betoni- tai luonnonkivestä. Kivetyksen alla on tasaava kerros. Saumojen, aukkojen ja tasaavan kerroksen materiaaleja valitessa tulee huomioida, että niiden rakeisuuden täytyy olla hyvin vettä läpäisevää. Joissain tilanteissa, esimerkiksi pohjamaan ollessa löyhää kitkamaata, tulee kiviaineksetkin tiivistää riittävän kantavuuden saavuttamiseksi. Hydrologisessa mitoituksessa ja suunnittelussa täytyy huomioida, että tiivistäminen pienentää veden läpäisevyyttä. Päällystekiviä ja -laattoja ei suositella käytettävän alueilla, joilla muodostuisi erittäin suuria lietekuormituksia, kuten sahanpurujen varastoinnista tai kierrätyskeskuksista. Ne eivät ole myöskään soveltuvia alueille, joissa on riski saastumiselle, kuten kemikaalien käsittelylaitoksilla (Interpave 2018).

Läpäisevien päällystekivien ja -laattojen käytöllä on useita hyötyjä. Ne tarjoavat rakenteellisesti hyvän päällysteen, joka pystyy suodattamaan tehokkaasti vettä samalla sitä puhdistaan, jolloin maankäyttö tehostuu. Läpäisevät päällystekivet ja -laatat ovat sopivia moniin käyttötarkoituksiin, kuten asutusalueilla. Läpäisevät päällystekivet ja -laatat auttavat myös kovien pintojen lähistöllä olevien viheralueiden ylläpitämisessä, koska vesi pääsee suodattumaan maaperään. Tämä myös säästää kustannuksia viheralueiden suhteen, koska erillistä kastelujärjestelmää ei tarvitse järjestää kuivemmilla seuduilla. (Interpave 2018)

Päällystekivillä ja -laatoilla on monia eri muotoja. Ne voidaan luokitella kolmeen eri ryhmään: lukittava muoto (interlocking shapes), suurentuneet läpäisevät saumat (enlarged permeable joints) ja huokoiset betonilaatat (porous concrete units). Lukittuvassa muodossa kivet tai laatat muodostavat aukkoja, jotka täytetään läpäisevällä materiaalilla. Samaan aikaan ne ovat kuitenkin sivuistaan tiukasti kiinni toisissaan. Tämä mahdollistaa muun muassa ajoneuvojen kulkemisen rakenteen päällä. Suurentuneiden läpäisevien saumojen kohdalla laatat tai kivet ovat toisistaan erillään ja saumat täytetään läpäisevällä materiaalilla. Saumat saadaan tehtyä suurilla välikappaleilla, jotka valetaan kivien tai laattojen sivuun. On myös mahdollista asentaa saumoihin muoviset välikappaleet. Huokoiset betonilaatat päästävät veden lävitseen. Laatat asetetaan lähelle toisiaan ja saumat täytetään läpäisevällä materiaalilla. Huokoiset betonilaatat soveltuvat vain kevyelle liikenteelle. Saumojen koko tavallisissa päällystekivissä ja -laatoissa on

yleensä 2-5 millimetriä, mutta läpäisevässä rakenteessa saumojen koko riippuu pitkälti käytettävistä kivistä tai laatoista. (Smith 2006; Interpave 2018)

Euroopassa ei ole yhdenmukaisia ohjeita läpäiseville betonikivipinnoille. Betonikiville ja -laatoille on yhdenmukaiset standardit, joilla esitetään raudoittamattomien, sementillä sidottujen betonisten päällystekivien ja -laattojen ja niitä täydentävien kappaleiden materiaalit, ominaisuudet, vaatimukset ja testausmenetelmät. Niitä voidaan osittain soveltaa läpäiseville betonikivipinnoille:

- SFS-EN 1338 + AC. Betoniset päällystekivet. Vaatimukset ja testausmenetelmät.
- SFS-EN 1339 + AC. Betoniset päällystelaatat. Vaatimukset ja testausmenetelmät.

Edeltävien eurooppalaisten tuotestandardien lisäksi Suomessa on muun muassa tuotestandardeja SFS-EN 1338 ja SFS-EN 1339 täydentävä kansallinen soveltamisstandardi, jossa esitetään suositus, mitkä ominaisuudet on ilmoitettava edeltävien tuotestandardien mukaan CE-merkityille päällystekivituotteille eri käyttökohteissa sekä niille ominaisuuksille asetetut vähimmäisvaatimustasot tai luokat:

- SFS 7017. Betonista tai luonnonkivestä tehdyille ulkotilojen päällystekiville, -laatoille ja reunakiville eri käyttökohteissa vaaditut ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot.

Sen sijaan luonnonkivipinnoille on yhdenmukaistetut standardit, joilla määritetään ulkotilojen päällystykseseen käytettävien luonnonkivisten noppa- ja nuppukivien sekä luonnonkivilaattojen toiminnalliset vaatimukset ja niiden testausmenetelmät sekä vaatimustenmukaisuuden arviointi ja merkintä. Näillä standardeilla käsitellään lisäksi tuotteiden ominaisuuksia, joilla on merkitystä niiden kaupalle:

- SFS-EN 1342. Ulkotilojen noppa- ja nupukivet. Vaatimukset ja testausmenetelmät.

- SFS-EN 1341. Ulkotilojen luonnonkivipäällystelaatat. Vaatimukset ja testausmenetelmät.

Kivet ja laatat ovat yleensä 80 millimetrin paksuisia ja tasaava kerros on korkeintaan 50 millimetrin paksuinen (Swan & Smith 2009). Saumojen on oltava täynnä kiviainesmateriaalia, jotta päällysteen rakenne säilyy ehyenä. Saumojen ja tasauserroksen materiaalien valinnassa täytyy huomioida monia asioita. Materiaalin täytyy olla sellaista, että vesi pystyy suodattumaan suoraan alas. Kiviainesrakeet eivät saa tunkeutua alla olevaan rakeisuudeltaan karkeampaan kiviaineskerrokseen, koska tämä voi aiheuttaa alemman kerroksen tukkeutumisen. Materiaalin täytyy olla riittävän hienoa, jotta kivien tai laattojen asennus onnistuu tarkasti ja sen täytyy kestää liikenteen aiheuttavat kuormitukset. Samalla täytyy kuitenkin myös huomioida se, että alemman kerroksen vedenläpäisevyyden tulee olla ylemmän kerroksen vedenläpäisevyyttä riittävästi suurempi. Edellä esitettyjen vaatimusten vastaavien kriteereiden täyttymistä voidaan tarkastella seuraavien ehtojen täyttymisen kautta) (Interpave 2018; Ferguson 2005, Kling ym. 2015 mukaan):

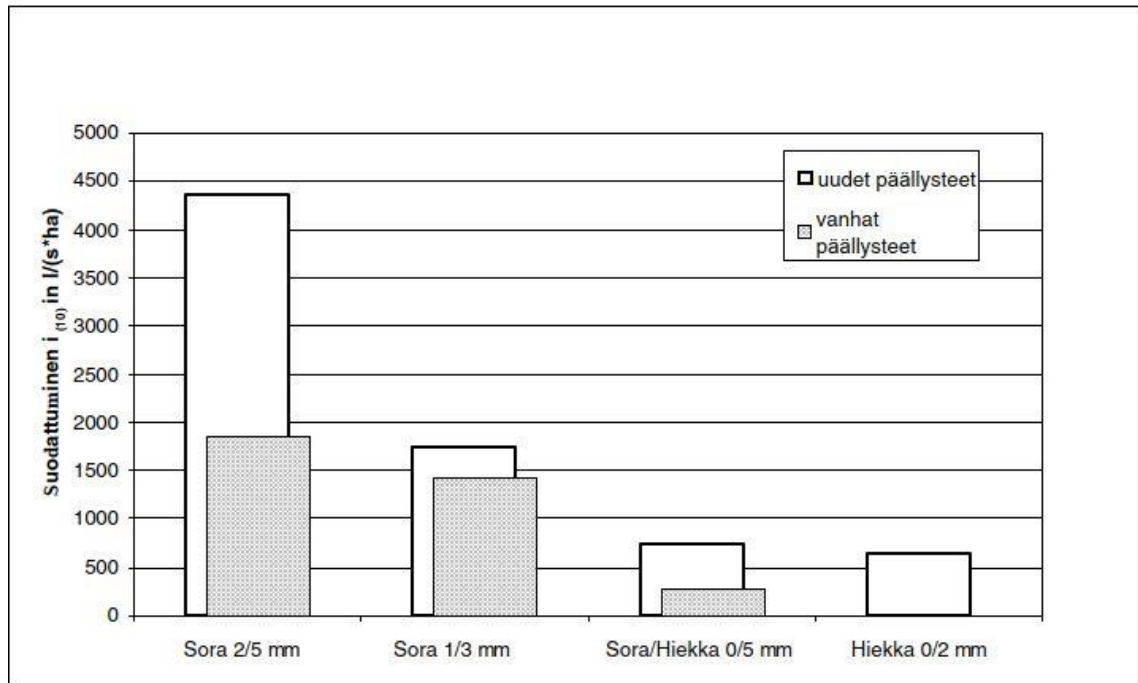
Kantavan kerroksen $D_{15} \geq 5 * \text{Tasaavan kerroksen } D_{15}$

Kantavan kerroksen $D_{50} \leq 25 * \text{Tasaavan kerroksen } D_{50}$

Kantavan kerroksen $D_{15} \leq 5 * \text{Tasaavan kerroksen } D_{85}$

, missä D_{xx} on läpäisyä xx (%) vastaava raekoko.

Borgwardt (2006) löysi yhteyden suodattumisen määrän ja saumojen kiviainesmateriaalin välillä. Kiviainekset, joissa on karkea partikkelikoko, suodattavat vettä paremmin kuin hienojakoiset täyteaineet. Huonoiten vesi suodattuu silloin, kun kiviaines on hiekkaa. Hiekka aiheuttaa lisäksi suuremman riskin läpäisevän rakenteen tukkeutumiselle (Kuosa ym. 2013a). Kuvassa 3 on esitetty testituloksia saumojen erilaisten kiviainesten vedenläpäisevyydestä. Tulosten perusteella karkearakeiset kiviainekset suodattavat vettä paremmin sekä uudessa että vanhassa päällysteessä (Borgwardt 2006).



Kuva 3. Erilaisten kiviainesten kyky suodattaa vettä. Y-akseli kuvaa kiviaineksen raekokoa, valkoinen pylväs uutta päällystettä ja harmaa pylväs vanhaa päällystettä (mukaiillen Borgwardt 2006).

Maaperään verrattuna päällystekivillä ja -laatoilla on huomattavasti suurempi kyky suodattaa vettä. Esimerkiksi hiekkamoreenin vedenläpäisevyys on noin 10^{-6} m/s (Ronkainen 2012). Läpäisevien päällystekivien saumoissa olevan kiviainesmateriaalin vedenläpäisevyys on parhaimmillaan yli 10^{-3} m/s, mutta ne eivät ole koko pinta-alalla, joten vedenläpäisevyydet eivät ole täysin verrattavissa toisiinsa. Tämän takia läpäisevät kivipinnat suodattavat vettä tehokkaasti alempiin rakennekerroksiin, vaikka avoimen kiviaineksen osuus kokonaispinta-alasta on pieni. Suodattumisen määrällä ja saumojen pinta-alalla on keskenään erittäin pieni korrelaatio. Todellista suodattumismäärää suhteessa vedenläpäisevyyteen ja saumojen pinta-alaan ei pystytä matemaattisesta osoittamaan. Tästä syystä saumojen pinta-alan sijaan tärkeämpää on valita suuresti vettä läpäisevä kiviaines saumoihin. (Smith 2006; Borgwardt 2006)

Päällystekivet ja -laatat suodattavat tehokkaasti vettä ja tällaiset pinnat eivät tarvitse toimiakseen kallistuksia. Maksimikaltevuus näille rakenteille on 5 %, jotta vesi ei valu päällysteen päältä suodattumatta rakenteeseen. Mikäli päällystettä suunnitellaan

kaltevalla pinnalle, täytyy päällysteen ja pohjamaan suhdetta tarkkailla. Jos rakennetta ei suunnitella tarkasti, vesi kerääntyy rakenteessa alimpaan pisteeseen ja tällöin läpäisevän päällysteen hyödyt jäävät käyttämättä. (Interpave 2018)

2.4.2 Avoin asfaltti

Avoin asfaltti luokitellaan huokoiseksi materiaaliksi eli vesi läpäisee kauttaaltaan asfaltin pinnan. Avoimen asfaltin huokoisuus on yleensä 15-20 % ja se vähentää lammikoitumista sekä tarvetta hulevesijärjestelmälle (Kuosa ym. 2013a). Avoimen asfaltin käytöllä on positiivisia vaikutuksia kitkaan sekä hydrologiseen kiertoon (Ferguson 2005, Kuosa ym. 2013a mukaan). Bendtsen ym. (2005) havaitsi avoimen asfaltin vähentävän melusaastetta, mikä on toivottava ominaisuus etenkin asuinalueilla sekä alueilla, joissa on vilkas liikenne. Melun väheneminen johtuu avoimessa asfaltissa olevista toisiinsa kytkeytyneistä ilmahuokosista (Alvarez ym. 2011). Sateen aikaan avoin asfaltti vähentää vesiliirron muodostumista, veden roiskumista sekä tien pinnasta tapahtuvaa valoheijastusta (Poulikakos ym. 2006).

Euroopassa on yhdenmukaiset tuotestandardit avoimelle asfaltille ja lisäksi Suomessa on Asfalttinormit-opas. Näissä kirjoissa määritetään lähinnä koostumukset avoimelle asfaltille:

- SFS-EN 13108-7. Bituminous mixtures. Material specifications. Part 7: Porous Asphalt.
- Asfalttinormit 2017

Avoin asfaltti muodostuu kiviaineksesta, sideaineesta sekä mahdollisesta lisäaineesta, kuten selluloosakuidusta tai luonnonasfaltista (PANK 2017). Kiviaines toimii asfalttimassan runkona (Ferguson 2005, Kuosa ym. 2013a mukaan). Kiviaines on yleensä puhdasta kiveä. Toisinaan voidaan myös käyttää murskattua tai jyrsettynyttä asfalttia. Asfalttirouheen käytössä tulee huomioida sen valmiiksi sisältämä sideaineen määrä, jotta osataan lisätä asfalttimassaan oikea määrä sideainetta. (PANK 2017)

Sideaine toimii asfalttipäällysteessä liimana eli se sitoo kiviainekset yhteen tehden päällysteestä viskoosisen ja joustavan (Ferguson 2005, Kuosa ym. 2013a mukaan).

PANK (2017) mukaan sideainepitoisuus avoimessa asfaltissa on noin 4,5-5,8 %. Sideainepitoisuus on Hansenin (2008) mukaan yleensä noin 5,75 %, kun kiviaineksen raekoko on 9,5 millimetriä. Toisaalta on myös olemassa tutkimustietoa, jonka perusteella sideaineen määrä voisi maksimissaan olla 5 %, jotta asfalttimassan huokoisuus ja läpäiseväisyys pysyvät riittävällä tasolla (Suresha ym. 2010, Kuosa ym. 2013a mukaan). Asfalttipäällysteiden sideaineet voivat olla bitumeja, polymeerimodifioituja bitumeja, bitumiliuoksia, fluksattuja bitumeja tai bitumiemulsioita. SFS-EN-tuotestandardeista on valittu Suomen olosuhteisiin soveltuvat sideaineiden laatuvaatimukset. Sideaineiden täytyy olla tasalaatuisia ja ne eivät saa sisältää epäpuhtauksia haitallisessa määrässä. Sideaineiden tiheydelle ei ole vaatimuksia. Sideaineiden tuotestandardit on harmonisoitu ja jokaisen markkinoille tulevan bitumituotteen täytyy olla CE-merkitty (PANK 2017).

Asfalttipäällysteessä olevilla lisäaineilla pyritään parantamaan päällysteen toiminnallisia ominaisuuksia tai saavuttamaan muutoin teknillistaloudellisesti edullisempi lopputulos. Kuituja, yleensä selluloosaa, käytetään bitumia sitovana lisäaineena. Tartukkeilla eli pinta-aktiivisilla aineilla parannetaan bitumisen sideaineen ja kiviaineksen välistä tartuntaa. Tartukkeina käytetään yleensä rasvahappopohjaisia diamiineja. Mikäli asfalttipäällysteen säänkestävyyttä halutaan parantaa, käytetään lisäaineena sementtiä. Luonnonasfalttia, luonnossa esiintyvän bitumin ja mineraaliaineksen seosta, käytetään bitumin lisäaineena, kun halutaan lisätä päällysteen deformaatiokestävyyttä. Muita lisäaineita voivat olla esimerkiksi kumi- tai muovirouheet, väriaineet tai sammutettu kalkki. (PANK 2017)

Tärkein ominaisuus avoimella asfaltilla on vedenläpäisevyys (Alvarez ym 2011). Muita tärkeitä ominaisuuksia ovat adheesio kiviaineksessa ja sideaineessa, kyky vastustaa pysyviä muodonmuutoksia, kulumista, luisumista ja väsymistä sekä kyky melun absorptiolle. Myös yleinen kestävyys muun muassa ikääntymistä ja kemikaaleja vastaan on tärkeää. Kiviaineksen määrä ja sideaineen koostumus vaikuttavat merkittävästi avoimen asfaltin ominaisuuksiin (SFS-EN 13108-7; Suresha ym. 2010, Kuosa ym. 2013a mukaan).

Huokoisuus toimii myös toiseen suuntaan vedenläpäisevyyden lisäksi. Huokoisuuden avulla vesi pystyy haihtumaan ilmaan vesikerroksista. Vedenläpäisevyyden ja

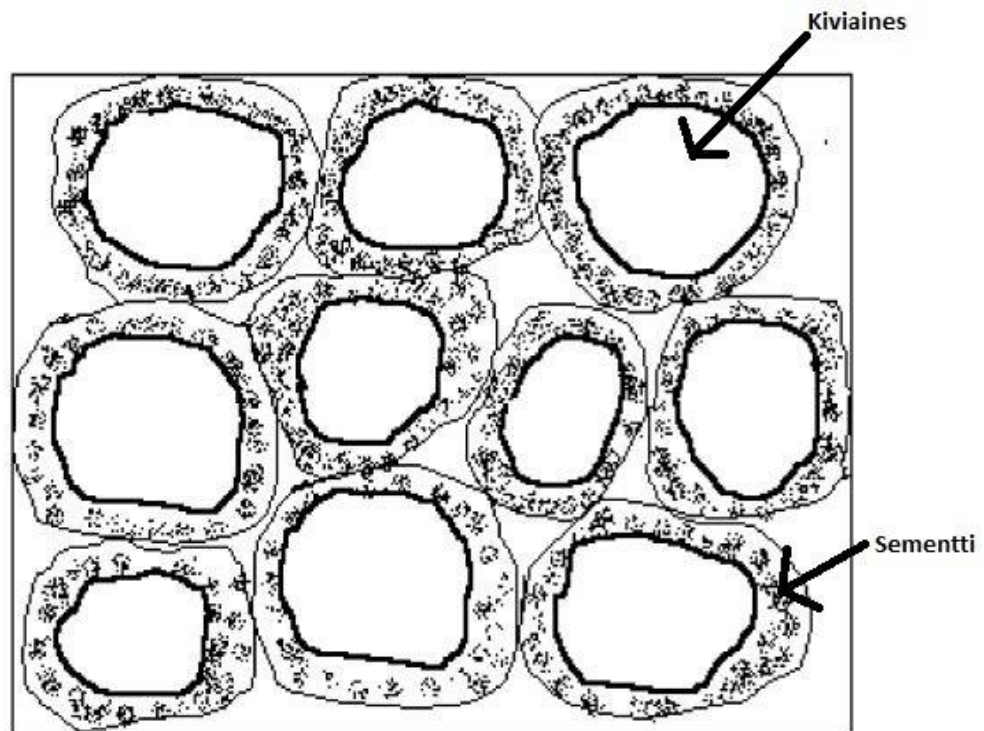
haihtumisen vaikutukset yleiseen hydrologiseen kiertoon ovat positiiviset ja tarvetta isoille hulevesijärjestelmille ei ole. Kun vesi saavuttaa huokoisen materiaalin, se virtaa alempiin kerroksiin tietyllä nopeudella. Tämä nopeus eli hydraulinen johtavuus, K , riippuu asfaltin rakenteesta, rakennustavasta sekä ylläpidosta. (Ferguson 2005, Kuosa ym. 2013a mukaan; Kuosa ym. 2013a)

Yleisenä suuntaviivana suunnitteluun ja aineiden annosteluun voidaan pitää sitä, että asfalttimassasta täytyisi tehdä samanaikaisesti riittävän läpäisevä sekä kulutusta kestävä (Suresha ym. 2010, Kuosa ym. 2013a mukaan). Läpäisevyyttä pystytään lisäämään käyttämällä karkeampaa kiviainesta ja vähemmän sideainetta kuin tavallisessa asfaltissa. Massassa olevat ilmahuokokset ovat verrattain isoja ja ne ovat kytkeytyneet toisiinsa hyvin. Suunnittelussa täytyy kuitenkin huomioida, että korkea huokoisuusaste ja vähäinen sideaineen määrä voivat vähentää asfaltin kestävyttä (Kuosa ym. 2013a). Hansenin (2008) mukaan asfalttimassassa on yleensä vähintään 16 % ilmahuokosia. Suomessa PANK (2017) ohjeistaa sallituksi tyhjätilaksi avoimessa asfaltissa 14-25 %. Tämä kattaa kaikki vaatimusluokat. On kuitenkin tärkeää muistaa, että pelkkä ilmahuokosten määrä ei kerro materiaalin läpäisevyydestä. Olennaista on, että ilmahuokokset ovat yhteydessä toisiinsa (Suresha ym. 2010, Qiu & Guan 2011, Kuosa ym. 2013a mukaan).

2.4.3 Läpäisevä betoni

Läpäisevä betoni sisältää toisiinsa kytkeytyneitä huokosia. Huokokset ovat yleensä kooltaan 1-8 millimetriä ja niiden kokonaismäärä betonimassassa on noin 15-30 %. Betoni muodostuu kiviaineksesta, joka sidotaan yhteen sementin avulla (kuva 4). Wang ym. (2006) mukaan sementtiä tulisi olla vain juuri sen verran, että se päällystää kiviaineksen ohuella kerroksella. Huokosten takia läpäisevän betonin ominaisuudet eroavat tavallisesta betonista. Läpäisevällä betonilla on suurempi veden ja ilman läpäisevyys. Tavalliseen betoniin verrattuna läpäisevällä betonilla on heikompi puristus- ja vetovoima sekä taivutuslujuus johtuen suuresta huokosten määrästä ja vähäisestä hienojakoisen runkoaineen määrästä. Esimerkiksi läpäisevän betonin puristuslujuus on vain noin 20-30 MPa, kun tavallisen betonin vastaava arvo on 30-80 MPa (Betoni 2020). Betoni siirtää rasitukset maaperään sementin kautta. Betonimassassa oleva kiviaines on

lujaa materiaali, mutta sementin lujuus ja rajapinta sementin ja kiviaineksen välillä ovat heikkoja. Sementin sideainekerros on hyvin ohut, jonka takia betonin hajoaminen johtuu aina sideaineen hajoamisesta kiviainesten välillä. Lämpäisevän betonin ominaispaino on noin 70 % tavallisesta betonista, yleensä noin 1600-2000 kg/m³. Lämpäisevä betoni kutistuu vähemmän ja kestää paremmin lämpötilan muutoksia kuin tavallinen betoni. (Kuosa ym. 2013a; Yang & Jiang 2003)



Kuva 4. Lämpäisevän betonin rakenne (mukaillen Yang & Jiang 2003).

Lämpäisevällä betonilla on useita hyviä ominaisuuksia. Se pystyy absorboimaan ääniä, joten se vähentää melusaastetta. Sateisina päivinä lämpäisevän betonin pintaan ei kerry vettä, joten roiskeita ei pääse tulemaan ja auringon valo ei heijasta päällysteen pinnasta. Melun väheneminen ja tien vedettömänä pysyminen lisäävät huomattavasti turvallisuutta. Lämpäisevän betonin vaalea väri heijastaa paremmin valoa, joten se valaisee iltaisin ja öisin paremmin kuin tavallinen, tumma betoni. Ilma pystyy kulkemaan lämpäisevän betonin läpi maaperään. Ilman ja veden läpäisevyyden avulla lämpäisevää betonia ympäröivä luonto pysyy hyvässä kunnossa, koska maaperän olosuhteet pysyvät hyvinä lämpäisevän betonin jäljitellessä luonnon pintamaata paremmin kuin tiivis betoni. Lämpäisevä betoni pystyy

filteröimään saasteita ja sen ilmareiät pystyvät keräämään lämpöä. Tutkijoiden mukaan näin pystytään säätämään lämpötilaa ja ilmakehän kosteutta sekä eliminoimaan paikallisia lämpösaarekeilmiöitä. Lämpöä vähentää myös läpäisemättömän betonin väri, joka on vaaleampi kuin tavallisessa betonissa. Lämpösaarekeilmiö tapahtuu rakennetuilla alueilla, kun monet tummat pinnat nostavat paikallisesti lämpötilaa verrattuna siihen, mikä lämpötila olisi ilman rakentamatonta pintaa (Yang & Jiang 2003; Kuosa ym. 2013a; Henderson 2012).

Leming ym. (2007) suosittelevat rakentamaan läpäisevän betonipäällysteen tasaiseksi. Jos päällyste on kalteva ja sateen voimakkuus on maaperän suodatuskerrointa suurempi, vesi lähtee nopeasti etenemään päällysteen rakenteessa kaltevuuden suunnassa kohti alinta osaa. Kun alin osa on täytynyt vedellä ja varastointikapasiteetti on täynnä, vesi tulvii päällysteen rakenteen ulkopuolelle. Mikäli läpäisevä betonipäällyste on välttämätöntä rakentaa kaltevaksi, tulee rakenteen varastointikapasiteettia kasvattaa huomattavasti. Tällaisessa tilanteessa täytyy kuitenkin huomioida epätasaisen saturaation vaikutukset kuormituskestävyyteen. Epätasaisen päällysteen valumaongelmia voidaan ratkoa myös lisäämällä alimpaan kohtaan kaivo. Mikäli päällyste on pitkältä matkalta kalteva, voi olla syytä lisätä rakenteeseen hidastuspatoja tai käyttää rakenteessa pengerrystä. (Leming ym. 2007)

Läpäisevässä betonissa käytetään samanlaisia materiaaleja kuin tavallisessa betonissa, mutta erona on hienoaineksen määrä, jota ei yleensä käytetä ollenkaan läpäisevässä betonissa. Myös partikkelikokojakauma pidetään läpäisevässä betonissa pienempänä mahdollistaen verrattain vähäisen partikkelien pakkaantumisen. Läpäisevän betonin seossuhteet ovat vähemmän anteesiantavia kuin tavallisessa betonissa ja kaikkien ainesosien määrien kanssa tarvitaan tiukkaa valvontaa, jotta saadaan haluttuja tuloksia. Taulukossa 1 on esitetty läpäisevän betonin tyypillisiä ainesosamääriä. Täytyy kuitenkin huomioida, että nämä ovat keskimääräisiä arvioita. Läpäisevää betonia tehdessä täytyy huomioida käytettävät materiaalit ja niiden ominaisuudet, jotka täytyy testata, jotta osataan tehdä betonia oikeilla mittasuhteilla. (Tennis ym. 2004)

Taulukko 2. Lämpäisevän betonin tyypillisiä ainesosamääriä (Tennis ym. 2004).

Ainesosa	Pitoisuus [kg/m ³] Suhde
Sementtimateriaalit	270-415
Kiviaines	1190-1480
Vesi-sementtisuhde	0.27:0.34
Kiviaines-sementtisuhde	4-4.5:1
Hienoaines-karkea kiviaines -suhde	0-1:1

Lämpäisevässä betonissa ei yleensä käytetä hienoainesta, mutta sitä voidaan tietyissä tilanteissa käyttää massan lujuuden lisäämiseen. Hienoaineksen lisäys johtaa samalla kuitenkin huokosmäärän laskemiseen, joten lisäysmäärän kanssa täytyy olla tarkkana. Hienoainesta lisätessä täytyy muistaa säilyttää huokosten määrä riittävällä tasolla eli 1-2 % jokaista 10 % hienoainesta kohden. Huokoisuus ja toisiinsa kytkeytyneiden huokosten koko riippuvat kiviaineksen rakeisuudesta ja kiviaineksen tyypistä, kuten myös sementin ja veden määrästä. Suositeltavaa on käyttää yhden kokoista ja puhdasta karkeaa kiviainesta, joka on raekooltaan 5-25 millimetriä tai kiviainesseosta, jossa raekoko vaihtelee 9.5 millimetristä 19 millimetriin. (Tennis ym. 2004; ACI 522R-10, Kuosa ym. 2013a mukaan;) Wang ym. (2006) tutkivat partikkelikoon vaikutusta lämpäisevän betonin rakenteeseen. Tutkimuksen perusteella yhtä raekokoa käyttämällä saavutettiin helpoiten haluttu ilmahuokosten määrä betonimassassa.

Sekä pyörästettyä kiviainesta eli soraa sekä rouheaa kiviainesta eli murskattua kiveä käytetään betonin valmistuksessa. Pyörästettyä kiviainesta käytetään, kun betonista halutaan lujempaa, mutta yleensä rouheampi kiviaines on soveltuvampaa betoniin. Myös kierrätetyn betonikiviaineksen soveltuvuutta lämpäisevään betoniin on tutkittu. Tutkimuksen perusteella optimaalisin määrä kierrätettyä kiviainesta olisi 15 % kiviaineksen määrästä. (Tennis ym. 2004; Rizvi ym. 2009, Kuosa ym. 2013a mukaan)

Kiviainesten pitäisi olla lähellä saturoitunutta, pintakuivaa tilaa tai sitten pitäisi mahdollistaa kiviainesten kosteustilan tarkkailu, koska veden määrän kontrollointi betonissa on tärkeää. Jos kiviaines on kuivaa, se absorboi vettä, jolloin betonimassasta tulee kuivaa ja se ei toimi kuten pitäisi. Liiallinen veden määrä on myös haitaksi ja se nostaa vesi-sementtisuhdetta, jonka tulisi olla 0.27:0.34. Sopivaa veden määrää kuvataan siten, että se antaa massalle kiillon ilman, että virtaa kiviaineksen ohi. Kun kourallinen läpäisevää betonia pyöritetään palloksi, sen ei pitäisi murentua tai menettää huokostilavuutta seokselle. (Tennis ym. 2004)

Myös läpäisevän betonin valmistuksessa hyödynnetään erilaisia lisäaineita. Erityisesti sementtilaastin ominaisuuksia, kuten viskositeettia ja stabiliteettia, pystytään säätämään lisäaineiden avulla. Etenkin vettä vähentäviä lisäaineita ja tehonotkistinta käytetään läpäisevän betonin valmistuksessa. Niiden avulla muun muassa betonin asentaminen on helpompaa, koska märkä betoni on luonnostaan jäykkää. Lisäaineen sopiva määrä on olennainen asia, koska liian suuri määrä notkistinta saa sementin valumaan pois kiviainesten välistä. Betoni kovettuu luonnostaan nopeasti, joten erilaisia hidastimia ja hydratoitumista tasapainottavia aineita on suotavaa käyttää, jotta betonimassaa pystyy työstämään pidempään. (Kuosa ym. 2013a; Tennis 2004)

Läpäisevän betonin oikea sekoittaminen on todella tärkeää. Koska vesi:sementti-arvo on pieni, täytyy sekoitusajan olla riittävä ja sekoituksen tehokasta. Näin massan rakennetta ja ominaisuuksia saadaan parannettua. Sekoituksen aikana luodaan sidos kiviaineksen ja sementtimassan välille. Jos betonin valmistuksessa käytetään useita lisäaineita, turvaa riittävä sekoittaminen niiden kaikkien toimimisen massassa. Voimakkaalla sekoittamisella betonimassaan saadaan muodostettua ilmahuokosia. (Chindaprasirt ym. 2008; Kuosa ym. 2013a) Kevern (2008) tutki sekoitusajan vaikutusta läpäisevään betoniin ja huomasi, että liian pitkään kestänyt sekoittaminen heikentää läpäisevän betonin ominaisuuksia ja vaaditun tiivistysenergian tarve kasvaa.

Kun läpäisevä betoni on asennettu paikoilleen ja tiivistetty, siihen tehdään saumoja erillisellä työkalulla tai sahaamalla. Sahaus ei ole kuitenkaan suositeltua, koska sahaamisesta aiheutuva liete voi tukkia ilmahuokosia ja sahaamalla tulee usein liian aaltoileva sauma. Saumat tulisi tehdä pian, koska läpäisevä betoni kovettuu ja kutistuu

nopeasti. Kuitenkin, mikäli saumat tehdään sahaamalla, täytyy odottaa betonin riittävän kauan, jotta betoni olisi vahvempaa ja kestäisi sahaamisen aiheuttaman rasituksen. Saumojen tarkoituksena on estää betonilaatan halkeilu siten, että halkeamat voivat muodostua saumoihin laatan sijasta. Saumojen väli läpäisevässä betonissa voi olla isompi kuin tavallisessa betonissa, koska se kutistuu vähemmän kuin tavallinen betoni. Toisista betonilaatoista johtuvia halkeamia pystytään välttämään, kun uuden betonilaatan saumat laitetaan samaan kohtaan kuin viereisellä betonilaatalla. Tietyissä tilanteissa saumojen tekeminen ei ole välttämätöntä, jos halkeilun ei katsota aiheuttavan suurta esteettistä haittaa tai halkeilulla ei ole isoa vaikutusta rakenteen päällysteen eheyteen. (Henderson 2012; Tennis ym. 2004)

2.4.4 Muita vaihtoehtoja

On olemassa muitakin läpäiseviä rakenteita, kuten betonisia reikälaattoja, joiden rakenne koostuu kantavan kerroksen päälle tulevasta rei'itetystä betonilaatasta. Reiät täytetään seulotulla murskeella, sepelillä tai ne on nurmetettu. Hienojakoisimmat materiaalit tulee seuloa pois aina asennushiekasta asti, jotta vedenläpäisevyys paranee. Reikälaattoja on käytetty jo pitkään muun muassa eroosion kontrolloinnissa ja penkereiden vakauttamisessa. Niitä voidaan käyttää myös vihreillä päällystysalueilla sekä vahvistamaan pyörillä liikennöityjä nurmialueita, jotka muuten tiivistyisivät liikaa tehden pinnasta läpäisemättömän ja estäen näin nurmikon selviytymisen. (Suomen Kuntaliitto 2012; Virginia DCR 2011)

Läpäisevä päällyste voi myös koostua muovikennostosta. Sen rakenne koostuu kantavan kerroksen päälle tulevasta seulotusta sepelikerroksesta sekä muovikennosta, jonka reikiin on levitetty mursketta. Kenno voidaan myös täyttää ruoholla tai mullalla. Kennot kytetään toisiinsa yhtenäisen pinnan aikaansaamiseksi. Kennot peitetään 20 millimetrin sepelikerroksella tai ohuella kasvukerroksella ja nurmetuksella, jolloin kennon muoto ei ole nähtävissä pinnassa. Muovikennostoja voidaan käyttää maan vahvistamiseen samaan tapaan kuin betonisia reikälaattoja. (Kuosa ym. 2013a; Suomen Kuntaliitto 2012)

2.5 Rakennekerrosten materiaalit

Rakennekerrokset eli kantava kerros ja jakava kerros ovat oleellinen osa läpäisevän päällysteen rakennetta. Rakennekerrosten materiaaleja valitessa täytyy tasapainoilla vedenläpäisevyyden ja kantavuuden välillä. Myös veden viivytyksen kapasiteetti on olennainen kriteeri materiaalin valinnassa. Rakennekerroksessa on suuri tyhjätila, tyypillisesti 30-40 %, ja se voidaan saavuttaa riittävän jyrkällä rakeisuuskäyrällä eli hienoainesten puuttumisella. Smithin (2006) mukaan tyhjätilaa pitäisi olla vähintään 32 %, jotta rakennekerros pystyisi varastoimaan vettä. Tyhjätilan määrään vaikuttavat kiviaineksen rakeisuus, raemuoto ja tiivistys. Yleinen materiaali rakennekerrokselle on karkearakeinen kalliosepeli, koska sen vedenläpäisevyys on aina niin suuri, että se ei muodostu rajoittavaksi tekijäksi. Kiviaineksille on esitetty useita vaatimuksia, koska ne ovat kosketuksissa veden kanssa, jolloin niiden tulee kestää kuivumista ja kastumista sekä jäätymistä ja sulamista. Kiviainesten tulee myös pysyä murskaantumattomina sekä rakentamisen että käytön aikana. (Kling ym. 2015; Beeldens & Herrier 2006)

Rakennekerrosten paksuus riippuu muun muassa alusrakenteen laadusta. Mikäli alusrakenne on huonosti vettä läpäisevää, täytyy rakennekerrosten olla paksumpia. Paksuuden täytyy olla myös riittävä viivytyksen kapasiteettia varten. Yleensä rakennekerrosten paksuus päällysteen ollessa läpäisevää betonia on 150-300 millimetriä. Läpäisevien päällystekivien ja -laattojen kohdalla rakennekerroksen paksuus on yleensä 100-450 millimetriä (Tennis ym. 2004; Smith 2006).

Kuten Beeldens & Herrierkin (2006) totesivat, edellytys toimivalle läpäisevälle rakenteelle ovat huolellisesti valitut materiaalit. Rakenteen perustus voidaan tehdä sitomattomasta materiaalista. Materiaalien valinnassa vaikuttaa myös se, voiko rakenteen tiivistystä tehdä *in situ*. Tiivistystä tehdessä täytyy olla kuitenkin varovainen, koska liiallinen tiivistys aiheuttaa alusrakenteen ja rakennekerrosten läpäisevyyden alenemista. Etenkin avoimissa järjestelmissä, jossa veden pitäisi päästä imeytymään alusrakenteeseen, liiallinen tiivistäminen voi aiheuttaa isoja ongelmia. Rakennekerroksissa pyritään välttämään hienoaineksen käyttöä, mutta toisaalta hienoainesten puute vaikeuttaa tiivistämistä. Erilaisia tiivistämiseen käytettäviä työkaluja, esimerkiksi tärinälevy, käyttämällä on mahdollista saada aikaiseksi

kuivatuskelpoisia rakenteita, joilla on riittävä kantavuus mekaanista räsitystä vastaan. Jotta materiaalien stabiiliteetti saadaan taattua, tulee eri kerrosten materiaalien sekoittumista välttää. Kontaminaatiota voi välttää laittamalla kerrosten väliin esimerkiksi geotekstiilejä, mutta toisaalta tällöin muodostuu riski, jossa kerrokset pääsevät liukumaan toistensa yli johtuen liikenteen aiheuttamasta toiminnasta. Tämän vuoksi olisi hyvä pyrkiä välttämään geotekstiilien käyttöä kerrosten välissä (Beeldens & Herrier 2006; Tennis ym. 2004)

Rakennekerroksessa voidaan käyttää kiviaineksen sijaan myös muita materiaaleja. Vaihtoehtoisia materiaalien käyttö täytyy kuitenkin arvioida tapauskohtaisesti ja suunnittelussa tulee käyttää tuotekohtaisia arvoja. Mikäli tuotekohtaisia arvoja ei ole tiedossa, tulee ne arvioida tai määrittää siten, että vettä läpäisevä rakenne voidaan suunnitella ja mitoittaa riittävällä varmuudella. Beeldens & Herrier (2006) mukaan ainakin yksi hyvä vaihtoehto on sementillä sidotut materiaalit, kuten huokoinen laiha betoni, jolla on korkea huokoisuus, mutta myös suhteellisen suuri lujuus. Rakennekerroksissa voidaan käyttää Leca-soraa. Se on kevyttä, kestävä ja lämpöä eristävää sekä ominaisuuksiltaan kitkamaan tyyppistä materiaalia. Läpäisevää betonia ja betonimursketta on myös käytetty rakennekerroksissa. (Kling ym. 2015; Leca 2020; Beeldens & Herrier 2006)

Rakennekerroksien ominaispaino on yleensä 1520-1920 kg/m³ ja ne eivät sisällä ollenkaan hienoainesta ($\leq 0,075$ mm). Kun tiheästi porrastetussa kiviaineksessa huokosaukot ovat pieniä, avoimeksi luokitellussa kiviaineksessa huokosaukot kasvavat kiviaineskoon kasvaessa. Yhtenä sääntönä voidaan pitää suhdetta, jossa huokosaukkojen halkaisija on 1/5 kiviainesten halkaisijasta. Kokonaishuokoisuus riippuu kiviaineksen rakeisuudesta, partikkelien muodoista ja tiivistysasteesta. Jos kiviainekset ovat hyvin samankaltaisia niin muodoltaan kuin raekooltaan, huokoisuus nousee hyvin korkeaksi, 33-45 %. Särmikkäillä partikkeleilla saadaan aikaiseksi suurimmat huokoisuudet ja matalammat huokoisuudet saadaan pyöristetyillä partikkeleilla. (Ferguson 2005, Kuosa ym. 2013a mukaan)

Kiviaineksen läpäisevyys riippuu kokonaishuokoisuudesta ja yksittäisten huokosten koosta. Avoimeksi luokitelluilla kiviaineksilla on korkeat läpäisevyudet. Taulukossa 2 on

likimääräisiä läpäisevyyksiä erilaisille kiviaineksille. Rakennekerrokset voivat koostua useasta eri kiviaineskerroksesta, joilla on eri kiviaineskoot ja näin ollen myös eri läpäisevyydet. (Ferguson 2005, Kuosa ym. 2013a mukaan; Kuosa ym. 2013a)

Taulukko 3. Kiviainesten likimääräisiä läpäisevyyksiä (Ferguson 2005, Kuosa ym. 2013a mukaan).

Rakeisuus	Läpäisevyys (m/s)
25.5 mm kiviaines (tasalaatuisia)	$1,76 \cdot 10^{-1}$
12.5 mm kiviaines (tasalaatuista)	$5,3 \cdot 10^{-2}$
6.4 mm kiviaines (tasalaatuista)	$9,0 \cdot 10^{-3}$
Karkea kiviaines	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Tiivistetty hiekka ja sora	$2,0 \cdot 10^{-6}$

2.6 Täydentävät materiaalit

Täydentäviä rakenteita voidaan käyttää sekä toiminnallisena osana läpäiseviä päällysteitä että niihin liittyvissä hulevesiratkaisuissa. Erilaisia tuotteita ovat geosynteettiset tuotteet, sekä salaojituksessa ja veden siirtämisessä käytettävät tuotteet. On myös mahdollista täydentää läpäisevää päällystettä veden viivytämisessä käytettävillä imeytys- ja viivytyssäiliöillä sekä vastaavan toiminnan kasetti- ym. järjestelmillä. (Kling ym. 2015)

Geotekstiileille- ja eristeille on yhdenmukaiset standardit:

- EN 13249:2000/A1:2005 Geotextiles and geotextile-related products
- EN 15382:2013 Geosynthetic barriers. Characteristics required for use in transportation infrastructure.

Standardi EN 13249:2000/A1:2005 asettaa vaatimukset geotekstiilien käytölle teiden ja muiden liikennöityjen alueiden rakentamisessa. Standardi EN 15382:2013 asettaa vaatimukset georisteille, joita käytetään nesteiden eristeenä erilaisissa yhdyskuntatekniikan töissä, kuten teillä ja junaradoilla.

Geotekstiilejä käytetään läpäisevän päällysteen pintakerroksen alla erottamaan se alapuolisesta rakennekerroksesta, kevennyskerroksen päällä tai erottamaan rakennekerrokset maapohjasta. Sitä voidaan käyttää lisäksi läpäisevän päällysterakenteen pystysivuilla estämässä maa-aineksen tunkeutumista kantavan tai jakavan kerroksen kiviainesrakeiden väleihin. Geotekstiili sijaitsee yleensä joko rakennekerroksen päällä tai alla. Se voi olla yksisäikeinen kudottu, kutomaton lujasti sidottu tai neulalävistetty ei-kudottu kuitukangas. Geotekstiilin käytössä on huomioitava, että sen tulee päästää vesi suodautumaan vapaasti lävitseen. (Kling ym. 2015; Interpave 2018)

Geotekstiili tulisi valmistaa sopivasta polyeteenistä tai polypropeenista, joka pystyy kestämaan luonnollisesti ilmeneviä kemikaaleja ja mikrobeita. Jatkoksissa geotekstiilit täytyy asentaa vähintään 300 millimetrin verran limittäin ja taitoksia tai ryppyjä ei saa muodostua. Kaikkien ajoneuvojen liikennöintiä suoraan geotekstiilin päällä tulisi välttää (Interpave 2018). Smithin (2006) mukaan alueilla, joissa on ajoneuvoliikennettä, tulisi käyttää korkealaatuista geotekstiilikangasta, joka pystyy vastustamaan karkeiden, kulmikkaiden kiviainesten tiivistymistä rakennusaikana sekä renkaista aiheutuvan paineen rasituksia rakenteen käyttöiän aikana. Smith toteaa myös, että autojen renkaat ja telat saattavat aiheuttaa geotekstiilin ryppyntymistä, joten kangas täytyy kiinnittää hyvin paikalleen. Myös materiaalin suojaaminen UV-valolta on tärkeää materiaalin kestävyuden kannalta (Interpave 2018). UV-valon lisäksi geotekstiilin kestävyyteen vaikuttavat maaperän olosuhteet, kuten pH ja lämpötila, odotettu rakenteen käyttöikä sekä geotekstiilin koostumus ja rakenne (Foubert 2009).

Giroudin (2010) mukaan sopivaa geotekstiiliä valitessa täytyy tutkia neljää eri kriteeriä, jotka ovat läpäisevyys, viivytysaika, huokoisuus ja kankaan paksuus. Läpäisevyyskriteeri jakaantuu kahteen vaatimukseen: huokospaineeseen ja virtausnopeuteen. Geotekstiili voi nostaa huokosvedenpainetta tekstiilin yläpuolella, jolla voi olla haitallisia vaikutuksia. Geotekstiiliä valitessa täytyy pyrkiä sellaiseen ratkaisuun, jossa paine ei pääse nousemaan liikaa ja parhaimmillaan se ei nousisi ollenkaan. Geotekstiili vähentää veden virtausnopeutta, vaikka tekstiili olisi hyvin läpäisevää.

Geoeristeiden käyttökohteet ovat suljetuissa systeemeissä, joissa läpäisevän päällysteen läpi virtaava vesi johdetaan rakenteen alta muualle kuin maaperään. Niiden käyttö on

myös mahdollista osana huleveden varastointi- ja uudelleenkäyttöjärjestelmää. Geeristeillä pyritään estämään nesteiden läpikulku rakenteissa ja rajoittamaan kontaminaatiota (Kling ym. 2015; Kuosa ym. 2013a).

Geeristeitä käytetään silloin, kun maaperä on heikosti vettä läpäisevää tai sillä on matala lujuus. Niitä käytetään myös pohjaveden tai kallioperän ollessa lähellä läpäisevän rakenteen pohjaa. Toisinaan halutaan suojata viereisiä rakennuksia ja perustuksia, jolloin geeristeiden käyttö on järkevää. Geeristeet ovat hyviä myös saasteiden estämisessä, mikäli epäillään saastekuorman kasvavan niin korkeaksi, että maaperän käsittelykapasiteetti ylittyy. Toisinaan voi olla tarvetta kerätä vettä uudelleen käytettäväksi ja geeristeet ovat hyviä tällaisissa tilanteissa. Geeristeen paksuutta valitessa kiinnitetään huomiota siihen, mitä materiaalia eristeen viereen on tulossa ja kuinka tärkeää eristeen on kestää rikkoutumattomana (Kuosaa ym. 2013a; Bowers 2013, Kuosa ym. 2013a mukaan)

Läpäiseviä päällysteitä voidaan täydentää muun muassa kasetti- ja tunnelijärjestelmillä, jolloin saadaan kasvatettua huomattavasti rakenteen viivytys- ja varastointikapasiteettia. Näiden käytöstä voi olla merkittävää hyötyä esimerkiksi alueilla, joissa on huonosti vettä läpäisevää pohjamaata, jolloin vettä täytyy saada viivytettyä. Vettä on myös mahdollista johtaa ja kerätä erillisiin suuren varastointikapasiteetin yksikköihin, kuten betonialtaisiin, toisiinsa liitettyihin suuren läpimitan putkiin tai geeristeellä ympäröityihin laajoihin kasetti- tai tunnelijärjestelmiin. Säiliöitä ja kasetti- ja tunnelijärjestelmiä käytettäessä suunniteltu toiminta saadaan taattua, kun valmistajalta saatavia mitoitus-, asennus- ja käyttöohjeistuksia noudatetaan tarkasti. (Kuosaa ym. 2013a; Kling ym. 2015)

Säiliöiden materiaalina käytetään yleensä muovia tai betonia. Kasetti- ja tunnelijärjestelmät ympäröidään joko vettä läpäisevällä geotekstiilillä tai läpäisemättömällä geeristeellä. Yhden kasetin paino voi olla 8-20 kilogrammaa ja koko 190-430 litraa. Tunnelirakenteiden painot ovat 16-55 kilogrammaa ja tehollinen varastointikapasiteetti 0,88-5,06 m³/yksikkö. (Kling ym. 2015)

Tavallisissa rakenteissa salaojat on sijoitettu rakennekerroksen alaosaan, jolloin rakenteeseen tulevat vedet saadaan nopeasti kuivattua. Läpäisevissä rakenteissa salaojat

estävät rakenteen yli-saturoitumisen rankkasateiden aikana. Jotta yli-saturoituminen saadaan vältettyä, salaojat sijoitetaan alusrakenteen päälle ja ne täyttyvät vasta sitten, kun alla oleva alusrakenne on saturoitunut. Salaojat voivat johtaa esimerkiksi viemäriin, hulevesijärjestelmiin ja lampiin. Salaojan korkeutta säätämällä pystytään hallitsemaan veden virtausta ja näin estämään tulvimista. Rakennekerrokset voivat tyhjentyä vedestä 48-72 tunnin aikana säilyttäen kuitenkin vielä riittävän vakauden ajoneuvokuormien rasituksen alla. (Swan & Smith 2009)

3 LÄPÄISEVIEN PÄÄLLYSTEIDEN TUKKEUTUVUUS- JA KUNNOSSAPITOTUTKIMUKSET

Vettä läpäisevät päällysteet toimivat suodattimina eli ne poistavat vedestä partikkeleita. Mitä enemmän suodattamista tapahtuu, sitä hitaammaksi virtausnopeus muodostuu ja virtausnopeuden palauttamiseksi päällyste tarvitsee huoltoa. Tukkeutuminen perustuu etenkin vedenläpäisevyyteen, huokoskokoon, suodatettavan materiaalin laatuun ja määrään, kuljettavan nesteen määrään sekä huoltotoimenpiteiden tiheyteen. (Kevern 2010)

Erityisesti rakenteiden pintaosa on altis tukkeutumiselle. Tyypillisesti pintakerros estää tukkivan aineksen pääsyn sen alapuolella oleviin vettä viivyttäviin kerroksiin. On kuitenkin mahdollista, että jonkin verran tukkivaa ainesta, erityisesti hienoainesta, pääsee kulkeutumaan veden mukana syvemmälle maaperään tai sen pinnalla olevaan geotekstiiliin asti. Riski tällaiseen kasvaa, mikäli pintamateriaalin toisiinsa yhteydessä olevat huokokset ovat suhteellisen suuria, jolloin myös vedenläpäisevyys on suuri. Tukkeutumisen seurauksena menetetty huokostila eli veden viivytykskapasiteetti on mahdollista korvata ylimääräisellä 25 millimetrin kiviaineskerroksella. (Kling ym. 2015)

Tukkeutumiseen vaikuttaa ajan kuluessa erityisesti päällysteen sijainti, huolto sekä puhdistus. Läpäisevien päällysteiden vedenläpäisevyys vähenee ajan kuluessa. Asianmukaisen seurannan, huollon ja puhdistuksen avulla on kuitenkin mahdollista ylläpitää läpäisevyyttä. Etenkin päällysteen ensimmäisten vuosien aikana on suositeltavaa tehdä riittävän tiheitä vedenläpäisevyyden mittauksia osana jälkiseurantaa. Puhdistusta tarvitaan viimeistään silloin, kun vedenläpäisevyys alenee kriittisesti katsottavan arvon alle. Puhdistus tulee tehdä riittävän usein, jotta pintakerros ei pääse tukkeutumaan päällysteen toiminnan kannalta liiallisesti. Tukkeutumiselle voidaan osoittaa kaksi ajankohtaa, jolloin riski tukkeutumiseen on erityisen suuri: rakentamisvaihe ja sen jälkeinen vaihe, jolloin lähialueiden maaperä ei ole vielä kasvillisuuden sitomaa. Suojauksien huolehtiminen on tärkeää etenkin rakennusvaiheessa, jolloin ennalta arvaamattomat määrät maaperää huuhtoutuvat läpäisevälle pinnalle. Erosiosuojausta on suositeltavaa käyttää, kunnes alueen

kasvillisuus on asetunut. Taulukossa 4 on esitetty erilaisten päällysteiden vedenläpäisevyysarvoja. (Kevern 2010; Kling ym. 2015; Borgwardt 2006)

Taulukko 4. Erilaisten päällysteiden vedenläpäisevyysarvoja (Kling ym. 2015).

Päällyste	Vedenläpäisevyys [m/s]
Betonikiveys kivisaumoilla, (min.)	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Betonikiveys kivisaumoilla, (max.)	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Avoin asfaltti, (min.)	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Avoin asfaltti, (max.)	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Läpäisevä betoni, (min.)	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Läpäisevä betoni, (max.)	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Puhdistus viimeistään	$7,0 \cdot 10^{-5}$

Vettä läpäisevillä päällysteillä voi olla suolaustarvetta etenkin jäätävän sateen aikana. Päällysteen kannalta olisi kuitenkin parasta välttää suolausta tai rajoittaa suolan käyttöä. Yleisesti hyväksytyn suosituksen mukaan suolausta ei tule käyttää vähän liikennöidyillä läpäisevillä päällysteillä ja erityisesti pohjavesialueilla suolausta tulisi välttää. Pohjavesialueella on suuri todennäköisyys siihen, että suola pääsee kulkeutumaan pohjaveteen asti ja voi aiheuttaa myös kuivatusjärjestelmiin korroosiota. Pohjavesialueella tapahtuvaa suolausta voidaan harkita tilanteessa, jossa vettä läpäisevästä rakenteesta suunnitellaan suljettu systeemi. Suolauksesta aiheutuu lisäksi riski sementtipohjaisten pintamateriaalien säilyvyydelle, koska suolan kanssa tapahtuva jäädytys-sulatus voi aiheuttaa rapautumista. (Kuosa ym. 2014b)

Läpäisevien päällysteiden kunnossapitoon tulee kiinnittää erityistä huomiota. Mikäli päällystettä ei aurata, voi lumi tiivistyä ja muodostaa jäisen kerroksen läpäisevän päällysteen pinnalle. Riski tähän on erityisen suurin etenkin keväisin, jolloin lumi ajoittain osin sulaa. Sulaneen veden imeytyminen läpäisevään päällysteeseen estyy, jos lumi on tiivistynyt ja muodostanut jääpinnan. Säännöllinen lumien auraaminen vähentää riskiä tiiviin jääkerroksen muodostumisesta, mutta aurauksin täytyy tehdä oikein, jotta päällyste ei rikkoudu. Aura ei saisi päästä koskemaan ja kuluttamaan päällysteen pintaa, koska läpäisevän päällysteen pinnan mekaaninen kestävyys ei ole suuremman

huokoisuuden vuoksi yhtä hyvä kuin tiiviin pintamateriaalin kestävyys. Auraan voidaan tarvittaessa asentaa kumiasennuslevy, joka lisää terän pystysuuntaista joustoa ja vähentää mekaanista rasitusta. Tarvittaessa lunta voidaan poistaa harjalaitteen avulla. (Kuosa ym. 2014b)

Lumen varastoiminen läpäisevän päällysteen päälle tai sen lähistölle ei ole suositeltavaa, koska se muodostaa päällysteelle tukkeutumisriskin. Kasattu lumi sisältää kiintoainesta, kuten kasaantunutta hiekoitushiekkaa, joka on mahdollisesti osin murskaantuneena pienemmiksi ja herkemmin pinnoitteeseen tunkeutuvaksi partikkeliksi. Tämä aiheuttaa tukkeutumisriskin, kun kiintoaines vapautuu nopeasti sulavasta lumikasasta päällysteen päälle. Mikäli läpäisevän päällysteen läheisyyteen täytyy sijoittaa lumikasoja, olisi ne hyvä saada nurmialueen päälle. Näin osa kiintoaineksesta jää nurmialueelle käsiteltäväksi eikä kulkeudu läpäisevän päällysteen päälle. Lisätukkeutumisriskin aiheuttaa lumikasasta läpäisevän päällysteen päälle sulavan ja kertyvän veden jäätyminen. Sekä sulavan veden että päällysteen lämpötilat pysyvät lähellä jäätymisrajaa, koska Suomessa alkukevään päivät ovat lyhyitä ja aurinko pysyy matalalla. Läpäisevässä päällysteessä oleva vesi voi jäätyä vielä keväällä hieman pintaa syvemmillä, jossa lämpötila pysyy pakkasen puolella, vaikka pinnalla olisikin auringon päivisin sulattamaa vettä. Tämä takia päällysteen vedenläpäisevyys voi olla keväällä huono muutaman viikon ajan. Mikäli suolaus voidaan sallia, se auttaisi tässä tapauksessa vedenläpäisevyyden palautumisessa ja varastoidusta lumesta kertyneen veden imeyttämässä. (Kuosa ym. 2014b; Virginia DCR 2011)

Läpäisevä päällyste voi olla alttiimpi pintajään muodostumiselle, koska huokoisen materiaalin lämmönjohtavuus on pienempi kuin tiiviin materiaalin lämmönjohtavuus. Tietyissä tilanteissa vettä läpäisevän päällysteen pintalämpötila voi olla 1-2 °C tai jopa 4°C kylmempi kuin tiiviin päällysteen pintalämpötila. Kuvassa 5 on VTT:n pilottikohde Helsingin Kuninkaantammessa, jossa on havaittavissa avoimen asfaltin ja tavallisen asfaltin pintojen välinen lämpötilaero. Toisaalta sulava lumi voi päästä imeytymään läpäisevän päällysteen päältä nopeasti pois, jolloin vesi ei ehtisi jäätyä pinnalle lämpötilan laskiessa pakkasen puolelle. (Kuosa ym. 2014b) Mikäli läpäiseviä ja tavallisia päällysteitä käytetään rinnakkain, on hyvä huomioida mahdolliset pintalämpötilojen erot (Rinta-Hiiro 2019).



Kuva 5. VTT:n pilottikohde Helsingin Kuninkaantammessa. Etualalla on avointa asfalttia ja takana tavallista asfalttia (Rinta-Hiiro 2019).

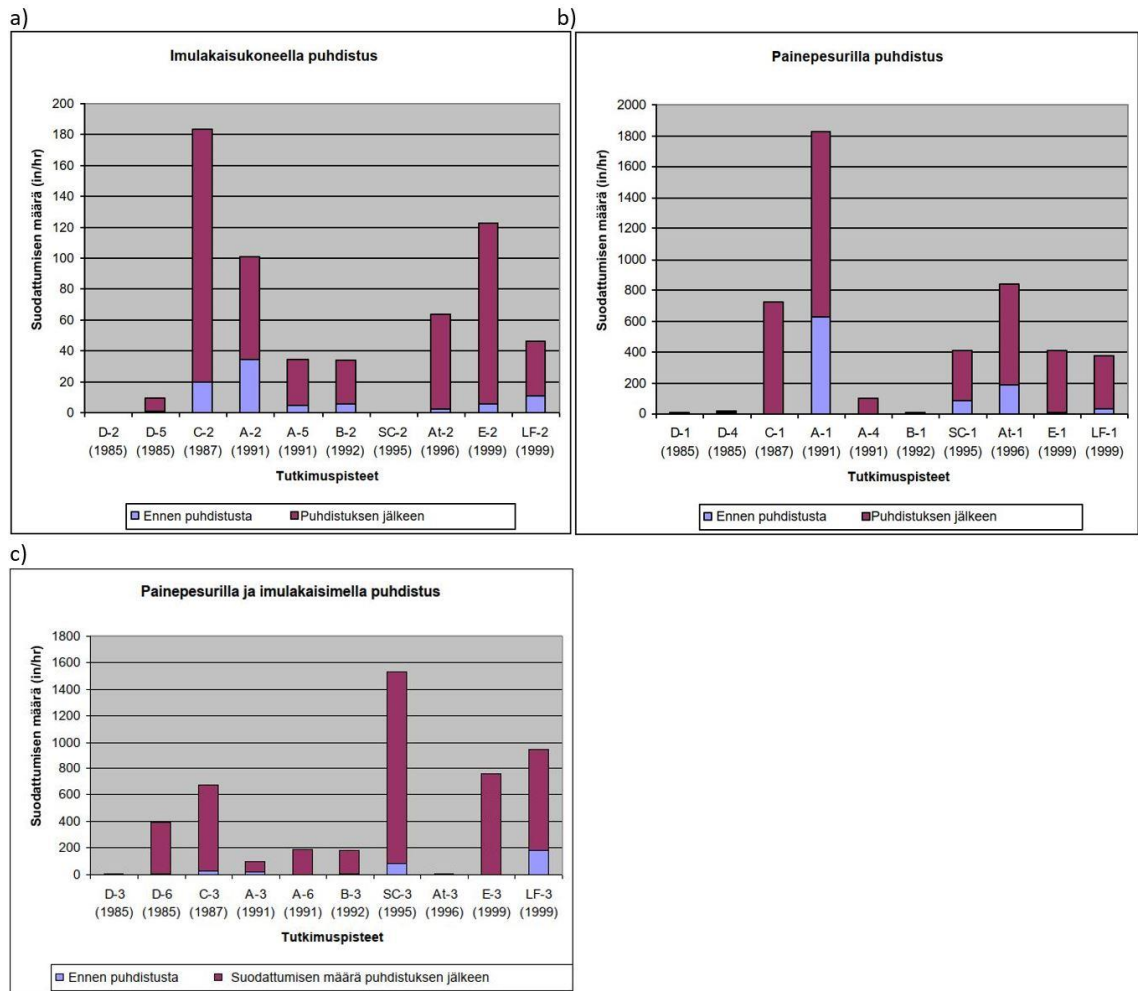
3.1 Päälystekivet ja -laatat

Päälystekivien ja -laattojen vedenläpäisevyyttä koko käyttöikänsä aikana arvioitaessa tulee huomioida tukkeutumisen aiheuttama vedenläpäisevyyden heikentyminen. Tämän takia päälysteen vedenläpäisevyydeksi hydrologista mitoitusta suunnitellessa on hyvä käyttää arvoa, joka on 10 % päälysteen maksimivedenläpäisevyydestä. Tällöin tukkeutuminen on huomioitu siten, että päälyste edelleen läpäisisi vettä, vaikka 20 vuoden tarkastelujakson aikana ei päälysteelle tehtäisi ollenkaan huoltoa. Yksittäiset tukkiutuneet kohdat eivät vielä aiheuta isoa ongelmaa läpäisevään päälysteeseen, koska vesi päätyy silloin toiseen kohtaan päälystettä ja imeytyy sitä kautta. (Interpave 2018)

Waniliesta & Chopra (2007) tutkivat alueita Floridassa, Georgiassa ja Etelä-Carolinassa, joissa läpäisevät päälystelaatat olivat olleet käytössä kuudesta vuodesta 20 vuoteen ilman merkittäviä huoltotoimenpiteitä. Tässä tutkimuksessa ei huomioitu lumen ja jään

vaikutuksia, kuten hiekoituksen vaikutuksia, koska ne eivät ole yleisiä ilmiöitä tutkituilla alueilla. Ennen huoltotoimenpiteitä keskimääräinen vedenläpäisevyys oli $0.015-0.5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Alueella oli myös kohtia, joissa vedenläpäisevyys oli nolla johtuen väärin asennetuista laatoista. Huoltotoimenpiteet suoritettiin imulakaisukoneella ja painepesurilla.

Tutkimuksessa huomattiin, että imulakaisukoneella, painepesurilla ja näiden yhdistelmällä pystyttiin parantamaan vedenläpäisevyyttä useimmissa testipisteissä yli 200 % (kuva 6). Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että vuotuinen puhdistus olisi tarpeellista toteuttaa yhdellä menetelmällä tai näiden yhdistelmällä. Waniliesta & Chopra (2007) totesivat lisäksi, että painepesurilla pestessä saasteet saattavat siirtyä rakenteessa tavoittamattomiin, josta ne kulkeutuvat eteenpäin. Suositeltavaa on testata painepesuria ensin pienelle alueelle ja varoa käyttämästä liian isoa painetta, jolloin päällysteen pinta saattaa rikkoutua. Tutkimuksessa suositeltiin myös, että rakenteeseen olisi hyvä upottaa infiltrometri, josta tarkastettaisiin vuosittain vedenläpäisevyyden taso ja tarve puhdistustoimenpiteille.



Kuva 6. Lämpäiseviin betonilaattoihin kohdistettujen huoltotoimenpiteiden tehokkuus. Vaalean violetti pylväs kuvaa vedenläpäisevyyttä ilman puhdistusta. Tumman violetti pylväs kuvaa vedenläpäisevyyttä tilanteessa, jossa päällyste on puhdistettu. a) Puhdistus imulakaisukoneella. b) Puhdistus painepesurilla. c) Puhdistus sekä imulakaisukoneella että painepesurilla (mukaiillen Waniliesta & Chopra 2007).

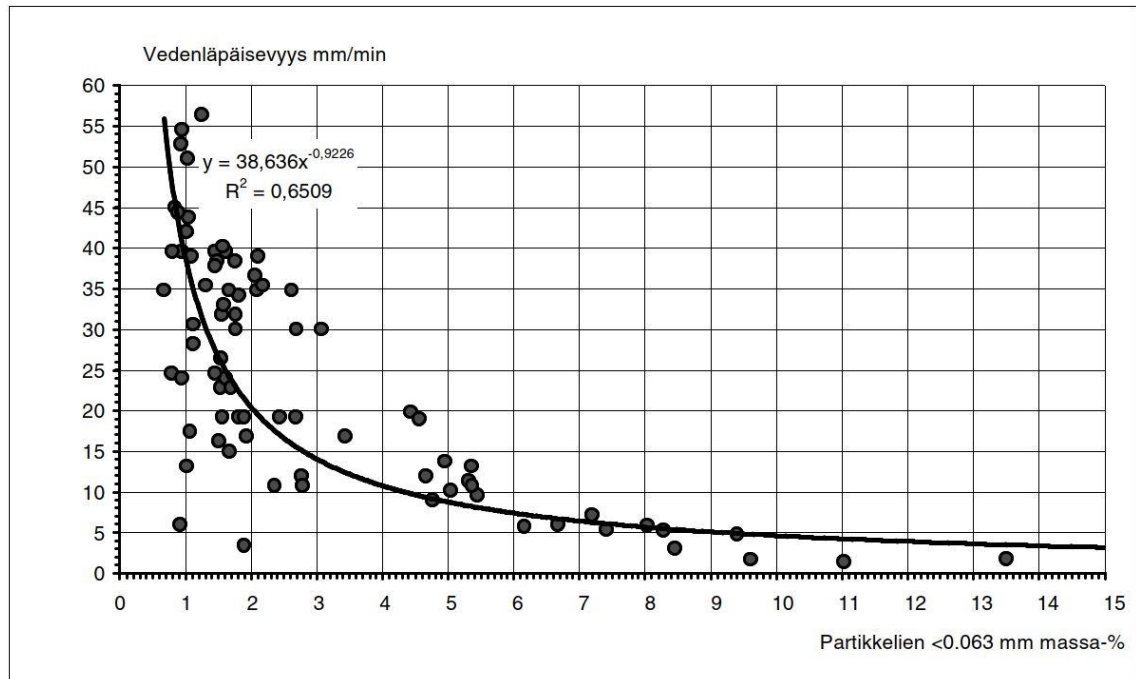
VTT rakensi yhdessä Espoon ja Helsingin kaupunkien kanssa kaksi lämpäisevien päällysteiden pilottikohdetta CLASS 2012-2014 -projektin jatkona. Espoossa käytettiin betonikiveä sekä sidotulla että sitomattomalla saumalla parkkialueella ja Helsingissä käytettiin huokoista betonikiveä kevyen liikenteen väylän yhteydessä olevalla bussipysäkillä. Taulukossa 5 on esitetty tuloksia vedenläpäisevyyksmittauksista, joista voidaan huomata merkittävän vedenläpäisevyyden aleneminen. On kuitenkin huomioitava, että standardimittausten vesimäärät ovat merkittävästi suurempia kuin

tavalliset sateet ja saman mittauskohdan käyttäminen voi heikentää vedenläpäisevyyttä mittauksissa. Helsingissä tapahtunutta voimakkaampaa tukkeutumista voi selittää se, että koekohdetta ympäröi lukuisia rakennustyömaita, jotka aiheuttivat päällysteen tavallista voimakkaampaa likaantumista sekä päällystettä hiekoitettiin enemmän kuin Espoon kohdetta. Talvella hiekoitushiekkana on käytetty tavallista hiekoitusta, mutta VTT suosittelee hiekoitussepin 3/6 käyttöä eli sepin raekoko on 3-6 millimetriä. Kumpaankin päällysteeseen on testattu puhdistusta harjalla ja pesulla, mutta niillä ei ollut merkittävää vaikutusta vedenläpäisykykyyn. Kuninkaantammessa kokeiltiin imulakaisukoneella puhdistusta ja sillä saatiin parannettua läpäisevän betonikiveyksen vedenläpäisevyys lähes alkuperäiselle tasolle. (Rinto-Hiiro 2019; Rinta-Hiiro 2021)

Taulukko 5. Vedenläpäisevyysmittauksien tuloksia (Rinta-Hiiro 2019).

	Vedenläpäisevyys [10^{-3} m/s]		
	4/2017	5/2018	6/2019
Helsinki	4.09-5.12	0.72-2.29	0.045-0.14
Espoo, betonikiveys & läpäisevä, sidottu sauma	0.28-0.55	0.12-0.75	0.014-0.34
Espoo, betonikiveys & läpäisevä, sitomaton sauma	7.57-9.14	7.52-8.78	5.85-7.32

Borgwardt (2006) havaitsi päällysteen iän vaikuttavan suuresti vedenläpäisevyyteen, koska rakenteen ylimpiin 20 millimetriin kertyy vuosien saatossa erilaisia tukkivia materiaaleja. Tukkeutumisen trendinä on nähtävissä vedenläpäisevyyden heikkeneminen tasolle 10-20 % alkuperäisestä läpäisevyydestä. Saumoissa käytettävän materiaalin raekoko vaikuttaa suuresti päällysteen vedenläpäisevyyteen ja karkearakeisen saumamateriaalin käyttäminen on suositeltavaa. Borgwardt (2006) havaitsi hienoaineksen määrän (partikkelikoko < 0,063 millimetriä) ja vedenläpäisevyyden määrän välisen yhteyden. Kuvassa 7 on esitetty tuloksia vedenläpäisevyydestä hienoaineksen suhteen.



Kuva 7. Vedenläpäisevyyden kehitys saumojen hienoaineksen määrän kasvaessa (mukaiillen Borgwardt 2006).

Lucke & Beecham (2011) tutkivat läpäiseviä laattoja, jotka olivat olleet käytössä yli kahdeksan vuotta. Tutkimuksessa havaittiin suurimman osan kiintoaineksesta jääneen tasaavan kerroksen ylimpään osaan, noin 2-5 millimetriin, riippumatta päällysteen tukkeutumisesta. Vain 8,3 % sedimentistä oli jäänyt georisteeseen, joka sijaitsi tasaavan kerroksen alapuolella. Yli 90 % sedimentistä oli jäänyt pintamateriaaliin ja tasaavan kerrokseen. Tutkimuksen perusteella geotekstiilin käyttö sedimenttien suodatuksessa ja alapuolisen rakenteen turvaajana ei ole välttämättä erityisen merkittävä. Lucke & Beecham (2011) huomasivat läpäisevien laattojen olevan erittäin tehokkaita suodattamaan sedimenttejä, jotka kulkeutuvat huleveden mukana. Tutkittavaa aluetta ei ollut puhdistettu kahdeksaan vuoteen ja sen vedenläpäisevyys oli edelleen riittävällä tasolla.

Läpäisevien päällystelaattojen ja -kivien kunnossapidossa olennaista on välttää tukkivien materiaalien pääsy päällysteen päälle ja sitä voidaankin pitää tärkeimpänä asiana tukkimisen ehkäisyssä. Rakennetta saadaan ylläpidettyä yksinkertaisilla toimilla, kuten pitämällä mutaiset työvälineet poissa päällysteen päältä, asentamalla silttياهوja,

tekemällä kaivuutöitä vaiheittain ja rakentamalla väliaikaisia kuivatusratkaisuja, jonne veden voi johtaa rakennustyömaan ajan. Lämpäisevälle päällysteelle ei tule ohjata vesiä ennen kuin koko hulevesijärjestelmä on rakennettu valmiiksi. Päällysteelle tulee tehdä riittävän usein puhdistus ja suunnitella puhdistustarve jokaiselle kohteelle erikseen. Esimerkiksi päällysteen lähellä oleva kasvillisuus voi lisätä puhdistustarvetta. (Smith 2006; Interpave 2018)

Lämpäisevien päällystelaattojen ja -kivien talvikäyttöön liittyy tiettyä huomioitavia asioita. Niitä ei tule käyttää alueilla, joissa on ikirouta, jota ei Suomessa ole. Talven aikana lumen joukkoon on voinut päätyä klorideja tai hiekkaa. Päällysteet eivät pysty suodattamaan klorideja sulavasta lumesta ja hiekka voi tukkia päällystettä sekä vähentää sen vedenläpäisevyyttä. Kuten aiemmin mainittiin, parasta olisi varastoida klorideja ja hiekkaa sisältävä lumi kauas lämpäisevästä päällysteestä. Mikäli suolaa käytetään lumen sulattamiseen lämpäisevän päällysteen päältä, tulee pohjavesi monitoroida klorideja varten päällysteen lähellä olevista havaintokaivoista. Kloriditasojen tulee pysyä alueen vaatimustasojen rajoissa, jotka riippuvat siitä, mihin pohjavettä mahdollisesti käytetään. Tilanteissa, joissa sulamisvesien pääsyä päällysteelle ei voida estää, tulee suunnitteluun kiinnittää erityistä huomiota. Lämpäisevään rakenteeseen täytyy lisätä esimerkiksi salaojia, joita pitkin sulamisvesi ohjataan muualla. Sulavien lumikasojen vesiä ei tule ohjata lämpäisevällä päällysteelle, mikäli pohjavesiolosuhteisiin kohdistuu huolta kloridien osalta. (Smith 2006)

Routiminen ei yleensä ole ongelma lämpäisevissä päällystelaatoissa ja -kivissä, koska rakenne suunnitellaan siten, että vesi kulkee rakenteen läpi nopeasti, jolloin aikaa jäätymiselle ei ole. Mikäli routiintumista tapahtuu, se ei yleensä muodostu tasaisesti, jolloin vesi pääsee läpi routiintumattomasta kohdasta. Kun roudan syvyys on yli yhden metrin, tulee lämpäisevien pysäköintialueiden alusrakenteiden sijaita vähintään 6 metrin etäisyydellä ajoradasta. Tämä vähentää jäälinssien muodostumista ja maaperän nousua ajoradan kohdalla. Päällysteen huoltoon tulee kiinnittää erityistä huomiota keväisin. (Smith 2006; Interpave 2018)

3.2 Avoin asfaltti

Myös avoin asfaltti alkaa tukkeutumaan ja menettämään vedenläpäisevyytensä pian rakentamisen jälkeen. Vedenläpäisevyys saattaa alentua merkittävästi, jopa 90 % alkuperäisestä tasostaan. Toisaalta, mikäli asfaltissa on riittävän suuri huokosten lukumäärä, ei näin iso väheneminen vaikuta ylitsepääsemättömän paljon vedenläpäisevyyteen. (Ferguson 2005, Stenmark 1995, Kuosa ym. 2013a mukaan)

Al-Rubaei ym. (2013) tutkivat Ruotsin Luulajassa ja Haaparannassa pitkään käytössä olleiden avoimien asfalttien puhdistusta painepesurilla ja imulakaisukoneella. Luulajassa sijaitseva avoin asfaltti oli ollut käytössä 18 vuotta ja sitä hiekoitettiin joka talvi kahdesta neljään kertaa hiekalla, jonka raekokojakauma oli 2/4 millimetriä. Alueella ei käytetty talvisin suolausta. Joka kevät avoin asfaltti puhdistettiin lakaisemalla, jonka lisäksi pintaa pestiin painepesurilla ja imulakaisukoneella säännöllisesti vedenläpäisevyyden ylläpitämiseksi. Kuitenkaan noin kuuden vuoden ajalta ennen tätä tutkimusta pintaa ei käsitelty painepesurilla tai imulakaisukoneella. Haaparannassa sijaitseva avoin asfaltti oli ollut käytössä 24 vuotta ja sitä hiekoitettiin joka talvi viidestä kymmeneen kertaa hiekkaseoksella, jossa hiekan raekokojakauma oli 0/6 millimetriä ja joka sisälsi 2 % suolaa. Tätä avointa asfalttia huollettiin ainoastaan keväällä tehtävällä lakaisulla. Lisäksi asfaltin päällä oli säilytetty kasoina multaa läheistä rakennustyömaata varten ja asfalttia ei puhdistettu tämän jälkeen. Kummankin avoimen asfalttipinnan huokoisuus oli rakentamisen jälkeen 18 %.

Al-Rubaein ym. (2013) tutkimuksen perusteella päällysteiden huokoisuus ei ollut merkittävästi laskenut käyttövuosien aikana. Sen sijaan vedenläpäisevyyden määrä oli laskenut kummassakin kohteessa merkittävästi. Huomattavaa oli kuitenkin se, että Luulajassa merkittävästä vedenläpäisevyyden alenemisesta riippumatta pinnoite pystyi edelleen suodattamaan vettä. Tutkimuksessa pinnoite puhdistettiin painepesurilla ja imulakaisukoneella. Tällä tavalla Luulajan pinnoitteen vedenläpäisevyyttä saatiin parannettua, mutta Haaparannassa vedenläpäisevyyttä ei pystytty parantamaan. Erot tutkimuspuhdistuksen tuloksessa johtuvat ainakin päällysteiden ikäerosta, erilaisesta hiekoitushiekan käytöstä ja erilaisista käytön aikaisista kunnossapitotoimista. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että säännöllinen huolto painepesurilla ja

imulakaisukoneella sekä karkeampaa hiekoitushiekkaa käyttämällä avoimen asfaltin tukkeutumista voidaan merkittävästi vähentää sekä näin ollen kasvattaa pinnoitteen käyttöikä. Taulukossa 6 on esitetty tutkimuksen tuloksia. Al-Rubaei ym. (2013) suosittelevat avointa asfalttia hulevesien pitkäaikaisen hallinnan keinoksi.

Taulukko 6. Painepesurilla ja imulakaisukoneella tehdyn puhdistuksen vaikutukset avoimen asfaltin huokoisuuteen ja vedenläpäisevyyteen (Al-Rubaei ym. 2013).

	Alkuperäiset arvot		Ennen tutkimuspuhdistusta		Tutkimuspuhdistuksen jälkeen	
	Huokoisuus [%]	Läpäisevyys [10^{-3} m/s]	Huokoisuus [%]	Läpäisevyys [10^{-3} m/s]	Huokoisuus [%]	Läpäisevyys [10^{-3} m/s]
Luleå	18	4.8	17.2	0.5	16.03	3.48
Haaparanta	18	7.8	15.7	0.22	17.9	0.12

VTT rakensi yhdessä Espoon ja Helsingin kaupunkien kanssa kaksi läpäisevien päällysteiden pilottikohdetta CLASS 2012-2014 -projektin jatkona. Essoossa avointa asfalttia käytettiin parkkialueella ja Helsingissä kevyen liikenteen väylällä noin 200 metrin matkalla. Taulukossa 7 on esitetty tuloksia vedenläpäisevyyssmittauksista, joista voidaan huomata merkittävän vedenläpäisevyyden aleneminen. On kuitenkin huomioitava, että standardimittausten vesimäärät ovat merkittävästi suurempia kuin tavalliset sateet ja saman mittauskohdan käyttäminen voi heikentää vedenläpäisevyyttä mittauksissa. Helsingissä tapahtunutta voimakkaampaa tukkeutumista voi selittää se, että koekohdetta ympäröi lukuisia rakennustyömaita, jotka aiheuttivat päällysteen tavallista voimakkaampaa likaantumista sekä päällystettä hiekoitettiin enemmän kuin Espoon kohdetta. Talvella hiekoitushiekkana on käytetty tavallista hiekoitusta, mutta VTT suosittelee hiekoitussepin 3/6 käyttöä. Kumpaankin päällysteeseen on testattu puhdistusta harjalla ja pesulla, mutta niillä ei ollut merkittävää vaikutusta vedenläpäisykykyyn. Kuninkaantammessa kokeiltiin imulakaisukoneella puhdistusta, mutta sillä ei ollut vaikutusta avoimen asfaltin vedenläpäisykykyyn. Kummatkin päällysteet läpäisevät edelleen hyvin tavallisia sateita. Kuvassa 8 on havaittavissa, miten päällysteet läpäisevät vettä edelleen hyvin verrattuna tavalliseen asfalttiin. (Rinta-Hiiro 2019; Rinta-Hiiro 2021)

Taulukko 7. Vedenläpäisevyyssmittausten tuloksia (Rinta-Hiiri 2019).

	Vedenläpäisevyys [10^{-3} m/s]		
	4/2017	5/2018	6/2019
Helsinki	0.12-0.71	0-0.35	0-0.0075
Espoo	0.75-1.5	0.069-1.2	0.015-0.56



Kuva 8. VTT:n pilottikohteet Helsingissä ja Espoossa. Helsingin kohteessa etualalla on läpäisevää asfalttia ja Espoossa avointa asfalttia on keskellä pysäköintialuetta (Rinta-Hiiri 2019).

Yhdysvaltojen Washingtonissa sijaitsevassa Issaquahin kaupungissa kokeiltiin avointa asfalttia bulevardiin vuonna 2007. Viiden käyttövuoden jälkeen avoimen asfaltin huomattiin olevan tukkeutunut pienistä hiekanjyvistä sekä sammaleesta. Avoimen asfaltin käytön alkuvuosina kunnossapito oli samanlaista kuin tavallisen asfaltin ja hiekoitukseen käytettiin hienojakoista hiekkaa, joka osoittautui tukkeutumisen suurimmaksi aiheuttajaksi. Kaupunki kokeili ensimmäisenä puhdistustoimenpiteenä

imulakaisukonetta, mutta sillä ei saatu poistettua hiekkaa eikä sammalta. Seuraavana puhdistustoimenpiteenä käytettiin tehopesua, jossa vettä suihkutettiin 21 MPa voimalla asfalttiin. Tällä tavalla avoimesta asfaltista saatiin poistettua tukkiva materiaali ja vedenläpäisevyys palasi silmämääräisesti arvioituna lähes alkuperäiselle tasolle. Puhdistuksen jälkeen hiekoitushiekkana ei käytetty enää hienojakoista hiekkaa ja hiekoitustarvetta arvioitiin tarkemmin. Issaquahin hulevesipäällikön mukaan puhdistuksen jälkeen avointa asfalttia tarvitsi hiekoittaa vähemmän, koska vesi pääsi imeytymään rakenteeseen eikä muodostunut jääksi rakenteen pinnalle. Issaquahissa on käytetty avointa asfalttia myös pysäköintialueilla. Jatkossa avoimen asfaltin huoltotoimenpiteenä käytetään muutaman vuoden välein tehtävää tehopesua. (Ross 2012)

Bendtsen (2011) keräsi yhteen tietoja avoimen asfaltin käyttökokemuksista moottoriteillä Euroopan talvisissa olosuhteissa. Selvityksessä tutkittiin avoimen asfaltin käyttöä moottoriteillä Saksassa, Sveitsissä, Ranskassa ja Hollannissa. Eniten avointa asfalttia käytettiin Hollannissa, jossa 90 % moottoriteistä on tehty avoimesta asfaltista melusaasteen vähentämiseksi. Muissa maissa käyttö on vähäisempää, koska talvikunnossapidon kustannukset ovat suuremmat, päällysteen kesto heikompi ja elinikä lyhyempi kuin tavallisella asfaltilla. Selvityksen mukaan on kuitenkin mahdollista rakentaa kestävä päällyste avoimesta asfaltista, mutta joissain maissa siinä ei onnistuttu, jolloin kustannukset olivat kasvaneet. Hyvin tehty ja ylläpidetty päällyste kestää talvi- ja routavaurioita, vaikka avoin asfaltti on herkempi vaurioille kuin tavallinen asfaltti. Moottoritiet olivat pysyneet hyvässä kunnossa talvisin, kun päällysteitä oli seurattu, suolattu ja aurattu oikein. Bendtsen (2011) suositteli tarvittaessa laskemaan nopeusrajoituksia avoimen asfaltin kohdalla talvisin. Avoimen asfaltin havaittiin tarvitsevan suolausta 30-50% enemmän kuin tavallinen asfaltti.

Bendtsenin (2011) selvityksessä tehtiin havaintoja avoimen asfaltin liukkaudesta, kuten mustasta jäästä. Läpäisevän päällysteen huokosiin havaittiin tunkeutuvan, jolloin jäinen pinta pääsi muodostumaan ja sitä oli vaikeampi poistaa kuin tavallisesta asfaltista. Toisaalta käyttäjiltä tuli myös kehuja ajomukavuuden lisääntymisestä sekä veden roiskumisen ja melun vähenemisestä. Ajoturvallisuudessa ei havaittu eroja tavallisen asfaltin ja avoimen asfaltin välillä.

3.3 Lämpäisevä betoni

Lämpäisevän betonin tukkeutumisen hallinnassa tärkeimmät tekijät ovat keskimääräinen lämpäisevyys ja päällysteen huokosten rakenne, huleveden määrä, joka on suunniteltu suodattuvan päällysteen läpi, maa-aineksen määrä hulevedessä ja päällysteen kaltevuus. Huoltotoimenpiteet täytyy suunnitella jokaiseen kohteeseen erikseen. (Kuosa ym. 2013a; Kevern 2010)

Sedimentti voi tukkia lämpäisevän betonipäällysteen huokokset pinnasta tai sedimentti voi kerääntyä rakenteen pohjalle. Joskus sedimentti voi täyttää kaikki betonin huokokset ylhäältä alas. Tukkeutumisen kannalta sedimentaation kriittisin tekijä on hienojakoisten materiaalien kerääntyminen rakenteen pohjalle. Kun materiaalipartikkelit tunkeutuvat lämpäisevään betoniin, ne jäävät usein lähelle pintaa. Mitä enemmän partikkeleita päätyy rakenteeseen, sitä voimakkaammin vedenlämpäisevyys heikkenee pinnasta, jolloin päällysteen alapuoliset rakenteet pysyvät suojassa. Tukkeutumisen tapahtuminen nimenomaan betonin pinnassa on tavoiteltavaa, koska lämpäisevän betonin pinnan puhdistaminen on suhteellisen helppoa ja tehokasta, jolloin vedenlämpäisevyys saadaan palautettua ennalleen tai ainakin lähelle sitä. (Kevern 2008, Kuosa ym. 2013a)

Leming ym. (2007) arvioivat karkeasti, että lämpäisevään betonipäällysteeseen päätyvät hienoainekset sijaitsevat päällysteestä korkeintaan 12 millimetrin syvyydessä 20 vuoden tarkastelujakson aikana. Samalla alempien kerrosten varastointitilavuus aleni vain muutamalla prosentilla. Tutkimuksessa havaittiin, että lisäämällä 25 millimetriä kerrospaksuutta rakennekerroksiin, saatiin pidettyä varastointitilavuus riittävällä tasolla ylimääräisen kerroksen kompensoidessa tukkeutuneen osan varastotilavuutta. (Leming ym. 2007)

Lemingin ym. (2007) ja Kevernin (2010) tutkimusten mukaan sedimentaatiolla on iso vaikutus lämpäisevän betonipäällysteen vedenlämpäisevyyteen. Hiekka jää yleensä pintakerrokseen, mutta sen sijaan siltti ja savi laskeutuvat rakennekerrosten alaosiin. Betoni on yleensä suhteellisen tiivistä, jolloin isommat partikkelit, kuten hiekka, jäävät pintaan eivätkö kulkeudu eteenpäin. Tällöin päällysteen säännöllisellä puhdistamisella saadaan pidettyä yllä riittävää vedenlämpäisevyyttä. Näin ollen merkittävin vaikutus

läpäisevän betonin vedenläpäisevyyteen on erittäin hienojen materiaalien pääsy rakenteeseen, jolloin veden pääsy pohjamaahan voi estyä. Hienoaineksen laskeutuminen rakennekerroksien alaosiin haittaa veden pääsyä pohjamaahan erityisesti silloin, kun sedimenttikerros on ominaisuuksiltaan erilaista kuin pohjamaa. (Leming ym. 2007, Kevern 2010)

VTT rakensi yhdessä Espoon ja Helsingin kaupunkien kanssa kaksi läpäisevien päällysteiden pilottikohdetta CLASS 2012-2014 -projektin jatkona. Espooseen rakennettiin läpäisevä betonipinnoite pysäköintialueelle. Taulukossa 8 on esitetty tuloksia vedenläpäisevyydsmittauksista, joista voidaan huomata merkittävä vedenläpäisevyyden aleneminen. On kuitenkin huomioitava, että standardimittausten vesimäärät ovat merkittävästi suurempia kuin tavalliset sateet ja saman mittauskohdan käyttäminen voi heikentää vedenläpäisevyyttä mittauksissa. Tavallista sadetta betonipinta edelleen läpäisee hyvin. Talvella hiekoitushiekkana on käytetty tavallista hiekoitusta, mutta VTT suosittelee hiekoitussepin 3/6 käyttöä. Läpäisevää betonipinnoitetta oli puhdistettu harjalla ja pesulla, mutta niillä ei ollut merkittävää vaikutusta vedenläpäisykykyyn. (Rinta-Hiiri 2019)

Taulukko 8. Vedenläpäisevyydsmittauksen tuloksia (Rinta-Hiiri 2019).

	Vedenläpäisevyys [10^{-3} m/s]		
	4/2017	5/2018	6/2019
Espoo, läpäisevä betoni	0-6.65	0-4.39	0-3.25

Mata (2008) on puolestaan tutkinut läpäisevän betonin käyttäytymistä kolmessa eri tilanteessa. Ensimmäinen tilanne oli niin sanottu pahin tukkeutumistilanne, jossa betoni altistettiin yhdellä kertaa suurelle sedimenttikuormalle hitaalla virtaamalla. Tällä pyrittiin simuloimaan yhden vuoden aikana tapahtuvaa valumaa yhdellä kuormalla. Ensimmäisessä tilanteessa käytettyjen läpäisevien betonien tyypillinen vedenläpäisevyys oli noin 20 %. Toisessa tilanteessa tukkeutumista tutkittiin siten, että läpäisevä betoni, jonka vedenläpäisevyys oli noin 25 %, altistettiin erilaisille virtausten sarjoille, sekä voimakkaammille että pienemmille virtauksille. Toisessa tilanteessa sedimenttikuormina käytettiin arvioitua normaalin käyttöään aikana muodostuvaa kuormaa. Läpäisevät betonit

altistettiin toistuville sedimenttikuormille myös pesun jälkeen. Veden läpäisevyys mitattiin kuormituksen ja pesun eri vaiheissa. Samalla mitattiin myös huokoisuus, puristuslujuus, halkaisuvetolujuus, murtokerroin ja dynaamisen elastisuuden moduuli. Ensimmäisessä ja toisessa tilanteessa käytettiin kolmea erilaista maalajia: hiekkaa, savista silttiä ja savista silttihiekkaa. Kolmannessa tilanteessa Mata (2008) tutki läpäisevän betonin pakkasenkestävyyttä käyttämällä metodia, joka perustuu osittain kyllästetyn läpäisevän betonin realistisiin, hitaisiin jäätymisnopeuksiin. Pakkasenkestävyyttä tutkittiin neljällä eri variaatiolla, jossa hiekan ja ilman pääsyä rakenteeseen vaihdeltiin.

Ensimmäisessä ja toisessa tilanteessa vahvistettiin aiempi olettamus sedimenttien vertikaalisesta ja horisontaalisesta lajittumisesta: päällysteen yläosaan jäivät isompi kokoiset kivirakeet ja hienoaines kulkeutui rakenteessa alaspäin muodostaen pohjalle tasaisesti jakautuneen kerroksen. (Mata 2008)

Ensimmäisessä vaiheessa käytetty hiekka jäi odotetusti läpäisevän betonin yläosaan ja se saatiin lähes kokonaan poistettua puhdistamalla. Samoin kävi myös suurilta osin saviselle siltille ja saviselle silttihiekalle, kuitenkin osa siitä tunkeutui myös betonirakenteen alaosaan. Kokeen perusteella läpäisevässä betonissa käytetty kiviaines raekolla 2-8 millimetriä oli sen verran iso, että saviset ja silttiset sedimentit (raekoko < 75 mikromillimetriä) pääsivät kulkeutumaan betonin alaosaan. Oli kuitenkin havaittavissa, että ensimmäisessä vaiheessa käytetty tekniikka, jossa läpäisevä betoni altistettiin kerralla yhdelle sedimenttikuormalla, aiheutti pintaosaan hiekkakerroksen. Tämän seurauksesta osa hienoaineksesta jäi pintaan eikä pääsyt käyttäytymään täysin normaaliin tapaan eli etenemään betonirakenteessa alaspäin. Kuvassa 9 on esitetty tuloksia vedenläpäisevyydestä ensimmäisessä vaiheessa. (Mata 2008)

Specimen	Sediment type	Remaining permeability after sedimentation, %	Remaining permeability after washing, %	Remaining permeability after removing fabric, %
C-1-1	Sand	11%	21%	71%
C-1-2	Sand	30%	67%	75%
C-2-3	Sand	4%	6%	68%
C-2-4	Sand	3%	17%	64%
C-1-3	Clayey silt	2%	8%	89%
C-1-4	Clayey silt	1%	2%	70%
C-2-1	Clayey silt	1%	4%	68%
C-2-2	Clayey silt	3%	6%	75%
C-1-5	Clayey silty sand	40%	55%	67%
C-1-6	Clayey silty sand	1%	54%	68%
C-2-5	Clayey silty sand	1%	56%	75%
C-2-6	Clayey silty sand	3%	7%	58%

Kuva 9. Ensimmäisen vaiheen alkuperäisestä läpäisevyydestä jäljellä olevat vedenläpäisevyydet sedimentaation, pesun ja suodatinkankaan poiston jälkeen. Suodatinkangas sijaitsi rakenteessa alimpana. Jokaisen maalajin kohdalla testattiin kahta erilaista läpäisevää betonia (Mata 2008).

Toisessa vaiheessa käytetty hiekka jäi odotetusti läpäisevän betonin yläosaan ja se saatiin lähes kokonaan poistettua puhdistamalla. Savisen siltin ja savisen silttihiekan tapauksessa iso osa sedimentistä oli päätynyt läpäisevän betonikerroksen pohjalle. Kaikkien näytteiden perusteella toisella sedimentaatiokerralla läpäiseväisyys oli alhaisempi kuin ensimmäisellä kerralla. Tulosten perusteella pohjalle kerääntynyt sedimentti on kriittinen tekijä läpäisevän betonin hydrologista käyttökäyttöä arvioitaessa. Kuvassa 10 on esitetty vedenläpäisevyyden tuloksia toisesta vaiheesta. (Mata 2008)

Specimen	Sediment type	Remaining permeability after sedimentation 1, %	Remaining permeability after washing 1, %	Remaining permeability after sedimentation 2, %	Remaining permeability after washing 2, %	Remaining permeability after removing fabric, %
C-3-5	Sand	13%	30%	1%	25%	32%
C-3-6	Sand	3%	32%	0%	28%	23%
C-3-11	Sand	6%	24%	2%	10%	36%
C-3-12	Sand	5%	29%	3%	26%	56%
C-3-1	Clayey silt	7%	30%	1%	7%	53%
C-3-2	Clayey silt	6%	16%	5%	10%	63%
C-3-7	Clayey silt	1%	11%	1%	11%	50%
C-3-8	Clayey silt	1%	8%	1%	8%	67%
C-3-3	Clayey silty sand	2%	7%	0%	2%	20%
C-3-4	Clayey silty sand	1%	5%	2%	2%	53%
C-3-9	Clayey silty sand	1%	5%	0%	2%	56%
C-3-10	Clayey silty sand	1%	11%	1%	3%	50%

Kuva 10. Toisen tilanteen alkuperäisestä läpäisevyydestä jäljellä olevat vedenläpäisevyydet kahden sedimentaation ja pesun jälkeen sekä suodatinkankaan poiston jälkeen. Kaikissa testeissä käytettiin samanlaista läpäisevää betonia (Mata 2008).

Jäätymis-sulamistesti vahvasti käsitystä siitä, että korvaamalla kiviaineksesta 7 % hiekalla, saadaan nostettua läpäisevän betonin pakkasenkestävyyttä merkittävästi. Sedimentaatiolla ei ollut havaittavissa isoa vaikutusta pakkasenkestävyyteen, mutta tulokset tästä eivät olleet täysin vakuuttavia. (Mata 2008)

Vedenläpäisevyys heikentyi jokaisessa tapauksessa, mutta puhdistuksen jälkeen vedenläpäisevyys palautui lähes aina entiselle tasolle. Vedenläpäisevyyttä ei saatu täysin palautettua niissä maalajeissa, jotka sisälsivät hienoainesta. Hienoaines voi tukkia pieniä huokosaukkoja, jotka yhdistäisivät isompia huokosia. Mata (2008) suositteli lisätutkimuksia huokosaukkojen koon jakaumasta, huokoisuudesta ja maalajien tyypeistä vedenläpäisevyyteen liittyen. Pakkaskestävyyteen liittyen lisätutkimuksia on suositeltavaa tehdä liittyen betonissa olevien huokosten ja betoniin tunkeutuvan ilmamäärän suhteesta sekä hiekkapitoisuudesta läpäisevässä betonissa, jonka w/c-suhde on matala. (Mata 2008)

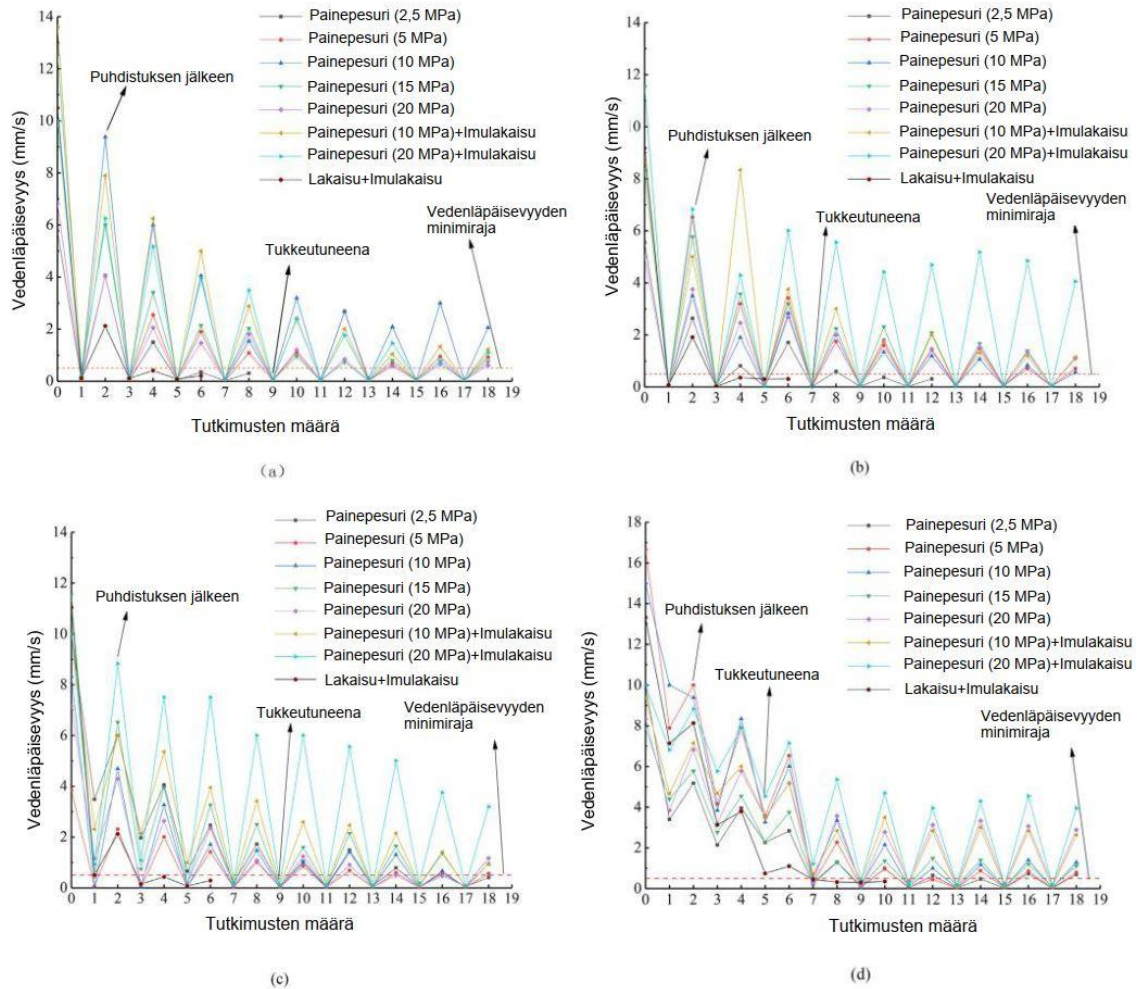
Hu ym. (2020) tutkivat läpäisevän betonin erilaisia puhdistusmenetelmiä ja niiden tehokkuutta. Testialue rakennettiin Kiinan Jinaniin. Läpäisevän betonin

vedenläpäisevyydeksi pyrittiin saamaan 20 % ja testialueelle tehtiin 32 eri tutkimuspistettä. Tutkimuksessa käytettiin neljää erilaista kiintoainetta, joiden raekokojakauma näkyy kuvassa 11. Tutkimuspisteet jaettiin neljään eri ryhmään sen perusteella, millaista tukkeutumismateriaalia käytettiin. Jokaisessa ryhmässä testattiin kahdeksaa erilaista puhdistustapaa. Puhdistusmenetelmät olivat painepesu, painepesun ja imulakaisukoneen yhdistelmä sekä lakaisun ja imulakaisukoneen yhdistelmä. Näitä menetelmiä käytettiin eri suuruisilla paineilla. Jokainen tutkimuspiste altistettiin yhdeksän kertaa sedimentille ja se puhdistettiin jokaisen altistuksen jälkeen eli myös puhdistuksia tehtiin yhdeksän kertaa.

Size (mm)	Material I (%)	Material II(%)	Material III(%)	Material IV(%)
1.18–2.36	15.0	12.5	0.0	48.1
0.6–1.18	20.0	13.5	0.0	51.9
0.3–0.6	20.0	35.0	47.3	0.0
0.15–0.3	20.0	22.4	30.3	0.0
0.075–0.15	15.0	11.5	15.5	0.0
<0.075	10	5.1	6.9	0.0

Kuva 11. Tutkimuksessa käytettyjen sedimenttien raekokojakauma (Hu ym. 2020).

Hun ym. (2020) tutkimuksessa selvisi, että läpäisevän betonin minimivedenläpäisevyys menetetään jokaisen tukkeutumiskerran jälkeen ennen puhdistusta. Erilaisten materiaalien välillä oli havaittavissa, että hienoainesta sisältävä sedimentti tukki herkimmin betonin rakenteen. Tutkimuksen perusteella kaikki puhdistusmenetelmät palauttavat läpäisevän betonin vedenläpäisevyyden tiettyyn pisteeseen asti. Painepesun vaikutus vedenläpäisevyyteen on paljon korkeampi kuin lakaisun ja imulakaisukoneen yhdistelmä. Painepesurin puhdistustulokseen ei ollut suurta vaikutusta sillä, mitä painetta välillä 5-20 MPa käytettiin. Tehokkain puhdistusmenetelmä oli painepesun ja imulakaisukoneen yhdistelmä. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että läpäisevän betonin puhdistustoimenpiteillä saadaan tehokkaasti pidennettyä rakenteen käyttöikää vedenläpäisevyyden suhteen. Kuvassa 12 on esitetty tutkimuksen tulokset jokaisesta testiryhmästä ja niihin käytetyistä puhdistusmenetelmistä.



Kuva 12. Tukkeutumisen eteneminen. a) materiaali 1 b) materiaali 2 c) materiaali 3 d) materiaali 4 (mukailten Hu ym. 2020).

Zhou ym. (2019) tutkivat läpäisevän betonin tukkeutumisen ja huokosten koon suhteen perusteella Kiinan Shanghaissa. Läpäisevän betonin huokosten ominaisuudet tutkittiin tietokonetomografialla, jonka jälkeen analyysiä jatkettiin Matlabin ja Image J:n avulla. Tutkimuksen perusteella todettiin, että läpäisevän betonin ainemääräsuhteet vaikuttavat huokosten ominaisuuksiin, mukaan lukien huokosten koko ja lukumäärä. Huokosten lukumäärä on verrannollinen huokosten kokoon. Kiviaineksen koko vaikuttaa ensisijaisesti huokosten kokoon. Toissijaisesti myös sementti-kiviainessuhde vaikuttaa huokoskokoon. Tutkimuksen perusteella tukkeutumisasteeseen vaikuttaa ensisijaisesti tukkivan partikkelin koko verrattuna läpäisevän betonin huokosten kokoon. Kun suhde huokosten koon ja tukkivan materiaalin välillä on 0,6-0,8, tukkeutumisen tapahtuminen

on erittäin todennäköistä. Zhou ym. (2019) suosittelivat läpäisevää betonia suunniteltaessa määrittelemään suunnitellun betonin huokoskoon ja oletettujen tukkivien partikkelikokojen välisen suhdeluvun ja mikäli se on välillä 0,6-0,8, tulee muuttaa suunnitellun läpäisevän betoniseoksen sementti-kiviainessuhdetta. Tutkimuksen perusteella on suositeltavaa tehdä lisätutkimuksia muistakin tukkeutumiseen vaikuttavista tekijöistä etenkin silloin, kun tukkivan materiaalin partikkelikoko vaihtelee.

Henderson (2012) tutki läpäisevän betonin tukkeutumista viidessä eri testipisteessä Kanadassa. Testipisteet ovat pääsääntöisesti erilaisten työpaikkojen pysäköintialueita. Yhdessä testipisteessä päällysteen päällä ei parkkeerata vaan sen ylitse tapahtuu lyhytkestoista, matalan ajovauhdin ajamista. Yksi testipiste toimii vain kevyenliikenteen väylänä eikä altistu moottoriajoneuvojen rasitukselle. Läpäisevän betonin huoltotoimenpiteitä tutkittiin kahdessa eri tilanteessa: talvihuolto käyttäjien turvallisuuden säilyttämiseksi ja huolto vedenläpäisevyyden säilyttämiseksi.

Vedenläpäisevyyteen liittyvää huoltoa testattiin viidellä eri puhdistustavalla: imulakaisukoneella, lakaisemalla, tehopesulla, puutarhaletkulla pesemällä sekä paloletkulla pesemällä. Tutkimusten perusteella havaittiin, että tehopesu saattaa työntää tukkivia partikkeleja entistä syvemmälle betonin rakenteeseen, jolloin vedenläpäisevyys heikkenee. Pinnan lakaisu poistaa tukkivat materiaalit vain läpäisevän betonin pinnasta, mutta ei syvemältä rakenteesta, joten lakaisulla ei ole merkittävää vaikutusta vedenläpäisevyyden parantamisessa. Läpäisevän betonin puhdistaminen suuren virtaaman omaavalla letkulla poistaa tehokkaasti betonin rakenteesta tukkivaa materiaalia ja joissain tapauksissa vedenläpäisevyys palautui lähes alkuperäiselle tasolle. Yleisesti voidaan todeta, että tämän tutkimuksen testipisteet säilyttivät hyvin suorituskykynsä vähäisillä huoltotoimenpiteillä. Henderson (2012) suosittelee, että alueen suunnittelu tehdään huolella siten, että tarpeetonta roskaa, kuten maisemointimateriaalia, ei päädy läpäisevän betonin päälle. Läpäisevää betonia, joka on rakennettu riittävällä läpäisevyysasteella, sopivalla seosrakenteella ja laadukkaita rakennuskäytäntöjä noudattaen, oletetaan pystyttävän huoltamaan riittävästi käyttämällä yhtä tai useampaa puhdistustapaa, joita tässä tutkimuksessa käytettiin.

Hendersonin (2012) tutkimuksien mukaan talvella käytetty hiekoitushiekka laskee läpäisevän betonin vedenläpäisevyyttä, mutta ei hyväksymättömän rajan alapuolelle. Talvikunnossapitoon liittyvä suolan lisääminen laskee myös vedenläpäisevyyttä, mutta ei yhtä paljon kuin hiekan lisäys. Suolan käytöllä havaittiin olevan vaikutuksia läpäisevän betonin pintaan. Suolaa testattiin kolmeen eri laattaan ja jokaisen laatan ulkomuoto muuttui siinä määrin, että laatat eivät olleet enää alkuperäisessä muodossaan. Laattojen heikentyminen näkyi halkeamina koko laatan paksuudelta sekä kiviaineksen rikkoutumisena betonirakenteen pohjaa myöten. Tämän tutkimuksen perusteella läpäisevä betonirakenne voitaisiin suunnitella kestäväksi vähintään 15 vuotta talvisissa olosuhteissa.

4 HAASTATTELUTUTKIMUS – TILANNE VALIKOIDUISSA KUNNISSA

Työtä varten toteutettiin haastattelututkimus, jonka avulla haluttiin selvittää läpäisevien päällysteiden roolia kaavoituksessa, millaisissa paikoissa kunnat käyttävät läpäiseviä päällysteitä ja minkälaisia huoltotoimenpiteitä ne vaativat. Haastatteluihin osallistuivat Espoo, Vantaa ja Oulu. Haastattelut toteutettiin teemahaastattelun muotoa mukaillen eli haastattelussa oli kolme aihealuetta, joihin jokaiseen laadittiin muutamia kysymyksiä. Haastattelutilanteessa käytiin vapaata keskustelua teemojen ympärillä. Teemoihin laaditut kysymykset toimivat eräänlaisena raamina, jolla pidettiin yllä haastattelujen kontekstia ja haastattelujen vertailtavuutta.

Kaavoituksesta pyrittiin selvittämään, huomioidaanko läpäiseviä rakenteita kaavoituksessa ja onko läpäisevistä rakenteista tehty kaavamääräyksiä. Suunnitteluosuudessa pyrittiin selvittämään, onko läpäiseviä rakenteita käytetty kunnissa ja jos on, millaisissa kohteissa niitä on käytetty. Mikäli läpäiseviä rakenteita ei ole käytetty kunnissa, pyrittiin selvittämään syitä tähän. Haastattelun kolmannessa osassa selvitettiin läpäiseviin rakenteisiin käytettäviä kunnossapitotoimenpiteitä ja niiden määrää. Tässä yhteydessä keskusteltiin lisäksi läpäisevien rakenteiden käyttöön liittyvistä haasteista. Samalla vertailtiin läpäisevien rakenteiden eliniän pituutta ja kustannusten suuruutta suhteessa tavallisiin rakenteisiin. Tarkat kysymykset löytyvät liitteessä 1 olevasta haastattelupohjasta. Kaikki haastattelut toteutettiin etäyhteyksien avulla.

Haastattelujen jälkeen kuntia lähestyttiin vielä täydentävillä kysymyksillä sähköpostin välityksellä. Tarkoituksena oli selvittää keinoja siihen, miten läpäiseviä päällysteitä saataisiin enemmän käyttöön kunnissa. Kunnilta tiedusteltiin kiinnostusta pilottitutkimuksen järjestämiseen sekä siitä, voisiko pilottitutkimuksen toteuttaa kuntien välisenä yhteistyönä. Kunnat saivat myös arvioida sitä, tulisiko onnistunut pilottitutkimus läpäisevien rakenteiden käyttöä.

5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Kaavoitus

Espoossa ei ole pääsääntöisesti määrätty asemakaavoissa rakenteiden läpäisevyydestä. Joskus pihamääräyksissä on kuitenkin määrätty seuraavasti: ”Pihan pinnoitteissa tulee suosia vettä läpäiseviä pintoja.” Hulevesimääräys ohjaa kuitenkin suosimaan läpäiseviä pintoja, koska määräyksessä korttelialueella viivytettävä hulevesien määrä lasketaan läpäisemättömien pintojen määrän perusteella. Espoossa ei ole tehty kaavamääräyksiä läpäisevien rakenteiden käytöstä. Kaavoituksessa on varauduttu ilmastomuutokseen sopeuttamalla hulevesi- ja tulvamääräyksiä ennakoivasti ilmastomuutokseen. Espoon uuden hulevesiohjelma mukaisesti hulevedet pyritään käsittelemään mahdollisimman lähellä niiden syntypaikkaa. Nykyisiin ja lisääntyviin sademääriin varaudutaan suunnittelemalla hulevesien hallintarakenteita niin yleisille alueille kuin asuinkortteleihin. Teknillistaloudellisista syistä, tiiviille korttelialueille tai putkessa johdettaville hulevesille ei usein kuitenkaan voida jättää paljoakaan varaa merkittävästi lisääntyville vesimäärille, mutta tulvareitit huomioidaan kaavoituksessa.

Vantaalla läpäisevien rakenteiden käytöstä ei ole tehty tarkkoja kaavamääräyksiä. Tällä tavalla on haluttu antaa rakentajalle mahdollisuus päättää, millaista hulevesien hallintaa kohteessa toteutetaan. Yleiskaavassa on osoitettu alueet, joissa hulevesien hallinta tulee järjestää. Pääsääntöisesti Vantaalla hulevesien hallinta on määrällistä hallintaa ja laadullinen hallinta koskee lähinnä työmaiden hulevesiä. Asemakaavassa hulevesien hallintaa on tarkennettu ja siinä on ositettu muun muassa hulevesien reitit. Rakentamista ohjataan Vantaan hulevesiohjelmalla ja hulevesien hallinnan toimintamallilla. Hulevesiohjelmassa määrittelyssä hulevesien käsittelyn prioriteettijärjestyksessä ensimmäisenä prioriteettina on hulevesien käsittely ja hyödyntäminen syntypaikallaan, jonka yhteydessä esimerkkinä mainitaan läpäisevät päällysteet (Vantaan kaupunki 2009). Hulevesien hallinnan toimintamallissa läpäisevät pinnat mainitaan yhtenä imeyttämisen toimenpiteenä (Vantaan kaupunki 2014). Ilmastomuutos on huomioitu kaavoituksessa hulevesien mitoitusasteiden määrässä. Vantaa on lisäksi selvittänyt alueita, joissa on

äärimmäisten rankkasateiden aikana tulvia ja näillä alueille suunnitellaan tulevaisuudessa viivyttäviä rakenteita.

Oulussa läpäisevien rakenteiden käytöstä ei ole tehty pakottavia kaavamääräyksiä vaan niiden käyttöä suositellaan kaavassa. Asemakaavoituksen lähtötiedoksi tehdään hulevesiselvitys, jota peilataan rakennettavuusselvitykseen ja maaperätutkimukseen. Näin saadaan käsitys siitä, voiko alueelle rakentaa esimerkiksi viivyttäviä rakenteita. Oulun kaupungin rakennusjärjestyksessä edellytetään ensisijaisesti imeyttämään kiinteistöjen hulevedet. Hulevesien hallintasuunnitelmassa ja viivytyksvaatimuksessa otetaan huomioon ilmastonmuutoksen aiheuttama mahdollinen vesimäärän lisäys käyttämällä mitoitussadetta, joka on 15-25 % nykyisiä ja viime vuosikymmeninä käytettyjä hulevesiverkoston mitoitussateita suurempi. Ilmastonmuutokseen varaudutaan hallintasuunnitelmassa myös siten, että hulevesien hallinnassa tulee huomioida myös talviaikaisen valunnan lisääntyminen, lumipeiteajan lyheneminen sekä roudan keston ja syvyyden pieneminen. Oulun kaupungin hulevesien hallintasuunnitelmassa läpäisevät päällysteet esitellään kattavasti keinona estää hulevesien muodostuminen (Haapalainen & Valtanen 2019). Lumitiloja ei ole tonteilla riittävästi ja niitä pyritään kaavoituksessa lisäämään. Lumitilojen lisäämisellä pyritään muun muassa hallitsemaan omia vesiä ja vähentämään päästöjä, koska lunta ei tarvitsisi kuljettaa ympäri.

5.2 Suunnittelu

Espoon kaupungissa käytetään avointa asfalttia urheilukentillä. Oittaalla on koripallokenttä, joka on käytössä kesäisin, mutta talvisin se ei ole käytössä. Säterinniitynkentällä on kesäisin kenttä, jossa pelataan koripalloa sekä salibandya ja talveksi siihen tehdään tekojääkenttä. Laaksoahden ja Puolarmarin urheilupuistoissa on avointa asfalttia, jonka päälle tehdään talveksi tekojääkaukalo. Laaksoahdessa avoimen asfaltin päällä on kesäisin rullalätkäkenttä ja Puolarmarissa on koripallokenttä ja salibandystadion. Perkkään asukaspuistossa on monitoimikenttä, jossa käytetään avointa asfalttia, joka jäädytetään talveksi. Espoossa ei ole käytössä läpäiseviä päällysteitä muualla kuin urheilukentillä lukuun ottamatta VTT:n pilottikohdetta Tikaslaaksossa, jossa erilaisia läpäiseviä päällysteitä on kokeiltu pysäköintialueella. Läpäisevää betonia on kokeiltu tekojääkentällä ulkona, mutta se todettiin huonoksi vaihtoehdoksi.

Espoo käyttää urheilukentillä avointa asfalttia pääasiallisesti sen takia, että sen päälle saadaan tehtyä helposti tekojääkenttä, koska jäädyttävä putkisto johtaa hyvin kylmää avoimen asfaltin kautta. Kun vettä aletaan lisäämään jäädytystarkoituksessa kentälle, on avoin asfaltti jo valmiiksi huurteessa, jolloin vesi alkaa jäätymään nopeasti rakenteeseen päästyään. Tekojääkentän suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon, että kentän rakenteessa oleva jäädytysputki jäätyy myös alapuoleltaan. Tällöin saadaan estettyä kokojään muodostuminen, jolloin jää jäisi vain pintaan ja kovalla pakkasella halkeaisi. Avoin asfaltti on tähän tarkoitukseen hyvä rakenne, koska vesi pääsee kulkeutumaan siinä tehokkaasti, jolloin jäädytysputki jäätyy kokonaisuudessaan. Oittaaan urheilukenttä on ainut avointa asfalttia sisältävä urheilukenttä Espoossa, jota ei talveksi jäädytetä, koska se on pieni verrattuna muihin kenttiin. Avoin asfaltti valittiin Oittaaalle materiaaliksi sen takia, että vesi ei jäisi pelikentälle seisomaan.

Espoon kaupungilla jäähdytysputket ovat 25 millimetriä paksuja ja ne upotetaan 40 millimetrin syvyiseen uraan avoimessa asfaltissa. Putki kiinnitetään uraan liimalla, joka sisältää kivituhkaa. Tämän jälkeen rakenteen päälle lisätään vielä 20 millimetrin kerros avointa asfalttia. Espoon kaupungin käyttämissä avoimissa asfalteissa kiviaineksen raekoon tulee olla 8 millimetriä. Suuremman kiviaineskoon on havaittu aiheuttavan asfaltin murenemistä ja pienempi kiviainekoko vähentää päällysteen huokoisuutta. Myöskään ura-asfaltin tekeminen suuremman raekoon kiviainekseen ei onnistu, koska uraan menee muutoin asfalttikiveä, joka voi painaa putken rikki. Kesällä avoimen asfaltin käytössä on huomioitava, että kuumina päivinä päällysteen päälle ei ajeta raskailla ajoneuvoilla, koska tällöin päällysteeseen jää jälkiä. Mikäli kuumana ajanjaksona on tarvetta ajaa raskaalla ajoneuvolla avoimen asfaltin päällä, tulee se tehdä aamuisin, kun päällyste on viileä ja suosia suoraan ajamista eikä tehdä jyrkkiä käännöksiä. Tavallista asfalttia ei voi jäädytystarkoitukseen käyttää, koska se saattaisi halkeilla pahasti. Ennen avoimen asfaltin käyttöä kentillä on käytetty hiekka- ja kumirouhetekonurmea, joita käytetään edelleen niillä tekojääkentillä, joissa avoin asfaltti ei ole tällä hetkellä käytössä. Kentän pintamateriaalin valintaan vaikuttaa se, millaista kesäkäyttöä kentällä halutaan olevan.

Espoossa läpäiseviä rakenteita on alettu käyttämään 2010-luvulla. Oittaaan avoin asfaltti rakentui 2013, Säterinniitynkenttä 2018 sekä Puolarmaarin ja Laaksoalahden

urheilupuistojen avoin asfaltti 2020. Avoimen asfaltin käyttöä ei ole lisätty suoraan ilmastonmuutosta ajatellen vaan tekojääkentän jäädyttämisen takia.

Vantaalla avointa asfalttia on kokeiltu Hiekkaharjun urheilukentällä juoksuradan alla. Juoksuradan kestopäällysteen alla on kaksi 30 millimetrin kerrosta avointa asfalttia. Päällimmäisen avoimen asfaltin raekoko on 8/60 ja alemman raekoko on 12/80. Jotta juoksuradan pinnasta saadaan riittävän suora, tulee avoimen asfaltin alle noin metrin syvyinen murskekerros. Murskekerros koostuu 150 millimetrin paksuisesta suodatinkerroksesta raekolla 0-20, 650 millimetrin paksuisesta jakavasta kerroksesta raekolla 0/64 ja 200 millimetrin paksuisesta kantavasta kerroksesta raekolla 0-32. Murskekerroksen alapuolella on suodatinkangas ja sadevesiviemäri.

Läpäisevien päällysteiden käytössä Vantaalla on ollut varovainen linja, koska halutaan rakentaa pitkäikäisiä rakenteita. Avoimen asfaltin käytössä mietityttää etenkin se, rikkoutuuko päällyste herkästi. Muutamilla pysäköintialueilla on käytetty läpäiseviä betonilaattoja sekä reikäkiveä. Asuntomessut 2005 järjestettiin Vantaalla ja siellä on kokeiltu avointa asfalttia, mutta käyttökokemuksista ei ole tietoa. Vantaa käyttää läpäiseviä rakenteita suunnitelmassa ohjeena VTT:n julkaisua ”Filtration Systems for Stormwater Quantity and Quality Management”, jossa on annettu ohjeita erilaisten hulevesirakenteiden rakentamiseen ja ylläpitoon. Kohteiden suunnittelussa otetaan ilmastonmuutos huomioon mitoitusasteita määrittämisessä. Vantaalla on tarkoituksena lisätä läpäisevien rakenteiden määrää tulevaisuudessa sekä keskittyä erityisesti hulevesirakenteiden kunnossapidon toimivuuteen.

Oulussa läpäiseviä rakenteita on toteutettu Soittajankankaalla VTT:n pilottikohteena. Tästä kohteesta ei kuitenkaan ole olemassa tarkempia tietoja. Muita läpäiseviä rakenteita ei ole Oulussa toteutettu. Oulussa voisi olla kiinnostusta toteuttaa läpäiseviä rakenteita, mutta toistaiseksi toteutuksen on estänyt muun muassa tiedon puute läpäisevistä rakenteista. Rakenteista halutaan tehdä varmuudella pitkäikäisiä, joten uusien rakenteiden kokeilu ei ole ollut prioriteettilistan kärjessä. Oulussa tunnistetaan tarve muuttaa tarjouspyyntöjen sisältöä sellaiseksi, että tarjouksia saisi myös erilaisista hulevesiratkaisuista. Konsulttiyritykset tarjoavat sitä mitä tarjouspyynnössä pyydetään eikä tällöin uusia, nykytilanteesta selvästi poikkeavia ideoita muodostu.

Oulussa erikoisuutena on se, että hulevesiasiat ovat olleet vuoteen 2016 asti Oulun Veden vastuulla. Vuonna 2016 hulevesien hallinnan kokonaisvastuu siirtyi Oulun kaupungille, joka käsittää pääasiassa yleissuunnitelmien suunnitteluttamisen vastuun siirtymisen Oulun kaupungille. Hulevesien hallintaa valvoo Oulun kaupungin yhdyskuntalautakunta, joka myös hyväksyy hulevesiä koskevat suunnitelmat ja määräykset. Oulun Veden vastuulla on hoitaa hulevesien runkoviemäriverkostoa ja kuivatuspumppaamoja sekä antaa lupia hulevesiviemäriverkoston liittymiseen (Haapalainen & Valtanen 2019). Tämän aikaisemman käytännön takia hulevedet on lähinnä ohjattu putkistoihin ja joissain tapauksissa ojiin. Huleveden käsittelyn järjestäminen ei ole ollut sujuvaa katusuunnittelun ja Oulun Veden välillä. Suunnittelussa on edelleen voimassa ajatus siitä, että vesi tulisi johtaa pinnalta muualle, mahdollisesti toisarvoiselle pinnalle. Hulevesien johtamisessa on kuitenkin alettu siirtymään siihen, että vettä ei johdettaisi putkeen vaan muualle imeytymään.

5.3 Käyttö ja kunnossapito

Espoossa urheilukenttien avointa asfalttia pestään painepesurilla, letkulla tai terävällä harjalla. Huoltotoimenpiteet suoritetaan kaksi kertaa vuodessa, keväällä ja syksyllä. Keväällä kentät puhdistetaan ennen kauden aloitusta ja syksyllä puhdistus tehdään ennen kenttien jäädytystä. Syksyisin on tärkeää tehdä huoltotoimenpiteitä riittävän ajoissa, jotta esimerkiksi kenttien lähistöllä olevien lehtipuiden tippuneet lehdet eivät ehti murentua ja maata kentälle. Espoon kentät ovat olleet vasta vähän aikaa käytössä, joten elinkaaren arviointi on hankalaa. Urheilukentät ovat lähinnä tennarikäytössä, joten todennäköisesti ne eivät kulu niin nopeaa kuin katurakenteessa oleva asfaltti.

Espooseen rakennettujen avoimien asfalttikenttien rakennuskustannukset eivät ole olleet suuremmat kuin toisenlaisen pintamateriaalin valitessa olisivat olleet. Käytön aikaiset kustannukset ovat edullisempia kuin hiekka- ja kumirouhetekonurmet, koska avoin asfaltti jäätyy nopeammin, jolloin energiakustannukset jäädyttämisessä ovat matalammat. Kustannusvaikutukset eivät kuitenkaan ohjaa päällysteen valintaa vaan se, millaiseen kesäkäyttöön kenttä halutaan eli halutaanko esimerkiksi jalkapallo- vai koripallokenttä.

Tähän mennessä käyttökokemukset avoimesta asfaltista urheilukentillä ovat positiivisia. Käyttäjiltä ei ole tullut valitusta ja kaupungin puolelta palautteena on se, että päällysteet läpäisevät vettä edelleen hyvin. Urheilukenttien päällyste joutuu vähemmälle rasitukselle kuin katualueen päällyste, koska urheilukenttiä ei hiekoiteta eikä niihin kohdistu säännöllisesti ajoneuvojen aiheuttamaa rasitusta. Tukkeutuvaa materiaalia urheilukentille päätyy lähinnä lehtipuiden kautta.

Vantaalla Hiekkaharjun urheilukentällä olevaa avoimesta asfaltista koostuvaa juoksurataa puhdistetaan omalla imupesurilla, joka kiinnitetään pienoistraktorin etuosaan. Traktorin takaosaan kiinnitetään likavesisäiliö, joka kerää imuveden pois. Vantaalla juoksuradan puhdistukseen ei käytetä painepesuria, koska se voi irrottaa pinnoitetta. Kokemuksien perusteella rata on pysynyt pääosin hyvässä kunnossa. Hyppy- ja heittopaikoille on kuitenkin päässyt muodostumaan lätäköitä. Odotettavissa on, että kymmenien vuosien päästä päällyste on päässyt tiivistymään sen verran, että se ei enää läpäise vettä. Tähän on kuitenkin varauduttu siten, että juoksuradoille on tehty kallistus sisäradan vesikouruun.

Oulun Soittajankankaan päällysteen tilanne tällä hetkellä ei ole tiedossa.

5.4 Mahdollisuuksia edistää läpäisevien rakenteiden käyttöä kunnissa

Kuntien näkemyksen mukaan läpäisevien rakenteiden käyttöä voisi lisätä pilottikohteen järjestäminen. Pilottikohteista toivottaisiin selvyyttä siihen, toimivatko läpäisevät rakenteet Suomessa ja millaista niiden ylläpito on. Pilottikohteista tulisi tehdä sellaisia, että niiden mitoitus tiedot ja mallikuvat olisivat helposti saatavilla. Näin kuntien olisi helpompi ottaa käyttöön samankaltaisia rakenteita, mikäli ne pilottikohteissa havaittaisiin toimivaksi.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Tämä diplomityön perusteella läpäisevien päällysteiden tukkeutuminen on hallittavissa oleva asia. Erityisesti rakenteiden pintaosa on altis tukkeutumiselle, jolloin tukkiva aines ei pääse etenemään veden mukana syvemmälle rakenteessa. Viivytäviin kerroksiin ja geotekstiilin asti päätyvä tukkiva aines on yleensä hienojakoista kiintoainesta. Läpäisevien päällysteiden tukkeutumiseen vaikuttaa etenkin päällysteen sijainti, huolto sekä puhdistus. Tärkeää on pyrkiä estämään tukkivien materiaalien pääsy päällysteen päälle esimerkiksi ympäröiviltä rakennustyömailta. (Kling ym. 2015; Smith 2006; Interpave 2018)

Säännöllisellä kunnossapidolla läpäisevien päällysteiden käyttöikää vedenläpäisevyyden suhteen saadaan pidennettyä merkittävästi. Esimerkiksi Luulajassa sijaitseva avoin asfaltti suodatti edelleen vettä 18 käyttövuoden jälkeen (Al-Rubaei ym. 2013). Puhdistustoimenpiteet täytyy kuitenkin valita päällysteen tyyppille sopivaksi. Esimerkiksi VTT:n pilottikohteiden perusteella imulakaisukoneella saatiin puhdistettua tehokkaasti läpäisevät päällystekivet, mutta avointa asfalttia imulakaisukoneella ei saatu puhdistettua (Rinta-Hiiri 2021). Useissa tutkimuksissa oli saatu painepesurilla hyviä puhdistustuloksia, mutta Waniliesta & Chopra (2007) suosittelevat testaamaan sitä ensin pienellä alueella, jotta voidaan havaita, työntääkö painepesuri tukkivaa ainesta syvemmälle rakenteeseen tai rikkoutuuko päällyste paineen vaikutuksesta.

Läpäisevien päällysteiden käyttö pohjoisissa olosuhteissa vaatii tiettyjen asioiden tarkempaa huomioimista. Lunta ei tulisi kasata läpäisevän päällysteen päälle tai sen lähistölle, koska lumessa oleva kiintoainesta aiheuttaa tukkeutumisriskin sulaessaan päällysteen päälle. Lumikasasta sulava vesi voi jäätymä päällysteen pinnalle ja estää näin veden pääsyn läpäisevään rakenteeseen. Lumen tiivistyminen ja jäätyminen päällysteen pintaan on riski myös silloin, jos päällystettä ei säännöllisesti aurata. Pohjoisiin olosuhteisiin liittyy vahvasti hiekoittaminen ja suolaus. Suolausta ei lähtökohtaisesti suositella tehtävän läpäisevälle päällysteelle etenkin pohjavesialueella, koska päällysteet eivät pysty suodattamaan klorideja vedestä. Suolauksen on lisäksi havaittu aiheuttavan muutoksia läpäisevän betonin pintaan. Hiekoitushiekan tulisi olla karkearakeista eikä siinä suositella käytettävän hienoainesta. VTT suosittelee

pilottikohteidensa perusteella hiekoitussepin 3/6 käyttöä (Rinta-Hiiro 2019). Ruotsin Luulajassa avoimeen asfalttiin oli käytetty hiekoitussepiä 2/4 ja päällysteen vedenläpäisevyys oli pysynyt riittävällä tasolla (Al-Rubaei ym. 2013). (Kuosa ym. 2014b; Smith 2006; Henderson 2012)

Haastattelujen perusteella voidaan todeta, että läpäisevät rakenteet eivät ole yleisesti käytössä Suomessa. Avointa asfalttia käytetään urheilukentillä, mutta sen käyttö ei ensisijaisesti liity hulevesien hallintaan vaan kenttien toiminnallisuuteen. Läpäisevien päällysteiden käytöstä hulevesien hallinnan apuna ei ole paljoa tietoa Suomessa ja ennakkoluuloja on etenkin tukkeutumisesta. Uusien vaihtoehtojen käyttöönottoaminen on hidasta, koska rakenteista halutaan tehdä pitkäikäisiä eikä riskejä sen suhteen haluta ottaa. Toisaalta ongelmana on myös se, että kunnat eivät mainitse läpäiseviä rakenteita tarjouspyynnöissä, jolloin tarjoajat eivät laita tarjouksiin läpäiseviä rakenteita vaihtoehdoksi, koska sellaisia rakenteita ei ole tarjouspyynnössä pyydetty.

Mikäli läpäisevää päällystettä haluttaisiin alkaa käyttämään, täytyy päällysteen sijainti ja asennusajankohta harkita tarkkaan. Sijainnin suhteen täytyy miettiä, minkälaista rasiitusta päällysteen päällä tulee olemaan. Esimerkiksi huokoinen betonilaatta ei kestä autojen aiheuttamaa rasiitusta. Käyttötarkoitus vaikuttaa myös talvisin päällysteen huoltoon. Läpäisevän päällysteen kannalta parasta olisi, että päällystettä ei tarvitsisi hiekoittaa. Mikäli päällysteen päällä esimerkiksi kävellään ja pyöräillään, on päällysteen hiekoitus sepeleillä perusteltua. Hiekoitussepin valinnassa täytyy kuitenkin huomioida esimerkiksi pyörät, koska liian teräväreunainen sepele voi aiheuttaa pyöränrenkaiden puhkeamisen. Suositeltavin asennusajankohta on silloin, kun suunnitellun läpäisevän päällysteen ympäristö on jo rakennettu valmiiksi. Tällöin päällysteen päälle ei ajaudu ennalta-arvaamattomia määriä tukkivaa ainesta. Mikäli päällyste rakennetaan ennen ympäristön valmistumista, on päällyste syytä suojata asianmukaisesti.

Kun päätös päällysteen käytöstä ja sijainnista on tehty, on suositeltavaa miettiä tarkoin päällysteelle kohdistettavat kunnossapitotoimet. Päällystettä tulee huoltaa alusta asti säännöllisesti, jolloin vedenläpäisevyys pysyy riittävällä tasolla ja päällyste ei pääse tukkeutumaan peruuttamattomasti. Päällysteen huollosta olisi suositeltavaa laatia selkeät

ohjeet, jolloin kunnossapitourakoitsija osaisi muun muassa aurata, hiekoittaa ja puhdistaa päällysteen oikeaoppisesti.

Tämän diplomityön perusteella olisi suositeltavaa tehdä Suomeen pilottikohteita, joista olisi onnistuessaan mahdollista ottaa mallia muualle. Pilotit kannattaisi rakentaa erilaisiin kohteisiin, kuten pysäköintialueille ja kevyenliikenteenväylille, jolloin niiden toiminta erilaisissa kohteissa Suomen olosuhteissa saataisiin selville. Päällysteille tehtävät huoltotoimenpiteet ja esimerkiksi hiekoitussepin raekoko on syytä kirjata ylös, koska niillä on iso vaikutus päällysteen toimivuuteen. Pilottikohteen mitoitustiedot ja mallikuvat tulisi olla helposti saatavilla, jolloin kuntien olisi helpompi tehdä itselleen samankaltainen rakenne. Läpäisevien rakenteiden käytön lisääntyminen vaatii riittävästi esimerkkikohteita ja tietoisuuden lisäämistä kunnissa.

7 YHTEENVETO

Hulevedellä tarkoitetaan maan pinnalta, rakennuksen katolta tai muilta vastaavilta pinnoilta pois johdettavaa sade- tai sulamisvettä. Lämpäsemättömän pinnan määrä on olennainen tekijä hulevesien muodostumisessa. Työn tavoitteena oli selvittää, olisivatko läpäisevät rakenteet hyvä vaihtoehto hulevesien hallintaan ja ovatko ne toimivia kylmissä olosuhteissa. Diplomityön avulla pyrittiin erityisesti selvittämään läpäisevien rakenteiden tukkeutuvuutta ja sen vaikutusta rakenteen toimintakykyyn. Lisäksi läpäiseviä rakenteita tarkasteltiin myös suunnittelun ja kunnossapidon kannalta. Työ toteutettiin perehtymällä aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen ja julkaisuihin, sekä toteuttamalla haastatteluita Oulun, Espoon ja Vantaan henkilökunnalle. Haastatteluiden painopiste oli kaavoituksessa, suunnittelussa sekä käytössä ja kunnossapidossa.

Läpäisevät päällysteet kuuluvat hulevesien hallinnassa menetelmiin, joilla pyritään vähentämään hulevesien määrää. Läpäisevien päällysterakenteiden pintakerros on vettä läpäisevää ja sen alapuolella on karkeasta kiviaineksesta tehty rakennekerros. Hulevesi varastoituu hetkeksi rakennekerrokseen, josta se imeytyy maaperään tai johdetaan eteenpäin salaojilla. Vettä läpäisevät päällysteet luokitellaan riippuen pintamateriaalista huokoisiksi tai läpäiseviksi ja ne voivat olla joko yhtä kappaletta olevia tai koostua toisiinsa liitettävistä kappaleista. Vesi läpäisee huokoisen materiaalin kauttaaltaan. Läpäisevät päällysteet sen sijaan koostuvat kivistä tai laatoista, joiden välissä oleva kiviaines päästää veden lävitseen. Laattoina voidaan käyttää myös huokoista materiaalia, jolloin vesi läpäisee päällysteen kauttaaltaan. Tässä työssä keskityttiin läpäisevien rakenteiden osalta erityisesti avoimeen asfalttiin, läpäisevään betoniin sekä läpäiseviin päällystekiviin ja -laattoihin.

Päällystekivien ja -laattojen toiminta perustuu siihen, että saumakohdat päästävät veden kulkemaan alapuolisiin rakennekerroksiin, jolloin vesi ei jää päällysteen pinnalle. Materiaalina käytetään betoni- tai luonnonkiveä. Saumojen kiviainesmateriaalin valinnassa tulee olla tarkkana, koska hienojakoisen täyteaineen käyttäminen heikentää vedenläpäisevyyttä verrattuna karkeaan partikkelikokoon.

Avoim asphaltti luokitellaan huokoiseksi materiaaliksi eli vesi läpäisee kauttaaltaan asfaltin pinnan. Se muodostuu kiviaineksesta, sideaineesta sekä mahdollisesta lisääineesta. Avoimen asfaltin tärkein ominaisuus on vedenläpäisevyys. Muita tärkeitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi kyky vastustaa pysyviä muodonmuutoksia ja kulumista. Suurin vaikutus avoimen asfaltin ominaisuuksiin tulee kiviaineksen määrästä ja sideaineen koostumuksesta.

Läpäisevä betoni muodostuu kiviaineksesta, joka sidotaan yhteen sementin avulla. Jotta betonin huokoisuus pysyy riittävällä tasolla, sementtiä tulee olla vain sen verran, että se juuri ja juuri päällystää kiviaineksen ohuella kerroksella. Huokoisuuden takia läpäisevällä betonilla on heikompi puristus- ja vetovoima sekä taivutuslujuus kuin tavallisella betonilla. Läpäisevässä betonissa ei yleensä käytetä hienoainesta, koska se vähentää huokoisuutta. Joissain tilanteissa sitä voidaan käyttää, jos betonimassan lujuutta halutaan kasvattaa.

Läpäisevien päällysteiden pintaosa on erityisen altis tukkeutumiselle. Pintaosan tukkeutumisen takia tukkiva aines ei pääse etenemään syvemmälle rakenteessa. Syvemmälle rakenteeseen tai suodatinkankaaseen asti saattaa kuitenkin päätyä varsinkin hienojakoista materiaalia. Tukkeutumiseen vaikuttaa ajan kuluessa etenkin päällysteen sijainti, huolto sekä puhdistus. Vedenläpäisevyyttä on mahdollista ylläpitää säännöllisen seurannan, huollon ja puhdistuksen avulla. Varsinkin päällysteen ensimmäisten käyttövuosien aikana on syytä seurata säännöllisesti päällysteen vedenläpäisevyyttä. Puhdistustoimenpiteet tulee valita päällysteelle sopivaksi, koska tutkimusten perusteella puhdistusmekanismien tehokkuus vaihteli päällysteiden välillä.

Tätä diplomityötä varten haastateltiin kolmea Suomen kuntaa: Espoota, Oulua ja Vantaata. Haastatteluiden perusteella vaikuttaa siltä, että läpäiseviä rakenteita ei käytetä Suomessa hulevesien hallintaan. Avointa asphalttia käytetään useilla urheilukentillä, mutta sen käyttäminen perustuu ensisijaisesti kenttien toiminnallisuuden parantamiseen eikä hulevesien hallintaan. Haastatteluissa selvisi, että läpäisevien rakenteiden käyttöönottoa hidastaa epätietoisuus rakenteen toimivuudesta ja sen tukkeutumisherkyydestä. Kunnat käyttävät mieluiten varmoja hulevesiratkaisuja, joilla on varmasti pitkä käyttöikä.

Tämän diplomityön perusteella tukkeutuminen on hallittavissa oleva asia. Työ toimii tilannekatsauksena läpäisevien rakenteiden käytöstä muualla maailmassa ja tuo esiin hyviä käytäntöjä riskien ja ongelmien hallitsemiseen. Tulevaisuudessa olisi hyvä tehdä Suomeen pilottikohde, jolla havainnollistettaisiin läpäisevien rakenteiden toimivuutta. Läpäisevien rakenteiden käyttöä voisi lisätä se, että kunnilla olisi käytettävissään esimerkkikohteita läpäisevistä rakenteista ja niiden käyttöiästä sekä huoltotarpeesta.

LÄHDELUETTELO

Al-Rubaei A., Stenglein A. L., Viklander M. & Blecken G-T., 2013. Long-Term Hydraulic Performance of Porous Asphalt Pavements in Northern Sweden. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (6), S. 499-505.

Alvarez A. E., Epps Martin A. & Estakhri C., 2011. A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures. *Construction and Building Materials*, 25. s. 1159-1166.

Beeldens A. & Herrier G., 2006. Water pervious pavement blocks: the Belgian experience. 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, California USA. 12s.

Bendtsen H., Andersen B., Råberg J., Larsen L. E. & Kragh J., 2005. Two-layer porous asphalt for urban roads. *Forum Acusticum*, Budapest, 6 s.

Bendtsen H., Knudsen F., Andersen T. & Iversen L., 2011. European Experience – Winter Service of Porous Asphalt. Report from a scanning tour May 2011. Technical note 123-2012. Denmark: Vejdirektoratet, 34 s. ISBN 9788770607308

Betoni, 2020. Tietoa betonista, perustietopaketti [verkkodokumentti]. Helsinki: Betoniteollisuus ry. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-lujuus/> [viitattu 11.1.2021]

Borgwardt S., 2006. Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement. 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, California USA. 12s.

Chindaprasirt P., Hatanaka S., Chareerat T., Mishima N. & Yuasa Y., 2008. Cement paste characteristics and porous concrete properties. *Construction and Building Materials*, 22, 5, S. 894-901.

Ferguson B. K., 2005. Porous Pavements. Integrative Studies in Water Management and Land Development. CRC Press: Boca Raton, 600 s. ISBN 9780849326707

Foubert F., 2009. European and international geotextile standards. A short guide (revised version). Saatavissa: <https://docplayer.net/65398449-European-and-international-geotextile-standards-a-short-guide-revised-version.html> [viitattu 31.3.2021]

Haapalainen J. & Valtanen M., 2019. Hulevesien hallinnan suunnitteluohje [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun kaupunki, 46 s. Saatavissa: https://www.ouka.fi/documents/64248/18592082/Hulevesiohjeet_Oulu_liitteinen_23052019_pieni.pdf/6b5c15cd-5464-4177-adb0-e6429c04d1e8 [viitattu 22.4.2021]

Hansen K., 2008. Porous Asphalt pavements for Stormwater Management. Design, Construction and Maintenance Guide. Information series 131. Maryland: National Asphalt Pavement Association, 24 s.

Henderson V., 2012. Evaluation of the Performance of Pervious Concrete Pavement in the Canadian Climate. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Waterloo, Ontario, Canada, 292 s.

Hu N., Zhang J., Xia S., Han R., Dai Z., She R., Cui X. & Meng B., 2020. A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement. *Journal of Cleaner Production* 263.

Hyvärinen V. & Puupponen M., 1986. Valunta. Teoksessa: Mustonen M. Sovellettu hydrologia. Helsinki: Vesiyhdistys r.y., s. 152-223. ISBN 951-95555-1-X

Interpave, 2018. Design & construction of concrete block permeable pavements, Edition 7, 84 s.

Kevern J. T., 2008. Advancements in pervious concrete technology. A dissertation submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. 118 s.

Kevern J. T., 2010. Maintenance and Repair Options for Pervious Concrete. Conference paper: Low Impact Development International Conference (LID) 2010. 16 s.

Kling T., Holt E., Kivikoski H., Korkealaakso J., Kuosa H., Loimula K., Niemeläinen E. & Törnqvist J., 2015. Vettä läpäisevät päällysteet – Käsikirja suunnitteluun, rakentamiseen ja ylläpitoon. Helsinki: VTT, 59 s. ISBN 978-951-38-8198-6

Kotola J. & Nurminen J., 2003. Kaupunkialuiden hydrologia – valunnan ja ainehuuhtouman muodostuminen rakennetuilla alueilla. Osa 1: kirjallisuustutkimus. Espoo: Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen laboratorio, 93 s. ISBN 951-22-6496-X

Kotola J. & Nurminen J., 2005. Kaupunkirakentamisen hydrologiset vaikutukset. Teoksessa: Vakkilainen P., Kotola J. & Nurminen J. (toim.) Rakennetun ympäristön valumavedet ja niiden hallinta. Helsinki: Ympäristöministeriö, s. 12-31. ISBN 951-731-318-7

Kuosa H., Niemeläinen E., Kivikoski H. & Törnqvist J., 2014b. Pervious pavement winter performance. State-of-the-Art and recommendations for Finnish winter conditions. Helsinki: VTT. Saatavissa: https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2014/VTT_R_08223_13.pdf [viitattu 25.4.2021] 29 s.

Kuosa H., Niemeläinen E. & Loimula K., 2013. Pervious pavement systems and materials [verkkodokumentti]. Helsinki: VTT. Saatavissa: https://projectsites.vtt.fi/sites/class/www.vtt.fi/sites/class/en/Documents/D2_1_CLASS_WP2_SOTA_Permeable_Pavement_systems_and_materials.pdf [viitattu 20.1.2021]. 95 s.

Leca, 2021. Geotekniikka, Kevytsoran materiaaliominaisuudet [verkkodokumentti]. Helsinki: Leca Finland Oy. Saatavissa: <https://leca.fi/ratkaisut/geotekniikka/kevytsoran-materiaaliominaisuudet/> [viitattu 30.3.2021]

Leming L. M., Malcom H. R. & Tennis P. D., 2007. Hydrologic design of pervious concrete. Illinois: Portland Cement Association, 72 s. ISBN 978-0-89312-255-3

Liikennevirasto, 2018. Tierakenteen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 38/2018 [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf [viitattu 7.5.2021]

Loimula K. & Kuosa H., 2013. The impact of pervious pavements on water quality. Helsinki: VTT, 16 s. Saatavissa: https://projectsites.vtt.fi/sites/class/www.vtt.fi/sites/class/en/Documents/D2_2_CLASS_WP2_SOTA_Water_Quality.pdf [viitattu 26.4.2021]

Lucke T. & Beecham S., 2011. Field Investigation of Clogging in a Permeable Pavement System. *Building Research and Information*, 39 (6), S. 603-615.

Mata L. A., 2008. Sedimentation of pervious concrete pavement systems. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. 288 s.

Napa – National Asphalt Pavement Association, 2003. Design, Construction and Maintenance Guide for Porous Asphalt Pavements. Information Series 131, 16 s.

PANK ry, 2018. Asfalttinormit 2017. 2 painos. Helsinki: PANK ry, 122 s. ISBN 978-952-99985-2-4

Poulikakos L. D., Pittet M., Arnaud L., Junod A., Gubler R., Simond E., Partl M. & Dumont A-G., 2006. Mechanical Properties of Porous Asphalt, Recommendations for Standardization. Dübendorf: VSS Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute. Forschungsauftrag 1999/280, 110 s.

Qiu Q. Y. & Guan Y. B., 2011. Permeability Model of Porous Asphalt Mixture. International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE).

Rinta-Hiiro V., 2019. Lämpäisevien päällysteiden käyttökokemuksia CLASS-pilottikohteissa, seminaariesitys Hulevesiseminaarissa 2019.

Rinta-Hiiro V., 2020. Haastattelu etäyhteydellä 10.3.2021.

Rizvi R., Tighe S., Henderson V. & Norris J., 2009. Evaluating the Use of Recycled Concrete Aggregate in Pervious Concrete Pavement. *Transportation Research Record Journal*, 2164 (1), S. 132-140.

Ronkainen N., 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, 62 s. ISBN 978-952-11-3975-8

Ross T. C., 2012. Power washing restores porous pavement. *Asphalt Pavement Magazine*, 17 (4), S. 42-43

Smith D. R., 2006. *Permeable Interlocking Concrete Pavements – Selection Design Construction Maintenance In addition guide specifications. Third Edition.* Washington: ICPI. Saatavissa: https://www.idealconcreteblock.com/tl_files/pages/designers/know-green/PICP_Manual_3rd_edition.pdf [viitattu 26.1.2021]. 62 s

Standardi SFS-EN 13108-7. Bituminous mixtures. Material specifications. Part 7: Porous Asphalt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Suomen Kuntaliitto, 2012. *Hulevesiopas.* Helsinki: Suomen Kuntaliitto, 150 s. ISBN 978-952-213-896-5

Suresha S. N., George V., Ravi Shankar A. U., 2010. Effect of aggregate gradations on properties of porous friction course mixes. *Materials and Structures*, 43 (6), S. 789-801.

Swan D. J. & Smith D. R., 2009. Development of the permeable design pro permeable interlocking concrete pavement design system. 9th International Conference on Concrete Block Paving. 8s.

Tennis P. D., Leming M. L. & Akers D. J., 2004. Pervious Concrete Pavements. Illinois: Portland Cement Association, 32 s. ISBN 0-89312-242-4

Yang J. & Jiang G., 2003. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. Cement and Concrete Research, 33 (3), S. 381-386.

Vantaan kaupunki, 2009. Hulevesiohjelma. Vantaa: Vantaan kaupunki, 36 s. Saatavissa: https://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaawwws-structure/124676_Hulevesiohjelma_nettiin.pdf [viitattu 20.4.2021]

Vantaan kaupunki, 2014. Vantaan kaupungin hulevesien hallinnan toimintamalli. Vantaa: Vantaan kaupunki, 51 s. Saatavissa: https://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaawwws-structure/120411_Hulevesien_hallinnan_toimintamalli.pdf [viitattu 20.4.2021]

Vienonen S., Rintala J., Orvomaa M., Santala E. & Maunula M., 2012. Ilmastonmuutoksen vaikutukset ja sopeutumistarpeet vesihuollossa. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, 90 s. ISBN 978-952-11-4046-4

Virginia DCR, 2011. Stormwater design specification No. 7: Permeable pavement. Version 1.8, 25 s. Saatavissa: https://www.swbmp.vwrrc.vt.edu/wp-content/uploads/2017/11/BMP-Spec-No-7_PERMEABLE-PAVEMENT_v1-8_03012011.pdf [viitattu 12.5.2021]

Wahlgren I. & Kling T., 2014. Kaupunkien tarpeet. Helsinki: VTT. Saatavissa: https://projectsites.vtt.fi/sites/class/www.vtt.fi/sites/class/en/Documents/D1_1_CLASS_WP1_Report_Urban_Needs.pdf [viitattu 25.4.2021]

Wang K., Schaefer V. R., Kevern J. T., Suleiman M. T., 2006. Development of Mix Proportion for Functional and Durable Pervious Concrete. NRMCA Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete. Nashville, TN, 12 s.

Waniliesta M. & Chopra M., 2007. Performance Assessment of Portland Cement Pervious Pavement. Report 2 of 4: Construction and Maintenance Assessment of Pervious Concrete Pavements. Florida: Stormwater Management Academy. 183 s.

Zhou H., Li H., Abdelhady A., Liang X., Wang H. & Yang B., 2019. Experimental investigation on the effect of pore characteristics on clogging risk of pervious concrete based on CT scanning. Construction and Building Materials, 212, S. 130-139.

Liite 1. Haastattelukysymykset

Kaavoitus

- Miten läpäisevät rakenteet huomioidaan kaavoituksessa ja kaavamääräyksissä?
- Onko läpäisevien rakenteiden käytöstä tehty kaavamääräyksiä?
- Vaikuttaako ilmastonmuutos kaavoitukseen hulevesien osalta?

Suunnittelu

- Onko läpäiseviä rakenteita toteutettu?
 - o Jos kyllä, minkälaisia kohteita on toteutettu?
 - o Jos ei, onko jokin rajoittava tekijä?
- Minkälaisia vaatimuksia ja suunnitteluohjeita läpäiseville rakenteille on?
 - o Onko vaatimuksilla ja ohjeilla päästy asetettuihin tavoitteisiin?
- Miten pitkään läpäiseviä rakenteita on käytetty kunnassa
- Miten ilmastonmuutos huomioidaan suunnittelussa?

Käyttö ja kunnossapito

- Minkälaisilla toimenpiteillä läpäiseviä rakenteita huolletaan?
- Miten tiheästi huoltotoimenpiteitä vaaditaan?
- Onko läpäisevien rakenteiden ja perinteisten rakenteiden elinkaarissa eroja?
 - o Miten käytön elinkaari on arvioitu
- Minkälainen kustannusvaikutus läpäisevillä rakenteilla on perinteisiin rakenteisiin verrattuna?
 - o Voiko tukkeutuminen olla ongelma kustannushyödyn suhteen?
- Mitä haasteita läpäisevien rakenteiden käytössä on?
- Onko alueilta, joissa on läpäiseviä pintoja, kokemuksia niiden toimivuudesta?