

Mikael Nieminen

**BETONILATTIAN SIROTEPINNAN IR-
TOAMISSYYN ANALYSOINTI**
Case-tutkimus teollisuushallin lattiasta

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Nina Lindberg
05/2023

TIIVISTELMÄ

Mikael Nieminen: Betonilattian sirotepinnan irtoamissyyn analysointi – case-tutkimus teollisuushallin lattiasta (Analyzing the causes to a dry shake surface coming off – a case study of an industrial floor)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

5/2023

Kuivasirotepinainen betonilattia on yleinen suurelle kulutusrasitukselle altistuvissa teollisuusrakennuksissa. Tässä työssä tutkittavassa case-kohteessa ulkoisesti onnistuneelta vaikuttanut sirotepinta irtosi odottamattomasti alustastaan noin puoli vuotta lattian valamisen jälkeen. Kuivasirote on betonin kaltainen tuote, jonka sideaineena käytetään usein sementtiä. Jo yksin sirotteen sisältämän sementin sitoutumiseen vaikuttavat monet tekijät aina alusbetonin ominaisuuksista ympäröivään lämpötilaan. Tästä syystä sirotepinnan vajavaisen kiinnittymisen voi aiheuttaa huomattavan moni asia, ja irtoamissyyn analysointi vaatii ymmärrystä niin työmenetelmistä ja materiaaleista kuin olosuhteistakin. Tämän työn tavoite on koota yhteen sirotepinnan onnistumisen kannalta kriittiset tekijät sekä niiden analysointimenetelmät, ja kerättyjä tietoja hyödyntäen todeta kohteen pinnan irtoamisen syy.

Tutkimus on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osuudessa esitellään kirjallisuustutkimuksella hankittuja tietoja sirotepinnan onnistumisen vaatimuksista sekä tässä työssä käytettävistä analysointimenetelmistä. Toisessa osuudessa esitellään case-kohde ja siitä haastatellen saatavilla olevat tiedot, sekä tutkitaan ensisijaisesti ohuthienäytteiden kuvien perusteella sirotepinnan irtoamissyitä. Selvitetyt asiat kootaan yhteen johtopäätösosiossa, jossa irtoamiselle pyritään mahdollisimman tarkasti määrittämään syy. Johtopäätösosiossa esitetään vaiheet lopputulokseen päätymiseksi, perustellaan irtoamisen aiheuttajaksi valitun tekijän merkittävyys suhteessa muihin mahdollisiin irtoamisen aiheuttajiin sekä arvioidaan analyysin virheen mahdollisuuksia.

Tutkimuksen lopputuloksena sirotepinnan irtoamissyiksi todetaan alusbetonin liiallinen huokoisuus. Havaittu runsas huokoisuus vastaa kooltaan suojahuokoisuutta, mikä ei ollut odotettavissa, sillä betoni oli sirotteen rajoitteet tiedostaen tilattu huokostamattomana. Betonin korkean suojahuokoisuuden aiheuttajaa ei tässä työssä voitu selvittää saatavilla olevien tietojen perusteella.

Ohuthienien todenmukainen tulkitseminen on haastava ja ammattitaitoa vaativa tehtävä, ja saavutettu johtopäätös voi olla tulkitsijasta riippuvainen. Haasteita tutkimukselle asettivat case-kohteesta olemassa olevien tutkimustulosten saatavuus sekä sirotepintaisten ohuthienäytteiden tulkinnasta saatavilla olevan tiedon vähäisyys.

Avainsanat: betoni, betonilattia, kuivasirote, sirotepinta, ohuthie, ohuthietutkimus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty osana rakennustekniikan tutkinto-ohjelmaa, toimeksiantona Betoniteam Oy:lle. Työni aiheeksi oli luontevaa valita betoni, sillä tähänastinen työkokemukseni rakennusalalla on karttunut toimeksiantajani alaisena betonirakentamisen ja -tuotannon parissa. Aiheena betonin analysoiminen oli minulle työn alkaessa vierasta mutta kiinnostavaa, joten työ motivoi minua alusta alkaen. Työn aikana ymmärrykseni aiheesta ja tutkimuksen tekemisestä laajeni, ja edistyminen ruokki edelleen mielenkiintoani työskentelyä kohtaan.

Betoniteam Oy on työnantajana tarjonnut minulle mainioita mahdollisuuksia hankkia kokemusta betonista alan ammattilaisten reilussa ja asiantuntevassa ohjauksessa, joten toimeksianto oli minulle aidosti mieluinen tehtävä. Ilmapiiri työyhteisössä on aina ollut kannustava, ja kokemus työmailta sekä betonitehtaalta ovat auttaneet aikaisemmin kokematon tekijää hahmottamaan käytännön toimia ja arvioimaan ratkaisujen käytännöllisyyttä.

Kiitokset Betoniteam Oy:n Perttu Holopaiselle ja Jani Ojalalle mainiosta kandidaatintyön aiheesta ja ohjauksesta sen ympärillä. Kiitos niin ikään Tampereen yliopiston ohjaajalleni Nina Lindbergille, joka on alusta asti innostavasti ja varmuudella ohjannut kirjoitustyötäni eteenpäin.

Erityiskiitos myös Timo Lintulahdelle, joka alun perin tarjosi koulupojalle mahdollisuuden päästä oppimaan oikeita töitä.

Tampereella, 16.5.2023

Mikael Nieminen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	5
1.1 Työn tausta, tavoite ja tutkimuskysymykset.....	5
1.2 Aiheen rajaus, tutkimusmenetelmät ja työn rakenne	6
2. TEORIA	7
2.1 Kuivasirote lattiapintana	7
2.2 Sirotepinnan alusbetoni.....	8
2.2.1 Betonin valmistus ja kuljettaminen	8
2.2.2 Sementti ja vesi	9
2.2.3 Kiviaines	9
2.2.4 Betonin huokosrakenne	10
2.2.5 Betonin seosaineet	11
2.2.6 Betonin lisäaineet.....	11
2.2.7 Betonin lujuus	13
2.2.8 Betonin lämpö.....	13
2.3 Sirotepintaisen betonilattian työstäminen	13
2.4 Olosuhteiden vaikutus sirotepinnan kiinnittymiseen	15
2.5 Tutkimusmenetelmät irtoamissyyn selvittämiseksi	16
2.5.1 Ohuthietutkimus.....	16
2.5.2 Vesipunnitus	18
2.6 Ohuthienäytteistä tulkittavat ominaisuudet	18
3. CASE-KOHDE	21
3.1 Case-kohteen sirotteen käyttöohjeet ja vaatimukset.....	21
3.2 Olosuhteiden ja työsuorituksen kuvailu	22
3.3 Vesipunnituksen tulosten tulkinta	23
3.4 Ohuthien näytekohtainen tulkinta	23
3.4.1 Näyte 1	24
3.4.2 Näyte 2	26
3.4.3 Näyte 3	28
3.4.4 Näyte 4	30
3.4.5 Näyte 5	31
4. JOHTOPÄÄTÖKSET JA VIRHEARVIO.....	35
4.1 Irtoamisen syy.....	35
4.2 Analyysin virhearvio	37
LÄHTEET	38

1. JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö käsittelee betonilattian sirotepinnan irtoamissyyn analysointia. Tutkimuksen keinoina käytetään kirjallisuustutkimusta, data-analyysiä, tapaus- sekä haastattelututkimusta.

1.1 Työn tausta, tavoite ja tutkimuskysymykset

Sirotepintaisen betonilattian onnistumiseen liittyy monia tekijöitä, minkä vuoksi epäonnistumisen syyn osoittaminen valmiista lattiasta on usein hankalaa. Suomen Betonilattiaiyhdistyksen (2017, s. 3) mukaan 13% heille vuosina 1988-2016 osoitetuista lausuntopyynnöistä liittyi sirotepinnan epäonnistumiseen jollain tavalla.

Tässä työssä käsiteltävässä tapauksessa teollisuushallin sirotepintaisen lattian pinta alkoi yllättäen irtoilla noin puolen vuoden kuluttua valmistamisesta. Pinnan irtoamisella tarkoitetaan lattian pinnan sirotetta sisältävän kerroksen irtoamista lattian alusbetonista. Kohteessa pinnan irtoaminen ei ollut odotettavissa, sillä materiaalien valinnan ja työsuorituksen osilta lattian valmistus oli onnistunut valuvaiheessa nähtäviltä osin hyvin. Irtoamisen syiden selvittämiseksi rakennetta tutkittiin poralieriönäytteiden avulla.

Käsiteltävässä tapauksessa työstövaihe ja jälkihoito oli urakoitsijan mukaan onnistunut täysin ohjeistusten mukaisesti. Kohteen betonin sekä siroteen toimittivat urakoitsijan ulkopuoliset tahot. Koska yksiselitteistä syytä irtoamiselle ei voitu ilman tarkempia tutkimuksia osoittaa, riippumaton tutkimuslaboratorio selvitti irtoamisen syytä. Kohteesta porattiin näytteitä, joille suoritettiin ohuthie- ja vesipunnitustutkimukset. Pinnan epäonnistuminen huomataan usein vasta kauan betonin kovettumisen jälkeen, mikä rajoittaa käytössä olevia SFS-standardoituja analysointimenetelmiä.

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on koota yhteen tekijöitä, joita sirotepinta lattiassa edellyttää onnistuakseen, ja hyödyntää niitä case-tapauksen analysoinnissa. Vaikuttavat syyt ja niiden osuudet ovat tapauskohtaisia, mutta teoriat ongelmien takana pätevät yleisesti. Tietoisuus eri tekijöiden vaikutuksista lopputulokseen auttaa niin urakoitsijaa työmaalla kuin betonitoimittajaakin. Lopulta onnistuneen työn ansiosta hyvin toimiva lattia hyödyttää myös sen käyttäjiä.

Tämä työ vastaa kysymyksiin siitä, mitä ovat toimivan sirotepinnan edellytykset niin alusbetonilta kuin työstöltä ja olosuhteiltakin, sekä miten niiden vaikutusta pinnan irtoamiseen tutkitaan. Selvitettyjä toimintavaatimuksia hyödyntäen vastataan siihen, mitkä tekijät voivat myötävaikuttaa sirotepinnan irtoamiseen. Kootun teorian tiedon

pohjalta analysoidaan tutkimustuloksia ja tehdään arvio siitä, mikä aiheutti case-tapauksessa sirotepinnan irtoamisen.

1.2 Aiheen rajaus, tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Tutkimus rajataan koskemaan kuivasirotepinntaisia betonilattioita sekä tarkemmin case-kohteen lattiaa. Tutkimuksen käsittelemä lattia on monin tavoin sirotepinntaisten lattioiden peruseräiteiden alainen, joten sen toiminnan edellytyksiä on tutkittava yleisellä tasolla. Tutkimusmenetelmänä käytetään pääasiallisesti kirjallisuustutkimusta, mutta tutkimus sisältää tiedonhankintaa myös urakoitsijan edustajia haastatteleamalla sekä kohteesta porattuja näytteitä analysoimalla. Kohdetta käsitellään anonyymisti mahdollisten asianosaisten suojaamiseksi. Kohteen työsuoritukseen ja olosuhteisiin liittyvien tietojen selvittämiseksi haastateltiin Betoniteam Oy:n toimitusjohtaja Perttu Holopaista 21.4.2023.

Tutkimuksen toisessa luvussa perehdytään aluksi teorialiedon pohjalta kuivasirotteeseen ja sen käytön edellytyksiin. Läpikäytäviä asioita ovat muun muassa alusbetonille asetetut vaatimukset sekä olosuhteiden ja työmenetelmien vaikutukset sirotteen käytettävyyteen. Teorialuvun lopussa käsitellään myös tutkimusmenetelmät rikkoutumissyyn selvittämiseksi sekä tutkimusten tulkitsemisen keinoja. Kolmannessa luvussa analysoidaan olemassa olevien näytteiden pohjalta case-kohteen sirotepinnan irtoamisen syitä, hyödyntäen toisessa luvussa selvitettyä teoria- ja tuotetietoa. Tutkimuksen neljäs luku sisältää johtopäätökset siitä, mikä aiheutti kohteen sirotepinnan irtoamisen, sekä virhearvion auttamaan lukijaa tutkimustuloksen oikeellisuuden arvioimisessa.

Yliopisto ei vastaa työssä esitetyistä case-tapausta koskevista kannanotoista tai niiden oikeellisuudesta. Kyseessä on opiskelijan opinnäytetyö, ei yliopiston virallinen kanta asiaan.

2. TEORIA

Tutkittavan kuivasirotepinntaisen betonilattian rikkoutumisen syiden selvittämiseen tarvitaan tietoa lattiaan käytettävien materiaalien toiminnasta sekä rakenteen analysointimenetelmistä. Teoriaosuus käsittelee ensin lattian valmistusvaiheessa merkittävät asiat, jonka jälkeen esitellään, millaisilla menetelmillä kunkin vaikutusta sirotepinnan epäonnistumiseen voidaan arvioida valmiista rakenteesta.

2.1 Kuivasirote lattiapintana

Kun suunniteltavan kohteen lattian pintaan kohdistuva mekaaninen rasitus on erityisen suurta, on se tarpeellista ottaa huomioon lattian suunnittelussa. Kun lattian pintarakenne kestää siihen kohdistuvat rasitukset hyvin, pysyy se käyttökelpoisena pitkään (PiiMat Oy). Kuivasirotepinna on yksi lattian kulutuskestävyyden parantamiseksi kehitetyistä rakenneratkaisuista.

Sirotepinntan toimintaperiaatteena on muodostaa lattiabetonin pintaan ohut ja kulutusta kestävä kerros, jolloin lattiaan käytetyn betonin ei tarvitse olla kulutuskestävyydeltään pinnan asettamien vaatimusten mukaista (BY45 2014, s. 155). Sirotepinntainen lattia soveltuu ominaisuuksiensa puolesta hyvin kohteisiin, joissa lattiaan kohdistuu suuria piste-, isku- tai pyöräkuormia, eli usein käyttökohteena ovat raskaan teollisuuden käyttöön valmistettavat lattiat. Sirotepinntan käyttö voi olla perusteltua myös pienemmän rasituksen kohteissa, sillä esimerkiksi kuitubetonista valetussa lattiassa voidaan sirotepinntaa käyttämällä vähentää pinnalle jäävien kuitujen määrää. (BLY, 2013 s. 2, 5) Sirotepinntan avulla voidaan lisäksi saavuttaa lattialle parempi suoja likaa ja nesteiden tunkeumaa vastaan (PiiMat Oy).

Kuivasirote on jauhemainen valmistuote. Se sisältää pääosin sementtiä ja kovaa runkoainesta sekä mahdollisesti esimerkiksi polymeerikuituja, eli kuivasirote on kuin betonia, johon täytyy lisätä vesi. (PiiMat Oy) Suomen Betonilattiyhdistyksen (2013, s. 3) mukaan kuivasirotepinntaa käyttämällä voidaan betonilattian pinnalle saavuttaa jopa viisinkertainen kulutuskestävyys paljaaseen betonipintaan verrattuna. Kulutuskestävyyttä määritettäessä mitataan betonipinnan kestävyyttä standardoidun mittalaitteen aiheuttamaa kulutusta vastaan (BY201 2018, s. 412). Kulumisessa mekaaniset rasitukset aiheuttavat hienoaineksen irtoamista lattiapinnasta, jolloin hiontavaikutus kasvaa (BY201 2018, s. 409).

Sirotepinna aiheuttaa rakennusvaiheessa lisäkustannuksia materiaalikustannusten ja lisätyön vuoksi, mutta se on silti edullinen ratkaisu korkeaa kulutuskestävyyttä tavoiteltaessa (PiiMat Oy). Sirotetta kuluu halutusta kulutuskestävyydestä ja käytetystä tuotteesta riippuen yleensä noin kuusi kilogrammaa neliometriä kohden (BLY 2013, s. 16). Sirotepinnan työstäminen on aikaa vievä prosessi, sillä sirotepintainen lattia täytyy hiertää useammin kuin tavallinen betonilattia, ja hiertojen välissä on odotettava pinnan kuivumista (BLY 2013, s. 21).

2.2 Sirotepinnan alusbetoni

Kuivasirote levitetään valun yhteydessä tuoreen betonin päälle ja hierretään kiinni alla olevaan betonikerrokseen. Tällöin lattian pintaan muodostuu kova, runkobetoniin homogeenisesti kiinnittynyt kerros (PiiMat Oy).

Koska sirotepinna kiinnittyy sekoittamalla betoniin, lopputuloksen kannalta on merkitystä sekä runkobetonin laadulla että työvaiheiden oikea-aikaisuudella (BLY, 2013 s. 3). Alusbetonissa sirotepinnan onnistumiselle merkittäviä ominaisuuksia ovat valmistaminen ja kuljetus, lisä- ja seosaineiden määrä ja laatu, betonin lujuusluokka sekä betonin lämpötila.

2.2.1 Betonin valmistus ja kuljettaminen

Betoni koostuu kolmesta päätekijästä: sementistä, vedestä ja kivisestä runkoaineesta. Betoni voi päätekijöidensä lisäksi sisältää myös seosaineita sekä lisäaineita (BY201 2018, s. 60). Lattiabetoni valmistetaan yleensä valmisbetoniasemilla sekoittamalla aineet betonimyllyssä. Betonin tasaisen laadun varmistamiseksi valmisbetoniasemilla tulee olla asianmukaiset laitteet niin osa-ainesten määrien mittaamiseen, kuin niiden sekoittamiseenkin. (BY201 2018, s. 300) Tasalaatuinen betoni on edellytys tasalaatukselle lopputulokselle myös sirotetta käytettäessä.

Tehtaalta betoni kuljetetaan työmaalle säiliöautoilla. Kuljetuksen aikana tulee kuljetusauton säiliön pyöriä, jotta ainekset jatkavat sekoittumistaan. Kuljetuksen aikainen sekoittaminen parantaa betonimassan notkeutta, vähentää kiviaineksen erottumista ja ylläpitää betonin ilmapitoisuutta. Liian nopea tai pitkäaikainen jälkisekoitus voi kuitenkin johtaa ilmapitoisuuden liialliseen kasvuun, mikä voi aiheuttaa betonin loppulujuuden alenemista. (BY201 2018, s. 317–318)

Työmaalla betoni usein pumpataan kohteeseen esimerkiksi erillisen autobetonipumpun tai kuljetusautoon integroidun betonipumpun avulla. Pumpattaessa betonin vapaan pudotuskorkeuden tulee olla korkeintaan 1–1,5 m erottumisen välttämiseksi. (BY201 2018, s. 333) Erottumisen voi aiheuttaa ongelmia sirotteen kiinnittymisessä, sillä betonimassan

erottuessa sirotteen alle muodostuu vähän kiviainesta sisältävä heikompi kerros (BLY 2013, s. 10).

2.2.2 Sementti ja vesi

Betonin ainesten sekoituessa sementti reagoi veden kanssa, ja tämän hydrataatioksi kutsutun kemiallisen reaktion tuloksena syntyvä sementtiliima sitoo runkoaineksen yhteen. Veden ja sementin suhde on merkittävä tekijä betonin loppulujuudessa. Vesi-sementtisuhde lasketaan kaavalla

$$w = \frac{v}{s}, \quad (1)$$

missä w on vesi-sementtisuhde, v veden massa ja s sementin massa. (BY201 2018, s. 37)

Sementin täydellinen hydratoituminen edellyttää teoriassa vähintään vesi-sementtisuhdetta 0,25, eli vettä pitäisi olla vähintään 25 % sementin painosta. Vettä kuitenkin sitoutuu myös betoniin muodostuviin geelihuokosiin, joten käytännössä täydellinen hydrataatio vaatii vesi-sementtisuhteen 0,45. (BY201 2018, s. 81)

Kuivasirotteen toimintatapa perustuu hydrataatioreaktioon, mistä johtuen betonin vesi-sementtisuhteella on vaikutusta myös kuivasirotteen käytössä. Suomen Betonilattiyhdistys (2013, s. 7) arvioi, että sirote vaatii betonipinnalta keskimäärin litran vettä lattianeliometriä kohden toimiakseen oikein, kun sirotetta käytetään 6 kg/m^2 . Suositeltu vesi-sementtisuhde sirotetta käytettäessä on yli 0,5 (BLY 2013, s. 7).

Sementin hienojakoisuus voi vaikuttaa sirotteen toimintaan. Karkeampi sementti helpottaa sirotteen sitoutumista, sillä se nostaa betonin pintaan hienojakoisempaan sementtiin verrattuna enemmän vettä. (Finnsementti Oy)

Erilaiset sementtityypit voivat tuoda lattialle hyödyllisiä ominaisuuksia, kuten resistanssia kemikaaleja vastaan tai miellyttävämmän ulkonäön. Lattiassa betonin kuivumisesta aiheutuvaa kutistumaa ja pinnan halkeilua voidaan vähentää esimerkiksi käyttämällä SR-sementtiä, joka kasvattaa myös lattian sulfaatinkestoa (Finnsementti Oy). Kutistumasta aiheutuvan halkeilun vähentäminen on hyödyksi myös sirotetta käytettäessä.

2.2.3 Kiviaines

Kivi- eli runkoaines muodostaa suurimman osan, keskimäärin noin 65–80 % betonin tilavuudesta ja massasta. Kiviaines on rakeista, ja yleisimmin rakeet ovat kooltaan 0–64 mm. Betoni sisältää yleensä laadusta riippuen erilaisen yhdistelmän sekä hienojakoista

hiekkaa että suurempirakeista kiviainesta. Kiviaineksen tulee olla laadultaan sellaista, ettei se laske betonin käyttöikää tai osallistu sementin ja veden reaktioon. (BY201 2018, s. 43–51)

Talviolosuhteissa kiviaines voi aiheuttaa poikkeuksia betonin vesimäärässä, sillä sen mukana betoniaseman kiviainessiiloon voi päätyä lunta ja jäätä, mistä johtuen massan vesi-sementtisuhte voi vaihdella jopa kuormittain (BY201 2018, s. 502). Vesi-sementtisuhteen epätasaisuus tekee betonimassan soveltuvuudesta sirotteelle vähemmän ennakoitavan.

Sirotteen käytön yhteydessä Suomen Betonilattiyhdistys (2013, s. 6) suosittelee lattiat betonin maksimiraekooksi 16–32 mm. Joidenkin sirotteiden käyttöohjeessa kielletään tuotteen käyttö alusbetonilla, jonka runkoaines sisältää kalsiumkloridia, suolavettä tai suolaa (Mastertop 450 2006). Kloridien määrä sisämaasta otetussa kiviaineksessa on kuitenkin normaalisti hyvin vähäinen (BY201 2018, s. 52).

2.2.4 Betonin huokosrakenne

Betonin tilavuudesta vähintään 1–2 % on erilaisia huokosia. BY201:n (2018, s. 81–84) mukaan huokokset luokitellaan pienimmästä suurimpaan seuraavasti:

- Geelihuokokset ovat betonin pienimpiä huokosia, kooltaan vain noin 0,001–0,002 µm. Geelihuokokset muodostuvat, kun sementtiliimaan muodostuvien geelikiteiden väliin jää veden täyttämää tilaa.
- Kapillaarihuokokset muodostuvat geelihuokosten tapaan sementtigeelin sekaan jääneestä vedestä. Kapillaarihuokokset ovat kooltaan noin 1 µm, ja ulkoa tuleva vesi mahtuu liikkumaan niitä pitkin betonin sisään.
- Suojahuokokset tehdään betoniin tarkoituksellisesti lisäaineiden avulla. Niiden tarkoitus on vastaanottaa betonin jäätyessä veden aiheuttama paine, ja näin suojata betonin rakennetta rikkoutumiselta. Suojahuokosten koko on noin 0,01–0,8 mm.
- Tiivistyshuokokset ovat kooltaan yli 0,8 mm, ja ne syntyvät betonia työstettäessä, kun ilmaa ja vettä jää onteloiksi märän betonin alle. Tiivistyshuokosten määrää pyritään vähentämään tiivistämällä betonia täryttämällä tai pinnan tapauksessa hiertämällä.

Betonin ilmamäärä lisää sen pakkasenkestoa, ja säänkestävissä betoneissa on huokosia yleensä 4–8 % kokonaistilavuudesta. Huokoisuus kuitenkin heikentää betonin lujuutta, ja yhden prosenttiyksikön lisäys huokosten määrässä vähentää betonin lujuutta noin viidellä prosentilla. (BLY 2013, s. 9)

Sirotepintaa hierrettäessä tuoreen betonin huokokset voivat siirtyä alusbetonin pintaan eli sirotepinnan alaosiin, ja muodostaa tasomaisen huokoskerroksen. Huokoskerroksesta johtuen sirotepinnan tartunta heikkenee, mikä voi aiheuttaa pinnan irtoamisen alusbetonista. Tästä johtuen kuivasirotetta ei suositella käytettäväksi lisähuokostetun betonin kanssa. (BLY 2013, s. 9) Sirotteelle suositeltu betonin maksimi-ilmamäärä voi kuitenkin olla valmistaja- ja tuotekohtainen.

2.2.5 Betonin seosaineet

Betonin toimintaa voidaan muokata halutunlaiseksi seosaineilla, jotka voivat toimia osana niin side- kuin runkoainettakin. Niillä voidaan esimerkiksi hidastaa betonin lämmönkehitystä tai kasvattaa betonin lujuutta. (BY201 2018, s. 56–58)

Suomen Betonilattiyhdistys (2013) tai Betoniyhdistys (2018) eivät esitä seosaineiden käytölle sirotteen yhteydessä tavallisesta betonin valmistuksesta poikkeavia rajoituksia. Seosaineilla voi kuitenkin olla välillisiä vaikutuksia sirotteen kiinnittymiseen, sillä Betoniyhdistyksen (2018) mukaan seosaineet voivat aiheuttaa betonissa muun muassa poikkeavaa vedentarvetta tai sementin hydrataation hidastuvaa reaktionopeutta. Ellei seosaineiden aiheuttamia muutoksia huomioida asianmukaisesti, voi sirotteelle tarpeellinen vesi jäädä liian vähäiseksi, tai talviolosuhteissa lämpötila laskea lujuudenkehityksen kannalta liian nopeasti.

Käytettäessä seosaineena sitoutumista hidastavia aineita kuten masuunikuonaa, kasvaa plastisesta painumasta aiheutuvan halkeilun riski. Plastisessa painumassa muita osaineita kevyempi vesi nousee betonin pintaan muiden osa-aineiden painuessa kohti rakenteen pohjaa, jolloin valettu pinta saattaa painua raudoitusten kohdalla ympäröivää massaa alemmas. Tällöin raudoituksen kohdalle voi muodostua halkeama. (BY201 2018 s. 76) Plastinen painuma on otettava huomioon myös sirotepinnan tapauksessa.

2.2.6 Betonin lisäaineet

Betonin ominaisuuksia voidaan muokata myös lisäaineilla, kuten esimerkiksi huokostin, notkistin tai hidastin. Osa lisäaineista on tarkoitettu tuoreen betonimassan, ja osa kovettuneen betonin ominaisuuksien muokkaamiseen. Lisäaineiden osuus betonin osaineista on huomattavasti muita pienempi, ja Betoniyhdistys (2018, s. 60) esittää, ettei lisäaineiden määrän tule ylittää 50 grammaa sementtikiloa kohden. Lisäaineet ovat nykyisin hyvin yleisiä valmisbetoniteollisuuden käytössä.

Sirotteen käytettävyyden kannalta merkittävimpiä lisäaineita ovat huokostin ja notkistin (BLY 2013 s. 10). Kohdan 2.2.4 mukaisesti huokostimen käyttöä ei suositella sirotepin-taisen lattian valmistuksessa, sillä huokokset voivat hirtäessä nousta sirotteen alapin-taan heikentäen tartuntaa.

Notkistavaa lisäainetta käytettäessä betonista saadaan hyvin työstettävää jopa 30 % pienemmällä vesimäärällä (BY201 2018, s. 62). Notkistimen käyttö on hyödyksi lattian työstövaiheessa, sillä notkeampi betoni on helpompaa levittää. Suomen Betonilattiyh-distyksen (2013) mukaan notkistimen käyttö liiallisissa määrin voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia usealla eri tavalla. Epätoivottavana vaikutuksena notkistin vähentää veden nousua alusbetonin pintaan, jolloin sirotteen sisältämän sementin hydrataatio voi jäädä epätäydelliseksi. Pintaan nouseva vesi voi paikoin jopa korvautua notkistavalla lisäai-neella. Lisäksi kovin notkean betonin kiviaines erottuu herkästi valun pohjalle. Notkistin voi myös hidastaa betonin sitoutumista, mikä aiheuttaa ongelmia sirotteen alusbetoniin kiinnittävän hierron ajoittamisessa oikein. (BLY 2013, s. 10)

Lisäaineiden käytön muita ongelmia ovat olleet muun muassa notkistimen ja huokosti-men yhteisvaikutukset, sekä sekoituksen aiheuttamat epäsäännöllisyydet betonin huokoisuudessa. Aalto-yliopiston toteuttama ”Robust Air” -tutkimus (Punkki & Al-Neshawy 2017) osoitti, että sekoitusajalla on huomattava merkitys betonin ilmamäärän kehitykseen. Teholtaan riittämätön sekoittaminen saattaa aiheuttaa ilmamäärän kasvua polykarboksylaattipohjaisia tehonotkistimia käytettäessä. Toisaalta liian voimakas tai pitkä-kestoinen sekoittaminen saattaa aiheuttaa ilmamäärän kasvua, kun käytetyn huokosti-men määrä on suuri. (Punkki & Al-Neshawy 2017) Betonia kuljettavat säiliöautot sekoit-tavat massaa matkalla betonitehtaalta työmaalle, mistä johtuen perillä kohteessa raken-teeseen pumpattava betoni saattaa poiketa huokosmäärältään huomattavasti betonitehtaalla otetusta näytteestä. Betonin ilmamäärän odottamattomat muutokset voivat vaikut-taa sirotteen kiinnittymiseen, kuten kappaleessa 2.2.4 on todettu.

Käytettävien lisäaineiden laatu ja tarkoitukseensa soveltuvuus pyritään kansallisella ta-solla varmistamaan edellyttämällä lisäainetuotteilta CE-merkintää. Mikäli CE-merkintä puuttuu, voidaan tuotetta käyttää ympäristöministeriön hyväksymän toimitelimen myön-tämällä varmennustodistuksella, joka annetaan joko jatkuvan- tai toimituseräkohtaisen varmentamisen perusteella. (BY201 2018, s. 61) Mikäli virheellinen lisäaine päätyisi laa-dunvarmistuksesta huolimatta käyttöön, voisivat seuraukset olla mittavat. Esimerkiksi polykarboksylaattipohjaiset tehonotkistimet sisältävät vaahdotumista estävää ainetta, joka vähentää notkistimen ilmanmuodostusta (Punkki & Al-Neshawy 2017). Vaahdon estävän osa-aineen puuttuminen voisi siis myös lisätä betonin huokoisuutta ja täten vä-hentää lujuutta.

2.2.7 Betonin lujuus

Betonille on materiaalina ominaista korkea puristuslujuus. Suomen Betonilattiyhdistyksen (2013, s. 9) suosittelema betonin puristuslujuus sirotetta käytettäessä on C25/30. Korkeampia lujuusluokkia käytettäessä on havaittu ongelmia sirotteen kiinnittymisessä, sillä korkeamman lujuuden massoissa vesi-sementtisuhde on usein matalampi, ja sirotteelle jää vähemmän vettä hydratoitumiseen (BLY, 2013).

Korkeamman lujuuden betonien alhainen vesi-sementtisuhde tekee myös lattian hierron ajoittamisesta vaikeampaa, sillä pinta saattaa kuivua nopeammin kuin sitä ehditään hiertää. Liian myöhäisen hierron tapauksessa sirotteen tartunnasta tulee epätasaisempaa niin ikään pinnan alhaisen kosteuden johdosta. (BLY 2013, s. 9)

2.2.8 Betonin lämpö

Betonin lämpötilan kontrollointi on merkityksellistä missä tahansa valukohteessa. Liian korkea lämpötila tai betonin jäätyminen liian aikaisessa vaiheessa kuivumista voi johtaa loppulujuuden alenemiseen (BY201 2018, s. 73). Sementin hydrataatioreaktio tuottaa lämpöä, mistä on kylmissä valuolosuhteissa hyötyä, sillä betonin lujuudenkehitys on nopeampaa lämpimänä. Paksuissa valukohteissa hydrataation lämmöntuotosta aiheutuvat rakenteen sisäiset lämpötilaerot voivat myös aiheuttaa halkeilua (BY201 2018, s. 105). Sirotepintainen lattiarakenne on usein kuitenkin riittävän ohut tämän kaltaisen ongelman välttämiseksi.

2.3 Sirotepintaisen betonilattian työstäminen

Sirotepinta tehdään lattiaan valun yhteydessä, joten sirotteen pohjana toimivan betonilattian valmistusprosessilla on merkitystä lopputuloksen onnistumisessa. Valmistuksen eri vaiheet ovat ajoitukseltaan haastavia, ja niiden oikea-aikaisuus on erittäin tärkeää onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi (BLY 2017, s. 11). Tietämys pinnan valmistamisen oikeasta työtavasta auttaa arvioimaan työsuorituksen vaikutusta case-kohteen pinnan epäonnistumisessa.

Työmaalla lattiabetoni levitetään joko työntekijöiden toimesta käsin ja tasoitetaan oikeaan korkeusasemaan oikaisulautojen ja tasolaserin avulla, tai käytetään laserohjattua levityskonetta. Levityksen jälkeen betonin on annettava kuivua siten, että betonin pinnassa ei ole silmin havaittavaa vettä, ja ihmisen jalanjälki betonissa on korkeintaan 5 mm:n syvyinen. (BY201 2018, s. 421–422)

Tarvittavan kuivumisen jälkeen aloitetaan lattian pinnan hiertäminen sen tiivistämiseksi. Hierto parantaa tiiviyden lisäksi pinnan lujuutta ja kulutuskestävyyttä, sekä vähentää pinnan huokoisuutta (BY201 2018, s. 422). Suomen Betonilattiyhdistyksen (2013, s. 18)

arvio ensimmäisen hierron ajankohdasta on noin 4–5 tuntia valun jälkeen, mutta olosuhteet vaikuttavat betonin kuivumiseen merkittävästi, joten todellinen aika vaihtelee tapauskohtaisesti. Hierron aloittaminen liian aikaisin voi aiheuttaa lattiarakenteen pintaosan heikkenemistä, epätasaisuutta ja pölyämistä. Liian aikaisesta hierrosta johtuen sirotepinta voi jopa murtua myöhemmin terässiivekehierron aikana. Liian myöhäinen hierto sen sijaan ei nosta tarpeeksi kosteutta pintaan sirotteen sitoutumista varten. (BLY 2013, s. 17)

Hiertokertoja vaaditaan lattiatyypistä riippuen vaihteleva määrä, mutta Betoniyhdistyksen ohjeistuksen (2013, s. 17) mukaan sirotelattian tapauksessa hyvä tiiveys saavutetaan usein 3–4 hierrolla. Ensimmäisellä hierontokerralla lattian betoni hierretään auki hyödyntäen hierontokoneeseen asennettua teräslevyä (BY201 2018, s. 422). Auki hierontaminen nostaa betonin pintaan vettä, jota sirote tarvitsee sitoutuakseen.

Sirote levitetään välittömästi auki hierretylle betonille, käyttäen joko annostelukonetta, annosteluvaunua tai kolalevitystä. Annostelukonetta käytettäessä sirote voidaan levittää yhdellä kertaa, käsin tai annosteluvaunulla levitettäessä on kerroksia tehtävä vähintään kaksi. (BLY 2013, s. 18–19)

Levityksen jälkeen pinta voidaan hierontaa uudestaan, kun sirotekerroksen väri alkaa muuttua tummemmaksi, eli sirote kostuu. Tässä vaiheessa tehty hierto nostaa vettä sirotekerroksen läpi, varmistaen ensimmäisen sirotekerroksen riittävän kosteuden, ja tehden seuraavan sirotekerroksen levittämisestä mahdollista. Toinen sirotekerros on levitettävä heti ensimmäisen kerroksen hierontamisen jälkeen, ja se hierretään levityksen jälkeen vähintään kahdesti ristiin. Hiertoja voi tässä työn vaiheessa tehdä useamman, ja niiden tarkoituksena on nostaa kosteus kokonaan sirotteen läpi ja edelleen tiivistää pintaa. (BLY 2013, s. 17, 21)

Kohteen käyttötarkoituksesta riippuen pinta voidaan teräslevyhiertojen jälkeen hierontaa vielä terässiivekkeitä käyttäen. Terässiivekehierron tarkoituksena on edelleen parantaa lattian pinnan tiiveyttä ja lisäksi poistaa lattiasta epätasaisuuksia. (BLY 2013, s. 22) Terässiivekehierretty pinta on säälle altistuessaan liukas, joten sen käyttö esimerkiksi pysäköintilaitoksissa ei ole suositeltavaa (BY201 2018, s. 423).

Valun ja hiertojen jälkeen sirotelattiaa tulee jälkihoitaa niin kosteus- kuin lämpötilaolosuhteiden osalta. Jälkihoidolla voidaan varmistaa pinnan riittävä lujuus, tiiviys, kulutuskestävyys, vähäinen pölyävyys ja sirotteen tarttuminen alusbetoniin sekä halkeiluriskin vähentäminen. Betonilattiaa voidaan jälkihoitaa kosteuden osalta esimerkiksi jälkihoitoaineella, joka muodostaa betonin pinnalle kalvon, hidastaen pinnan kuivumista ja vähentäen täten kuivumishalkeilua. Muita keinoja ovat esimerkiksi muovikalvo lattian pinnalla

tai vesikastelu. Lattian lämpötilaolosuhteet on myös pidettävä tasaisina ja betonin lujuudenkehitykselle edullisina, osana jälkihoitoa. Lattian pintalämpötila ei saa laskea jälkihoiton aikana alle 5°C:n. (BY201 2018, s. 423–424) Suomen Betonilattiyhdistys (2013, s. 24) suosittelee, että jälkihoitoon tulee käyttää sirotevalmistajan suosittelemia tuotteita tai työtapoja.

2.4 Olosuhteiden vaikutus sirotepinnan kiinnittymiseen

Valettu betonipinta on kuivumisensa aikana alttiina monenlaisille tekijöille, jotka voivat vaikuttaa epätoivotusti lattian laatuun. Betoniyhdistyksen (2018, s. 342) mukaan ongelmia tuottavat niin kesällä kuin talvellakin lämpötilat ja niiden vaihtelut, sekä erityisesti kesäaikaan tuulinen sää. Usein ongelmat aiheutuvat betonin sitoutumisesta joko liian nopeasti tai hitaasti, ja joissakin tapauksessa jopa kuivumisnopeuden eroista rakenteen sisällä (BY201 2018, s. 342).

Betonin liian nopealle kuivumiselle altistavia ulkoisia tekijöitä ovat ilman alhainen suhteellinen kosteus, korkea lämpötila, tuuli tai voimakas auringonpaiste. Liian nopeaa kuivumista pyritään rajoittamaan jälkihoidon keinoin, ja tarvittaessa myös varhaisjälkihoitoaineella, mikäli betoni kuivuu liian nopeasti valutyön ollessa kesken. (BY201 2018, s. 342) Mikäli alusbetonin pinta kuivuu olosuhteiden vaikutuksesta liian nopeasti, voi siroteen läpi siirtyvän kosteuden määrä olla sen tarpeisiin nähden vajaa. Kuivasirote on betonin kaltainen tuote, eli altis veden haihtumisesta johtuville kuivumisvaikutuksille kuten halkeilu.

Betonin liian hidasta sitoutumista aiheuttavana tekijänä on yleisimmin kylmyys. Mikäli betonin lämpötila pääsee laskemaan -15 °C:en, sen lujuudenkehitys pysähtyy. Jäätyminen voi aiheuttaa lopullista ja huomattavaa alenemista rakenteen lujuudessa. (BY201 2018, s. 493)

Sirotepintaa tehtäessä on pyrittävä pitämään lämpötila tasaisena ja yli 10 °C:ssä, estämään tuulen ja vedon vaikutukset, suojaamaan valukohde auringonpaisteelta sekä hallitsemaan valutilan kosteusolot. Valettavan kohteen lämpötilaa ja olosuhteita on syytä tarkastella jo valutyötä edeltävinä päivinä, jotta hallintaan vaadittavaa aikaa on yhä olemassa. (BLY 2017, s. 11)

Valulle edullinen lämpötila tulee aikaansaada 1–2 vuorokautta ennen valutyötä, jolloin mahdollinen lämmitys lopetetaan. Tilaa ei tule lämmittää valun aikana, sillä tällöin pintaosa laatasta sitoutuisi huomattavasti pohjaa nopeammin, aiheuttaen halkeilua. Ympäristön tilan lämpötilasta on pyrittävä tekemään mahdollisimman tasainen, joten esimerkiksi

suuret ovet tai muut lämpötilan kannalta epäedulliset kohteet tulee pyrkiä pitämään suljettuna. Huomioonotettavaa lämmön osalta on myös valettavan rakenteen alustan lämpötila, sillä sen ollessa ympäröivää tilaa kylmempi, sitoutuu pohjakerros laatasta pintaosaa hitaammin. (BLY 2017, s. 11–12) Valettavan lattian alustan kylmyys voi aiheuttaa pintaan vaakasuoria halkeamia (BY201 2018, s. 422).

Valun suojaaminen ilmankosteuden vaihteluilta tapahtuu parhaiten estämällä vedon ja tuulen muodostuminen valutilaan. Nopea ilmavirtaus muuttaa tilan suhteellista kosteutta nopeasti, eikä esimerkiksi ulkoilmasta tuleva kosteus riitä pitämään tilan olosuhteita taseisena. Valutilassa on hyvä pyrkiä noin 70 % suhteelliseen kosteuteen, jolloin pinnasta haihtuva veden määrä on vähäisempi ja plastisen kutistuman nopeus alhaisempi. (BLY 2017, s. 13)

2.5 Tutkimusmenetelmät irtoamissyyn selvittämiseksi

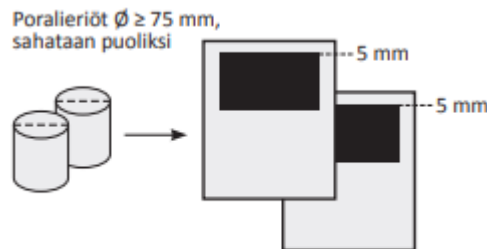
Case-kohteen sirotepinnan irtoamisen syyn selvittämiseksi kohteesta porattiin rakennekoekappaleita, joille suoritettiin ohuthie-, ja vesitilavuustutkimukset. Tutkimusten tavoitteena oli löytää mahdolliset keskinäiset poikkeavuudet tai yhtenevyydet ehjien ja rikkoutuneiden rakenteiden välillä.

Kovettuneen betonin tutkimukseen käytettäviä menetelmiä määrittää Suomessa standardi SFS-EN 12390 (2019). Vesitilavuustutkimus on standardoitu (SFS-EN 12390-7, 2019) tutkimusmenetelmä, jolla voidaan määrittää betonin tiheys. Kovettuneen betonin huokoisuuden tutkimukselle ei sen sijaan ole SFS-standardoitua menetelmää, vaan ohuthietutkimukset perustuvat yhdysvaltalaisiin ASTM-standardeihin. Kovettuneesta betonista voidaan kuitenkin tutkia puristuslujuus, ja siihen on olemassa SFS-standardoitu menetelmä (SFS-EN 12390-3 2019). Mikäli betonin huokoisuus olisi huomattavasti liiallista, näkyisi se puristuslujuuden heikkenemisenä (BY201 2018, s. 63). Case-kohteesta tehtyjä puristuslujuusmittauksia ei ole tässä työssä käytettävissä.

2.5.1 Ohuthietutkimus

Ohuthietutkimuksella analysoidaan kuivuneen betonin huokosrakennetta optisen mikroskoopin ja nimensä mukaisesti erittäin ohueksi hiotun betonileikkeen eli ohuthieen avulla. Ohuthieen paksuus on yleisesti 0,025 mm ja pinta-ala 35 x 55 mm². Ohuthie sijoitetaan mikroskoopilla tutkimista varten kahden lasilevyn väliin, ja impregnoidaan fluoresoivalla hartsilla. Näyte voi myös olla pinta-alaltaan edellä mainittua pienempi, mutta tällöin näytteitä voidaan tarvita jopa kolme yhtä koekappaletta kohden, tarvittavien parametrien selvittämiseksi. (BY72 2021, s. 9–10)

Halkaisijaltaan yli 75 mm:n kokoisista poralieriönäytteistä tehtävä ohuthie valmistetaan yleensä 5 mm:n syvyydeltä alkaen, laskettuna näytteen ulkopinnasta (BY72 2021, s.11). Case-kohteessa irronnut pinta oli oleellista sisällyttää ohuthieeseen, joten useimmat tarkasteltavista hieistä alkavat lattian pinnasta.



Kuva 1: Periaatekuva ohuthienäytteen valmistamisesta rakennekoekappaleesta. Ohuthienäyte sisältää poikkileikkauksen betonista näytteen syvyysuunnassa usein noin 35 mm:n matkalta. (BY72 2020, s. 11)

Ohuthietutkimuksessa hyödynnetään haluttujen parametrien määrittämiseen mikroskoopin hiusristikon muodostamia ruutuja, joista käytetään nimitystä analyysipiste, sekä automaattista pistelaskuria. Analyysipisteitä on betonikoostumusta kohden oltava vähintään 1500 kappaletta. Analyysin tekemiseen sovelletaan standardien NT BUILD 381 ja ASTM C457M-16 määrittämää muunnettua pistelaskumenetelmää. (BY72 2021, s. 12–13) Standardista on Betoniyhdistyksen ohjeistuksen ilmestymisen jälkeen julkaistu uusi versio, ASTM C457/457-M23 (2023). Kunkin analyysipisteen laatu määritetään joko sementtipastaksi, kiviainekseksi tai huokoseksi. Huokoseksi määritellyt analyysipisteet luokitellaan kokonsa perusteella suoja- tai tiivistyshuokoseksi. Suojahuokoseksi määriteltävän huokosen on oltava muodoltaan pyöreä, tai vähintään pyöreähkö. (BY72 2021, s. 13)

Ohuthiettä voidaan analysoida myös standardin ASTM C856/C856M-20 mukaisesti, jolloin tutkimus on petrografinen. Petrografisessa tutkimuksessa selvitetään betonin koostumusta ja mikrorakennetta. Tällöin mikroskoopin analyysipisteiden sijaan ohuthiettä tarkastellaan silmämääräisesti havaittavien ominaisuuksien suhteen, ja muodostetaan havainnoista petrografinen analyysi. (Kekäläinen P., 2013)

Ensisijainen käyttötarkoitus ohuthietutkimukselle on betonin huokosrakenteen selvittäminen, mutta samasta näytteestä voidaan arvioida myös esimerkiksi betonin sementtipastan määrää (BY72 2021, s. 7). Case-kohteessa ohuthienäytteen avulla on lisäksi pyritty selvittämään sirotteen sekoittumista alusbetoniin, mahdollista runkoaineuksen erottumista, sekä kuivumisolosuhteiden ja jälkihoidon vaikutusta kiinnittymiseen.

Tähän kandidaatintyöhön saatavilla ollut materiaali sisältää vain kuvia case-kohteen ohuthienäytteistä, joten analyysin tekeminen pisteenlaskumenetelmää hyödyntäen ei ole mahdollista. Ohuthieitä analysoidaan tässä tapauksessa kuvista silmin nähtävien ominaisuuksien perusteella, eli tulkintatapa muistuttaa petrografista tutkimusta.

2.5.2 Vesipunnitus

Kovettuneen betonin tiheyden määrittämiseen voidaan käyttää vesipunnitusta, jonka määrittelee standardi SFS-EN 12390-7 (2019). Vesipunnituksen tavoitteena on saada selville näytteen tiheys, jonka perusteella voidaan arvioida koekappaleen sisältämän betonin koostumusta sekä mahdollisia näytteiden välisiä eroja.

Standardin mukaan vesipunnituksella tutkittavan koekappaleen tulee olla tilavuudeltaan vähintään 0,785 litraa. Vesipunnituksen tulos pyöristetään tarkkuuteen 10 kg/m^3 .

Vesipunnituksessa koekappale punnitaan ensin ilmassa joko vedellä kyllästettynä, uunikuivattuna tai vastaanottohetken tilassaan. Tämän jälkeen kappale asetetaan roikkumaan telineeseen, johon on yhdistetty vaaka. Teline upotetaan veteen siihen saakka, että koekappale on täysin veden alla, jolloin vaa'an lukema kirjataan ylös. Kappaleen tilavuus voidaan nyt laskea kappaleesta mitattujen tulosten perusteella. Mitattujen suureiden lisäksi tilavuuden laskemiseen tarvittavia tekijöitä ovat veden tiheys sekä ilman koekappaletta veteen upotetun telineen aiheuttama lukema vaa'alla. Kappaleen tiheys on ilmassa punnitun näytteen massan ja edellä kuvatuksi selvitetyn tilavuuden osamäärä. (SFS-EN 12390-7 2019)

Betonin tiheys on riippuvainen monesta tekijästä, ja Betoniyhdistyksen betonisanaston (2022) normaalipainoisen betonin käsitteen mukaan tiheyden vaihteluväli on jopa 2000–2600 kg/m^3 . Laajasta vaihteluvälistä johtuen betonin tiheydelle ei ole ohjearvoa, jonka suhteen minkä tahansa vesipunnituksen tulosta voitaisiin tarkasti arvioida. Betonin tiheyteen vaikuttavat kaikki sen osa-aineet sekä huokoisuus, joten kullekin massalle ominainen tiheys on hyvin sidonnainen osa-aineiden suhteisiin ja jopa sekoituksen onnistumiseen.

2.6 Ohuthienäytteistä tulkittavat ominaisuudet

Näytteille tehtyjen tutkimusten ensisijaisena tavoitteena on selvittää syy sirotepinnan irtoamiselle. Aiemmissa osioissa on käyty läpi sirotteen toimintaedellytyksiä, joiden olemassaoloa tai onnistumista pyritään tulkitsemaan tehtyjen tutkimusten avulla. Pääpaino tutkimustulosten tulkinnassa asettuu ohuthietutkimukselle, sillä vesipunnituksen tulokista ei ole case-kohteen tapauksessa huomattavissa yhtenevyyksiä pinnan irtoamisen

kanssa. Ohuthienäytteiden tulkintaan ei ole saatavilla standardin ASTM C457M-16 edellyttämää mikroskoopin pistelaskutoimintoa, joten tarkastelu kohdistuu petrografiseen menetelmään standardia ASTM C856/C856-M20 soveltuvien osien mukailleen.

Ohuthienäytettä petrografisesti tulkittaessa keskitytään silmin nähtäviin ominaisuuksiin. Eri ainesosat ja huokokset näkyvät kuvissa eri värein, ja niiden sijainnista voidaan päätellä erilaisia ominaisuuksia. Standardin ASTM C856/C856M-20 (2020) mukaan petrografisen tutkimuksen tarkoituksena on selvittää betonista muun muassa seuraavia asioita:

- onko rakenteen betoni sellaista kuin määrätty
- mahdollisen alhaisen laadun syyt
- sideaineiden hydrataatioaste
- runkoaineiden jakautumisen tasaisuus
- huokosten määrä ja laatu
- jälkihoidon onnistuminen
- sirotteen havaittavuus ja luonne.

Betonin mikrohalkeamien määrästä ja leveydestä voidaan tulkita rakenteen kuivumisolosuhteiden vakautta, ja arvioida niiden mahdollista vaikutusta myös sirotepinnan kiinnittymiseen. Kuivuessaan betoni kutistuu, ja kutistumisen vaikutuksia pyritään vähentämään jälkihoidon keinoin. Jälkihoidolla pyritään vähentämään liian nopeaa kuivumista ja siitä aiheutuvaa halkeilua. Betonin kuivumisolosuhteet vaikuttavat sen mikrohalkeamien määrään. Halkeamaa voidaan kutsua mikrohalkeamaksi, mikäli sen leveys on alle 0,05 mm. Mikrohalkeamia esiintyy betonissa aina, mutta niiden määrään ja leveyteen vaikuttavat lisävästi betonin sisäiset ja ulkoiset lämpötilan ja kosteuden muutokset. Kuivumisolosuhteista johtuvat mikrohalkeamat alkavat yleisesti joko lattian ylä- tai alapinnasta, sillä kuivumisnopeuden erot ovat suurimpia pintojen ja rakenteen sisäosien välillä. (BY201 2018 s. 107)

Sekoittumisen onnistumista voidaan arvioida nähtävien ainesosien tasaisen esiintyvyyden perusteella, ja esimerkiksi merkittävä erottuminen on havaittavissa suurempien runkoainesrakeiden puutteena pintaosien näytteissä. Betonin hierron ajankohdan oikeellisuutta voidaan arvioida lattian tiivistymisen kautta, sillä onnistunut hierto tiivistää lattian pintaosia, jolloin huokoisuutta ei ole pinnan läheisyydessä havaittavissa syvempiä kerroksia vastaavassa määrin.

Betonin huokoisuus on suhteessa muihin ominaisuuksiin yksinkertaista tunnistaa ohuthieestä, sillä rajat huokosten ja muiden aineiden välillä ovat selkeitä, ja huokosten muoto

on pyöreä tai vähintään pyöreähkö. Huokosten syntymekanismien arvioinnissa merkittävinä on niiden koko, kuten kappaleessa 2.2.4 on selitetty. Betoniyhdistys (2018, s. 84) kertoo suojahuokosten keskinäiseksi etäisyydeksi noin 0,4 mm. Betonin kapillaarihuokosto ei sulkeudu ollenkaan, mikäli vesi-sementtisuhde on korkeampi kuin 0,7 (BY201 2018, s. 83).

Kohteessa käytetyn betonimassan raekokojakaumaksi on ilmoitettu 0–16 mm. Valmistaja ilmoittaa käytetyn sirotteen raekooksi 0–4 mm (Mastertop 450 2006).

Sideaineen hydrataation aste vaikuttaa sen väriin, ja käytetystä valaisusta riippuen huommin hydratoitunut sideaine on usein ympäröivää sementtiä tummempaa. Sideaineen koostumus ja mahdolliset seosaineet vaikuttavat sen väriin, joten värin tummuus voi hydrataatioasteen lisäksi kertoa sideaineen osa-aineista ja alkuperästä. (ASTM C856/856-M20, 2020) Karbonatisoitunut sideaine voi näyttäytyä muuta sideainetta vaaleampana (Fridh, K. & Lagerblad, B., 2013).

Betonin alkali-kiviainesreaktio on myös mahdollista havaita petrografisessa tutkimuksessa. Reaktion vaikuttavuus sirotteen irtoamiseen on case-kohteessa huomattavan epätodennäköistä, sillä sen vaikutusten näkyminen kestää useita vuosia (BY201 2018, s. 104), mutta kohteen pinta oli irrotessaan vasta kuukausia vanha.

Tässä työssä käsiteltävissä kuvissa nähtävä sideaineen eli sementin osuus näkyy tasopolarisoidussa valossa ruskeana, ja ultraviolettivalossa tummanvihreänä. Sirotteen sisältämä sideaine on väriltään hieman tummempaa kuin alusbetonin, mikä auttaa sirotteen sekoittumisen arvioinnissa. Kiviaines näyttäytyy tasopolarisoidussa valossa lähes valkoisena, ja ultraviolettivalossa lähes mustana. Huokokset ovat tasopolarisoidussa valossa keltaisia ja ultraviolettivalossa kellertävän vihreitä.

3. CASE-KOHDE

Kohteen sirotepintainen lattia rakennettiin teollisuuden tuotantotilan käyttöön. Lattia oli pinta-alaltaan noin 2300 m², ja se valettiin suunnitellusti osissa useamman päivän aikana. Lattian rakenne oli paksuudeltaan 200 mm, eikä rakenteessa ollut etukäteen asennettuja raudoituksia, sillä käytetty betonimassa sisälsi teräskuitua lattiarakenteen vetolujuuden vahvistamiseksi. Betonimassan maksimiraekoko oli 16 mm, sideaineena käytettiin sulfaatinkestävää SR-sementtiä ja betonin lisäaineena polykarboksylaattipohjaista BASF MasterGlenium Sky 600 -notkistinta. Notkistimen valmistanut BASF on myös kohteessa käytetyn MasterTop 450 - kuivasirotteen valmistaja.

Kohteen sirotepinta irtosi noin puoli vuotta valun jälkeen. Irtoamista tapahtui tasaisesti kaikkialla lattian alueella. Irtoamispaikat eivät olleet sidonnaisia esimerkiksi ovien tai muiden vastaavien lämpötila- ja kosteusvaihtelun lähteiden sijaintiin. Sirotepinnaa irtosi myös eri päivinä valettujen lattian osien alueilta.

Tutkittavasta kohteesta otettiin poraamalla rakennekoekappaleita, joille suoritettiin ohuthie- ja vesitilavuustutkimukset. Tutkittavassa tapauksessa porattujen lieriöiden halkaisija oli 99–100 mm ja korkeus 185–210 mm. Betoniyhdistyksen ohjeistuksen (2020) mukaan rakennekoekappaleet tulee ottaa vähintään rakenteen oman paksuuden etäisyydellä sen reunasta, ja näytteenottoaikkojen keskinäinen etäisyys tulee olla vähintään 40 cm.

Kohteesta porattiin yhteensä kuusi näytettä, joista kaikille suoritettiin ohuthie- ja vesitilavuustutkimukset. Puolet näytteistä edustavat rikkoutuneen-, ja puolet ehjän sirotepinnan alueita, ja sirotepinnan kunto ilmoitetaan kunkin näytteen analysoinnin yhteydessä. Yhdestä pinnaltaan ehjästä poralieriönäytteestä ei ole saatavilla ohuthienäytteen kuvaa tässä työssä käsiteltäväksi.

3.1 Case-kohteen sirotteen käyttöohjeet ja vaatimukset

Case-kohteessa käytetty sirotetyyppi on tiedossa, ja sen tuotetietojen pohjalta voidaan arvioida käytettyjen materiaalien ja työmenetelmien soveltuvuutta kyseiselle sirotteelle. Siroteilla on tuotekohtaisia rajoitteita, ja niiden vaikutus on otettava huomioon onnistuneen pinnan valmistamiseksi.

Kohteessa käytettiin BASF Construction Chemicals Finland Oy:n tuottamaa Mastertop 450 -kuivasirottea. Tuotekuvauksen (Mastertop 450 2006) mukaan kyseinen sirote soveltuu kaikenlaisen teollisuuden lattioihin, aina kevyestä käytöstä raskaan liikenteen

kuormitukseen saakka. Tuotteen eduiksi luetellaan muun muassa hyvä kulutuskestävyys, jäätyminen kestäminen, soveltuvuus kosteisiin olosuhteisiin sekä vastustuskyky öljyille ja liuottimille. (Mastertop 450 2006)

Sirote toimitetaan käyttövalmiina ja sekoitettuna. Sen runkoaine on korundia, jonka rae-
koko on 0–4 mm. Valmistaja lupaa tuotteen puristuslujuudeksi 28 vuorokauden arvosteluiässä jopa 85–90 MPa (Mastertop 450 2006), mikä on erittäin korkea verrattuna esimerkiksi alusbetonin suositeltuun lujuusluokkaan C25/30.

Alusbetonin erityisvaatimuksiksi sirotetta käytettäessä asetetaan korkeintaan 3 % ilmapitoisuus. Betonin tulee lisäksi olla lujuudeltaan käyttötarkoitukseen soveltuvaa ja mahdollisimman vähän kutistuvaa. Betonin runkoaineet eivät saa sisältää kalsiumkloridia, suolaa tai suolavettä. (Mastertop 450 2006)

Työstön osalta Mastertop 450 vastaa hyvin pitkälti kohdassa 2.3 kuvattuja sirotepinnan työstämisen vaiheita. Sirotetta tulee käyttää keskinkertaisen kulutuksen lattiaan 5–6 kg/m², ja raskaan kulutuksen lattiaan 7–10 kg/m². Valmistaja suosittelee sirotteen kiinnittymiseksi suoritettua kolmen teräslevyhiertokerran jälkeen kolmea terässiivekehiertokertaa pinnan tiivyyden varmistamiseksi. Hiertojen jälkeen sirotepinta suositellaan jälkihoitettavaksi sirotevalmistajan omaa Masterkure-jälkihoitoainetta käyttäen. Jälkihoitoaineen levityksen valmistuttua pinta tulee suojata likaisuuden ja fyysisten vahinkojen torjumiseksi. (Mastertop 450 2006)

3.2 Olosuhteiden ja työsuorituksen kuvailu

Urakoitsijan (Holopainen, haastattelu, 2023) mukaan lattian valmistuksen aikana ei ollut havaittavissa mitään tavallisen sirotelattian valmistuksesta poikkeavaa. Kohde oli teollisuushalli, jonka sirotepintainen lattia valettiin joulukuussa 2020. Ulkolämpötila on valun aikaan ollut alimmillaan noin -3°C, ja hallin lämpötila ennen valua noin 10°C. Hallin ovet sekä vastaavat aukot oli tukittu ennen valun aloittamista, millä saatiin epäedullinen ilmankierto estettyä. Hallin lämpötila pysyi koko valun sekä kuivumisajan yli 0°C:ssa.

Urakoitsijalla oli valun aikaan jopa 36 vuoden kokemus betonilattioiden valmistuksesta, ja kuivasirotteen käytöstä kokemusta on lähes niin pitkään, kuin sirotetta on Suomessa ollut käytettävissä. Kyseessä oli siis urakoitsijalle tuttu toimiala ja työtapana.

Sirottea käytettiin kohteessa neljä kilogrammaa neliometriä kohden. Sirote levitettiin käsin avaushierron jälkeen, ja kokonaisuudessaan pinta hierrettiin teräslevyllä vähintään

kolme, paikoitellen jopa neljä kertaa valun kuivumisnopeudesta riippuen. Pinnalle suoritettiin myös vähintään kolme terässiivekehiertoa pinnan tiivistämiseksi ja epätasaisuuksien poistamiseksi, kuten myös sirotteen valmistaja kehottaa.

Valun jälkeen pintaa jälkihoidettiin kemiallisesti, käyttäen sirotevalmistajan suosittelemaa BASF MasterKure-jälkihoitoainetta. Jälkihoitoaineen käytön lisäksi pinta suojattiin kostealla suodatinkankaalla sekä muovilla. Suodatinkankaan tarkoituksena oli ylläpitää pinnan korkeaa kosteutta kuivumisnopeuden tasaamiseksi, ja muovin tarkoituksena hidastaa veden haihtumista sekä suojata mahdollisilta ympäristön aiheuttamilta mekaanisilta vaurioilta.

Lattiassa käytetty kuivasirote kuljetettiin tavarantoimittajan toimesta suoraan työmaalle, ja sitä säilytettiin säältä suojatuissa olosuhteissa. Sirotteen pakkauksessa on ilmoitettu päivämäärä, jonka jälkeen tuotetta ei tule käyttää, ja kohteen lattiassa käytetyn sirotteen käytettävyyttä oli valmistajan merkinnän mukaan valun hetkellä jäljellä vielä vuosia. (Holopainen, haastattelu, 2023)

3.3 Vesipunnituksen tulosten tulkinta

Kohteesta poratut näytteet olivat tilavuudeltaan vähintään 1,42 litraa, joten ne täyttävät standardin asettamat vaatimukset tiheyden määrittämiseen. Näytteiden määritetyt tiheydet vaihtelivat välillä 2300–2350 kg/m³, mutta näytekohtaisten tiheyksien sisällyttäminen työhön ei tekijänoikeudellisista syistä ole mahdollista. Tähän työhön ei myöskään ole saatavilla tarkkaa tietoa käytetyn betonimassan osa-aineista ja niiden keskinäisistä suhteista, joten teoreettista arviota betonin odotettavasta tiheydestä ei voida tehdä.

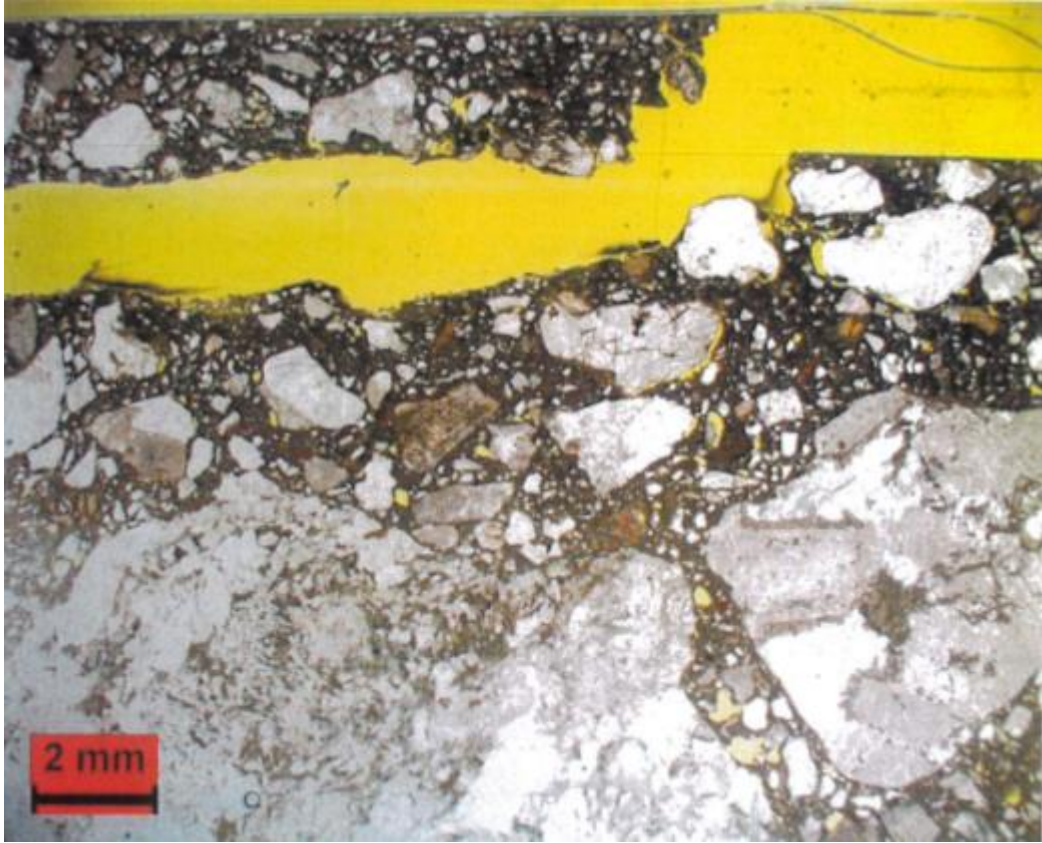
Vesipunnituksen tulokset olivat keskenään hyvin lähellä toisiaan, eikä kappaleen pinnan kunnolla ollut havaittavaa yhteyttä näytteen tiheyteen. Mikäli joissain näytteissä tiheys olisi huomattavasti muita matalampi, olisi sen perusteella ollut aiheellista epäillä huomattavaa huokoisuuden poikkeavuutta tutkittavien kohtien välillä. Työn aiemmissa kappaleissa on todettu, että liiallinen huokoisuus voi aiheuttaa ongelmia sirotteen tartunnassa.

3.4 Ohuthieiden näytekohtainen tulkinta

Jokaisesta ohuthienäytteen kuvasta tulkitaan yleiset huomiot, sirotepintaan, runkoainekseen ja sideaineeseen liittyvät havainnot sekä huokoisuus ja halkeilu. Nähtävien ominaisuuksien lisäksi pyritään tarvittaessa selostamaan myös ilmiöiden mahdollisia aiheuttajia tai taustatekijöitä.

3.4.1 Näyte 1

Ohuthienäyte on otettu poralieriönäytteestä, jonka sirotepinta on irronnut. Näytteestä oli tätä tutkimusta varten saatavilla yksi tasopolarisoidulla valolla valaistun ohuthienäytteen kuva.



Kuva 2: Kuvassa näytteen 1 ohuthie tasopolarisoidussa valossa. Kuvan yläosassa on nähtävissä irronnut sirotepinta. (Ohuthietutkimus, Contesta Oy)

Yleiset huomiot: Näyte 1 edustaa lattian kohtaa, jossa sirotepinta on irronnut. Kuvassa nähtävä alue ulottuu noin 13 mm:n syvyyteen. Näytteen pinta on irronnut 2–3 mm:n syvyydeltä melko tasaisesti. Irtoaminen ei näytä olevan kiviainesrakeiden ja sideaineen välisestä kiinnittymisestä johtuvaa, sillä halkeama kulkee tasaisena myös ainoastaan sideainetta sisältävissä kohdissa. Kuvan yläosassa on nähtävissä näytteen koossa pitämiseksi käytettyä teippiä. Pinnan yläosa on hyvin tasainen, eikä siinä ole havaittavissa ulkoisesta mekaanisesta rasituksesta aiheutuneita jälkiä. Kuvassa ohuthienäyte on valaistu tasopolarisoidulla valolla.

Sirotepinta: Sirotteen tumma sideaine on havaittavissa kuvassa noin 4–5 mm:n syvyydelle. Alusbetoniin sekoittumisen syvyys näyttää tasaiselta. Sideaineen värin muutos syvemmälle mentäessä on lähes lineaarinen, eikä tarkkarajaista eroa ole huomattavissa, joten voidaan arvella sirotteen kiinni hiertämisen onnistuneen hyvin. Sirotepinnalle ominaisia 1,5–2 mm runkoainesrakeita on tasaisesti havaittavissa noin 5 mm:n syvyydellä.

Runkoaines: Kuvan alaosissa on nähtävissä alusbetonin karkeaa runkoainesta, jonka raekoko vaihtelee 2 mm:stä jopa 12 mm:n. Karkea runkoaines on suurilta osin pyöreäsärmäistä. Hienempi runkoaines on kooltaan 0,064–2 mm, ja se on muodoltaan terävämpää suhteessa karkeaan ainekseen. Tartunta runko- ja sideaineen välillä on syvemmällä betonissa erittäin tiivis, mutta lähempänä pintaa kiviaineksen ympärillä on havaittavissa rakomaista huokoisuutta.

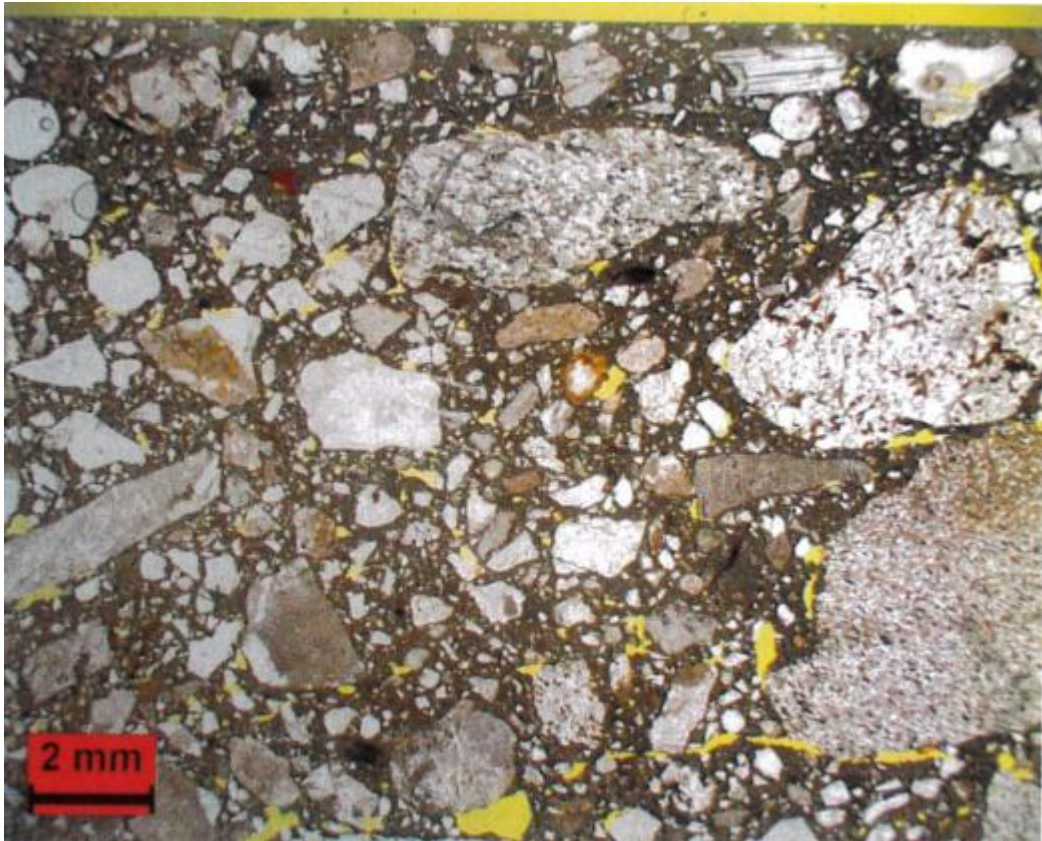
Sideaine: Sideaineen hydrataatio näyttää tasaiselta, sillä paikallisia värieroja ei sideaineen sisällä ole juurikaan havaittavissa. Paikoitellen runkoaineksen ympäriltä havaittavat rakomaiset mikrohuokokset voivat olla paikallisesti korkean vesi-sementtisuhteen aiheuttamia, sillä mahdollinen runkoaineksen ympärille jäänyt vapaa vesi jättää haihtuessaan betoniin huokosen.

Huokoisuus: Pinnassa esiintyvä huokoisuus on pääosin vähäistä, joten hierron tiivistysvaikutuksen voidaan todeta olevan onnistunut. Kuvassa havaittavien huokosten halkaisija on poikkeuksetta alle 0,8 mm, joten havaittava huokoisuus on syntynyt muuten kuin puutteellisen tiivistyksen aiheuttamana. Huokosten 0,01–0,8 mm:n halkaisijan perusteella valtaosa kuvassa esiintyvistä huokoisuudesta luokitellaan suojahuokosiksi.

Halkeilu: Kuvassa esiintyy satunnaista halkeilua pinnan irtoamiskohdan ympärillä, ja suuri osa halkeamista suuntautuu irtoamistasosta pintaa kohti. Havaittavien halkeamien leveydeksi voidaan arvioida noin 0,05–0,1 mm, ja pituudeksi 0,5–2 mm. Halkeamat eivät ala lattian pinnasta, joten kuivumisolosuhteiden vaikutus halkeamien syntyyn on epätodennäköinen. Halkeamien sijainnista johtuen syntymekanismien arvioinnissa ei voida sulkea pois esimerkiksi näytteen käsittelyssä syntyneitä halkeamia. Irtoamispinnalta pohjaa kohti suuntutuvia halkeamia ei kuvasta ole havaittavissa.

3.4.2 Näyte 2

Näyte on otettu lattian kohdasta, jossa sirotepinta on ehjä. Näytteestä oli tätä tutkimusta varten saatavilla yksi tasopolarisoidulla valolla valaistun ohuthienäytteen kuva.



Kuva 3: Kuvassa näytteen 2 ohuthie tasopolarisoidussa valossa noin 14 mm:n syvyydelle saakka. Kuvan yläosassa on nähtävissä ehjä sirotepinta. (Ohuthietutkimus, Con-testa Oy)

Yleiset huomiot: Näyte 2 edustaa kohtaa, jonka sirotepinta on ehjä. Kuvassa on nähtävissä lattian ehjä ja suora pinta sekä näytteen kokoamiseen käytettyä teippiä. Kuvassa nähtävä alue ulottuu noin 14 mm:n syvyyteen pinnasta mitattuna. Kuvassa ohuthienäyte on valaistu tasopolarisoidulla valolla.

Sirotepinta: Sirotteen tummaa sideainetta on tasaisesti havaittavissa noin 4–5 mm:n syvyydelle asti. Sirotteen halkaisijaltaan noin 1,5–2 mm runkoainesta on havaittavissa tasaisesti tumman sideaineen alueella. Kuvan oikeassa ylänurkassa on paikallisesti havaittavissa tummempaa väriä sideaineessa, mikä voi viitata epätäydelliseen hydrataatioon.

Runkoaines: Alusbetonin runkoainesta on kuvassa tasaisesti edustettuna, ja karkeampia rakeita on hyvin lähellä sirotepintaa ja jopa sen alueella. Karkeat rakeet ovat myös

tämän näytteen alueella pyöreä-, ja hienommat lajitteet terävasärmäisiä. Suurten rakeiden ympärillä on paikoitellen havaittavissa pientä huokoisuutta, vastaavasti kuin näytteessä 1. Pienten rakeiden kiinnittyminen sideaineeseen on valtaosin saumattomampaa. Kuvasta ei ole havaittavissa kiviaineksen erottumista.

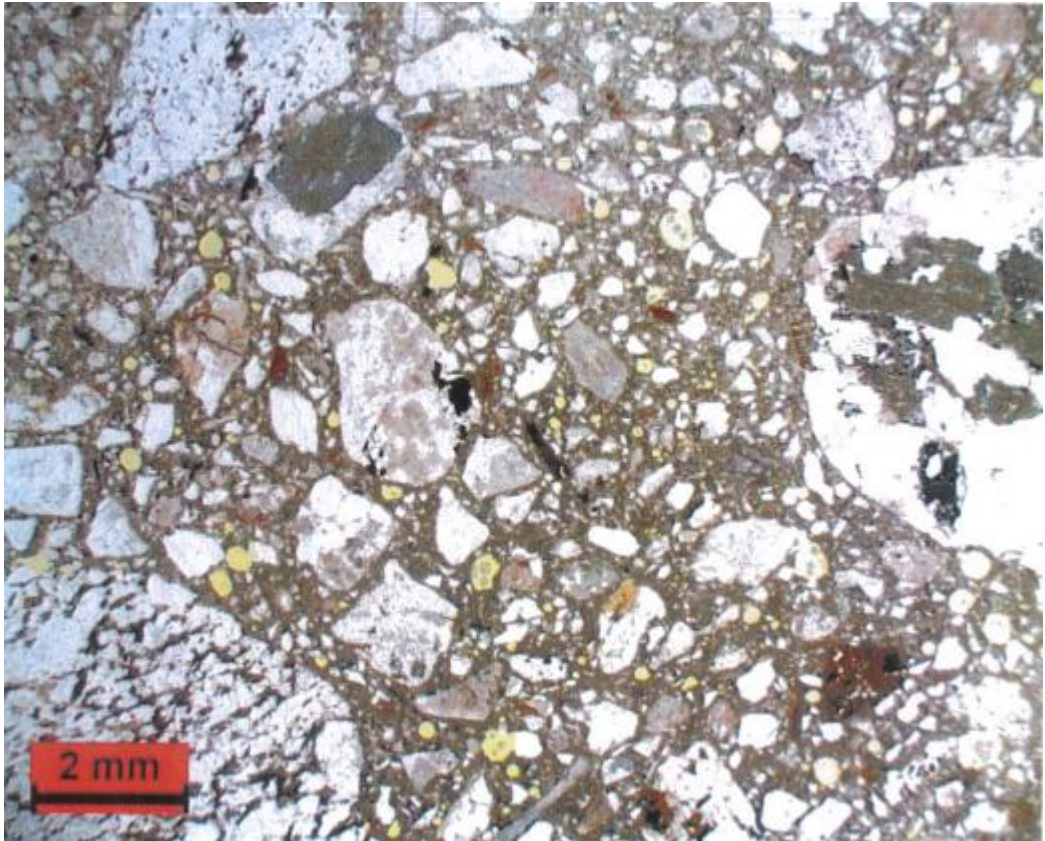
Sideaine: Sideaineen väri on tasainen, lukuun ottamatta pientä aluetta sirotteen oikeassa reunassa. Sirotteen ja alusbetonin sekoittumisvyöhykkeellä värin muutos on tasainen, eikä epätäydelliseen sekoittumiseen viittaavaa tarkkaa rajaa ole havaittavissa.

Huokoisuus: Näytteessä on havaittavissa hieman huokoisuutta. Hierron syvyysvaikutuksen keskiarvo 10–20 mm voi ylittää läpi koko kuvan syvyyden, joten näytteen tiivistämättömän huokoisuuden määrää on vaikeaa arvioida. 12–14 mm:n syvyydellä on havaittavissa tasomaista huokosilman kerrostumista. Huokosten koko on yhtä nähtävissä olevaa huokosta lukuun ottamatta kooltaan alle 0,8 mm. Nähtävissä oleva suurempi huokonen voi johtua esimerkiksi tiivistyksen nostamien suojahuokosten kasautumisesta kiviainesrakeen alapintaan.

Halkeilu: Näytteessä ei esiinny silmännähtävää pystysuuntaista halkeilua. 12–14 mm:n syvyydellä havaittava tasomaisen huokoskertymän voidaan tulkita olevan halkeaman kaltainen.

3.4.3 Näyte 3

Näyte on otettu lattian kohdasta, jossa sirotepinta on irronnut. Näytteestä oli tätä tutkimusta varten saatavilla yksi tasopolarisoidulla valolla valaistun ohuthienäytteen kuva.



Kuva 4: Kuvassa näytteen 3 ohuthie tasopolarisoidussa valossa. Kuvassa nähtävä alue alkaa noin 16 mm:n syvyydeltä lattian pinnasta mitattuna. (Ohuthietutkimus, Contesta Oy)

Yleiset huomiot: Näyte 3 edustaa kohtaa, jonka sirotepinta on irronnut. Kuvassa nähtävä alue kuvaa syvyyssuunnassa noin 13 mm:n mittaisen alueen. Kuvan yläreuna on 16 mm:n syvyydellä näytteen pinnasta. Koska nähtävä alue on poralierionäytteen syvemmistä kerroksista, ei kuvassa ole nähtävissä sirotepintaa. Ohuthienäyte on valaistu tasopolarisoidulla valolla.

Sirotepinta: Kuvassa ei ole nähtävissä sirotepintaa, sillä kuvan kattama alue on näytteessä syvemmällä. Tutkimuksen taustatietojen mukaan näytteen sirotepinta on rikkoutunut nähtäviltä osin samalla tavalla kuin muidenkin pinnaltaan rikkinäisten näytteiden tapauksessa. Sirotepinnan paksuus ja koostumus on niin ikään muita vastaava.

Runkoaines: Kuvassa on nähtävillä alusbetonin karkeaa ja hienoa runkoainesta. Runkoaines on jakautunut tasaisesti, eikä erottumista ole havaittavissa. Karkeat rakeet ovat muodoltaan pyöreäsärmäisiä ja hienompijakoiset terävsärmäisiä. Kiviaines on ehjää ja

hyvin sideaineeseen kiinnittynyttä. Näytteissä 1 ja 2 havaittuja rakomaisia huokosia ylempien kerrosten kiviaineksen ympärillä ei ole nähtävissä.

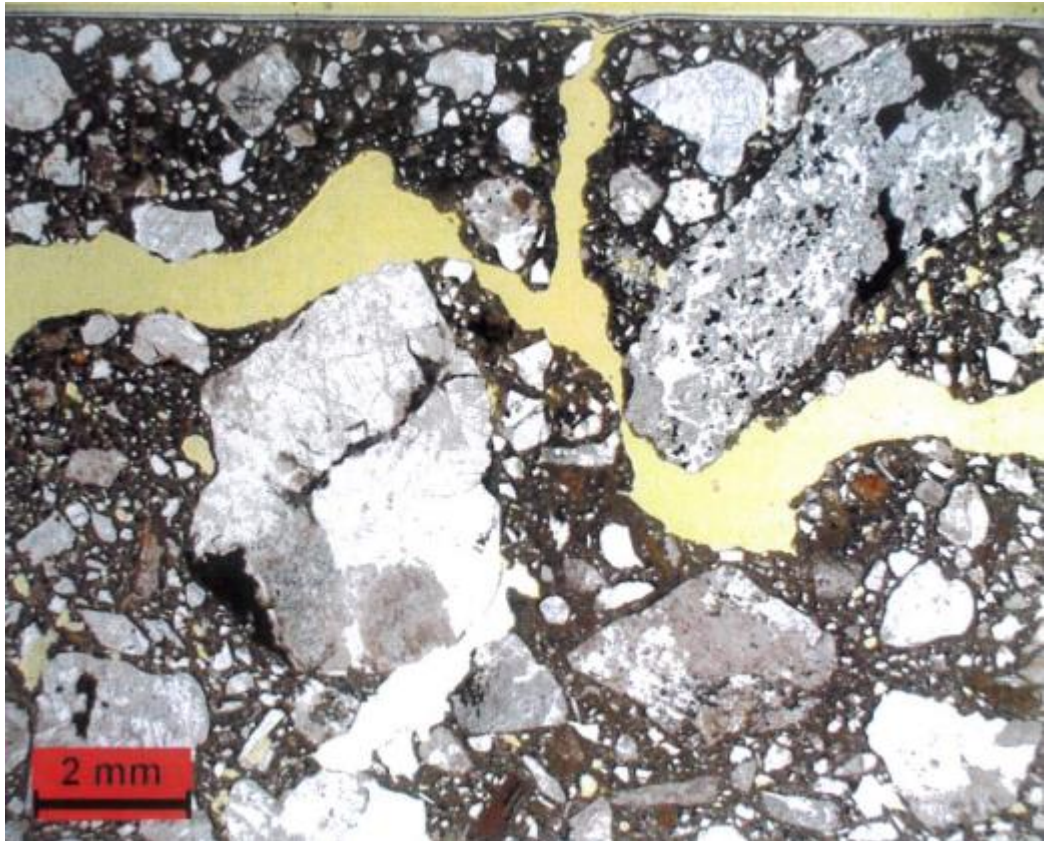
Sideaine: Sideaine näyttää hydratoituneen pääosin tasaisesti. Kuvan oikeassa alalaidassa on huomattavissa tumma alue sideaineessa, mikä voi viitata alhaisempaan hydrataatioon. Sirotteen sideainetta ja sekoittumisvyöhykettä ei ole näytteen syvyys-suuntaisesta sijainnista johtuen nähtävissä.

Huokoisuus: Kuvassa on nähtävissä kohtalaisen paljon huokoisuutta. Huokoisuuden määrä vähenee kohti kuvan yläosaa, mikä johtunee hierron aiheuttamasta tiivistymisestä. Huokokset ovat jakautuneet betoniin säännöllisesti, ja niiden koko vastaa suoja-huokosten määritelmää 0,01–0,8 mm.

Halkeilu: Kuvassa ei ole havaittavissa halkeamia. Taustatietojen mukaan sirotepinta on irronnut pinnan suuntaisen halkeaman kaltaisesti, kuten näytteessä 1.

3.4.4 Näyte 4

Näyte on otettu lattian kohdasta, jossa sirotepinta on irronnut. Näytteestä oli tätä tutkimusta varten saatavilla yksi tasopolarisoidulla valolla valaistun ohuthienäytteen kuva.



Kuva 5: Kuvassa näytteen 5 ohuthie tasopolarisoidussa valossa. Kuvan yläosassa on lattian pinta, ja noin neljän millimetrin syvyydessä on nähtävissä sirotepinnan irronnut halkeama. (Ohuthietutkimus, Contesta Oy)

Yleiset huomiot: Näyte 5 edustaa kohtaa, jonka sirotepinta on irronnut. Kuvasta on nähtävissä syvyyssuunnassa noin 13 mm:n mittainen alue lattian pinnasta alkaen. Kuvan yläreunassa on lattian pinta ja näytteen koossa pitämiseen käytettyä teippiä.

Sirotepinta: Sirotepinnan halkaisijaltaan keskimäärin 0–2 mm:n runkoainesta on nähtävillä tasaisesti levittyneenä koko sirotepinnan alueelle. Sirotepinnan tumma sideaine on väriltään tasaista, joten hydrataatioasteen voidaan arvella olevan tasainen. Sirotteen sideainetta on havaittavissa noin neljän millimetrin syvyydellä, mistä eteenpäin se tasaisesti sekoittuu alusbetonin sideaineeseen. Tarkkarajaista eroa sirotteen ja alusbetonin sideaineiden välillä ei ole havaittavissa.

Runkoaines: Kuvassa on havaittavissa runsaammin alusbetonin karkeitä, halkaisijaltaan noin 2–6 mm runkoainesrakeita. Oikeassa reunassa voidaan nähdä alusbetonin rakeen sekoittuneen sirotepintaan ja yltävän lähes lattian pintaan asti. Runkoaineksen

karkea kiviaines on reunoiltaan pyöreä- ja hienempi aines teräväsärmäistä. Runko- ja sideaineen välillä ei ole havaittavissa näytteissä 1 ja 2 esiintyneitä rakomaisia huokosia.

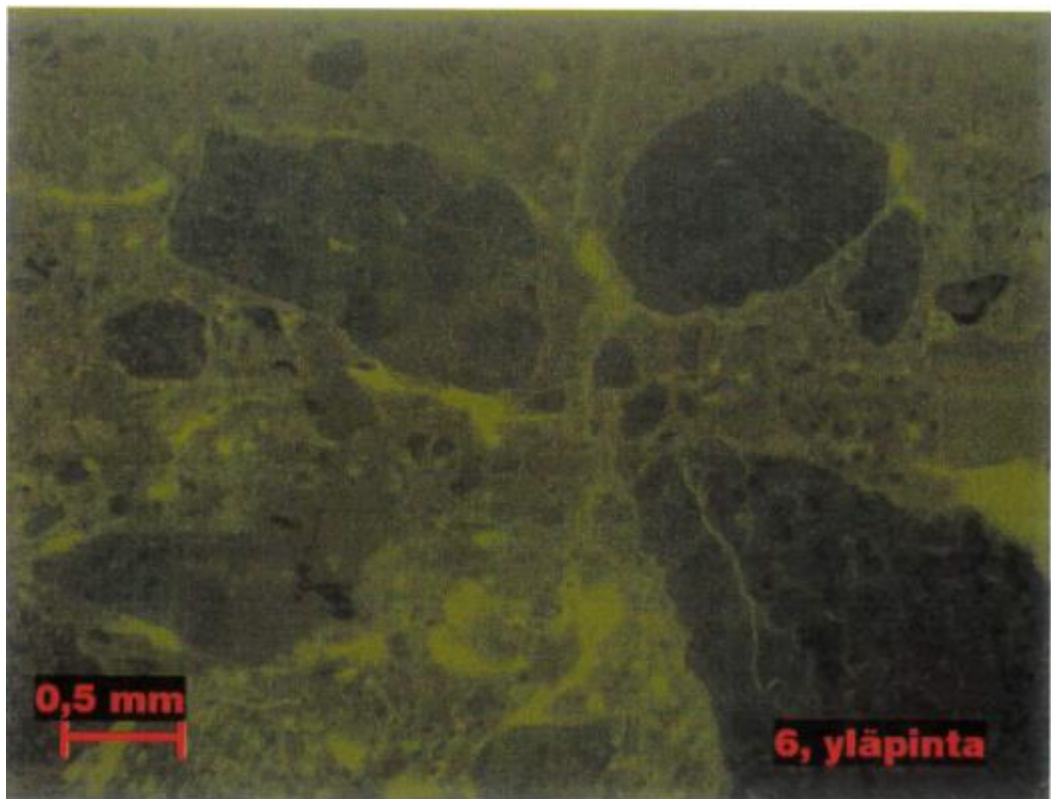
Sideaine: Sideaine vaikuttaa tasaisesti hydratoituneelta. Sirotteen ja alusbetonin sideaineet ovat sekoittuneet keskenään tasaisesti. Sideaine on tiiviisti kiinni runkoaineksessa.

Huokoisuus: Kuvassa on havaittavissa hieman huokoisuutta, mikä voi johtua hierron tiivistävästä vaikutuksesta. Nähtävät huokokset täyttävät kooltaan suojahuokosen kuvauksen. Tiivistyksestä johtuvia huokosia ei kuvassa näy.

Halkeilu: Kuvassa on nähtävillä sirotepinnan alusbetonista irrotanut pinnansuuntainen halkeama, jonka leveys on jopa 2 mm. Sama pinnansuuntainen halkeama kääntyy kuvan keskikohdassa myös ylöspäin. Muita halkeamia kuvasta ei ole nähtävissä.

3.4.5 Näyte 5

Näyte on otettu lattian kohdasta, jossa sirotepinta on ehjä. Näytteestä oli tätä tutkimusta varten saatavilla kaksi ultraviolettivalolla valaistun ohuthienäytteen kuvaa.



Kuva 6: Kuvassa näytteen 5 yläpinnan ohuthie ultraviolettivalossa. Kuvan yläosassa on nähtävissä lattian ehjä pinta sekä syvempiin kerroksiin ulottuvia mikrohalkeamia. Huom. kuvaan merkitty mitta on aiemmista kuvista poiketen 0,5 mm (Ohuthietutkimus, Contesta Oy)

Yleiset huomiot: Näyte 5 edustaa kohtaa, jossa sirotepinta on ehjä. Kuvassa nähtävä alue yltää noin 3,5 mm:n syvyydelle lattian pinnasta mitattuna. Aikaisempien näytteiden sirotepinnan syvyyden perusteella voidaan arvioida koko alueen kuvaavan sirotepintaa. Kuvan ohuthienäyte on valaistu ultraviolettivalolla.

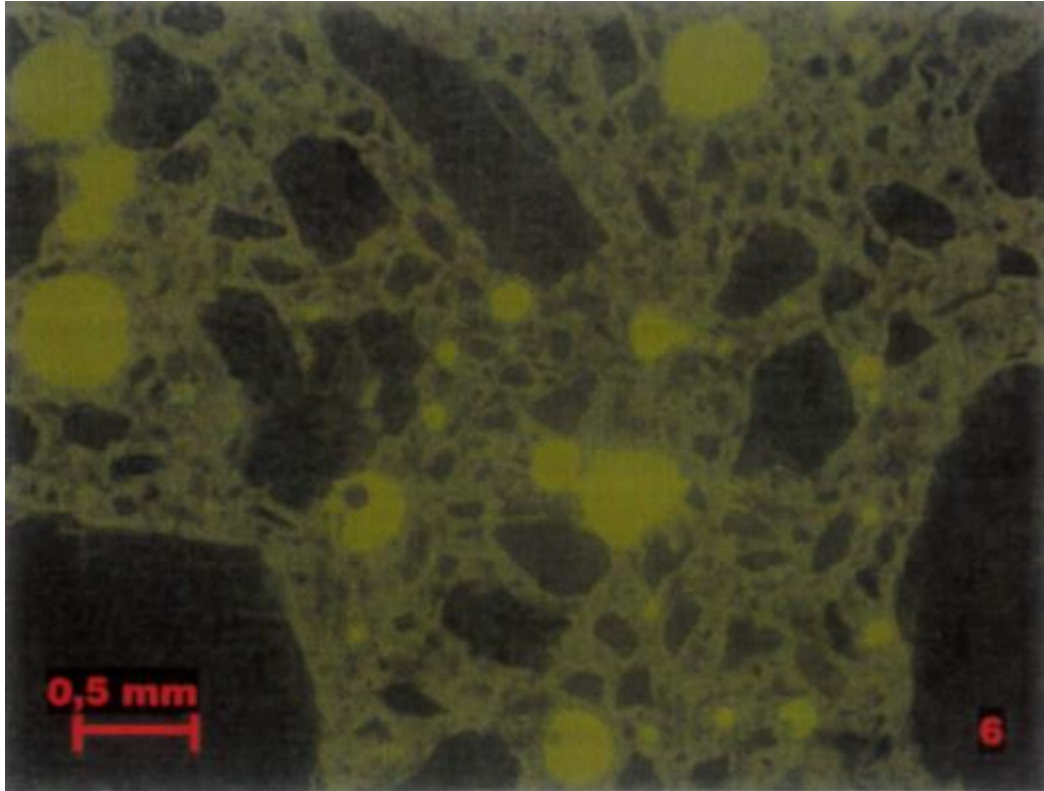
Sirotepinta: Kuvassa nähtävät runkoainesrakeet ovat halkaisijaltaan noin 0,5–4 mm, joten ne voivat suurella todennäköisyydellä olla sirotteen omia rakeita. Sirotteen sideainetta on haastava arvioida ultraviolettivalaistussa kuvassa. Sirotepinta on ehjä, mutta pientä halkeilua on nähtävissä.

Runkoaines: Nähtävä runkoaines on todennäköisesti sirotteen runkoainesta. Runkoaines on ehjää ja tasaisesti jakautunutta. Sekä pienet että suuremmat rakeet ovat muoltaan pyöreäsärmäisiä.

Sideaine: Sideaineen hydrataatioasteen arviointi on ultraviolettivalossa haastavampaa kuin tasopolarisoidussa valossa. Sideaineen väri vaikuttaa kuitenkin tasaiselta, joten voidaan arvella sen olevan tasaisesti hydratoitunutta. Kiinnittyminen runkoainekseen on pääosin hyvä, joskin suurempien rakeiden ympärillä on paikoin havaittavissa rakomaista huokoisuutta.

Huokoisuus: Kuvassa esiintyy paikoitellen runsasta, kasautunutta vaakasuoran halkeaman kaltaista huokoisuutta. Huokosten muoto ei ole juurikaan pyöreä, ja huokosten ryhmittymät muistuttavat aikaisempien ehjien näytteiden kaltaista lauttaantumista. Nähtävät huokokset ovat kooltaan tiivistyshuokoksen määritelmää pienempiä, joten huokoisuus on todennäköisesti suojahuokostuksesta aiheutuvaa.

Halkeilu: Kuvassa on havaittavissa yksi mikrohalkeaman määritelmän täyttävä pintaa vastaan kohtisuora halkeama. Lisäksi noin yhden millimetrin syvyydessä on havaittavissa vaakasuora, kiviainesrakeita mukaileva halkeama. Noin kahden millimetrin syvyydessä lauttaantunut huokoisuus muodostaa vaakasuoran halkeaman kaltaisen alueen, mutta halkeama ei ole jatkuva, eikä pinta mahdollisesti siksi ole irronnut.



Kuva 7: Kuvassa näytteen 5 syvempien kerrosten ohuthie ultraviolettivalossa. Kuvan yläreuna sijoittuu 12 mm:n syvyydelle lattian pinnasta mitattuna. Kuvasta on havaittavissa runsasta huokoisuutta. (Ohuthietutkimus, Contesta Oy)

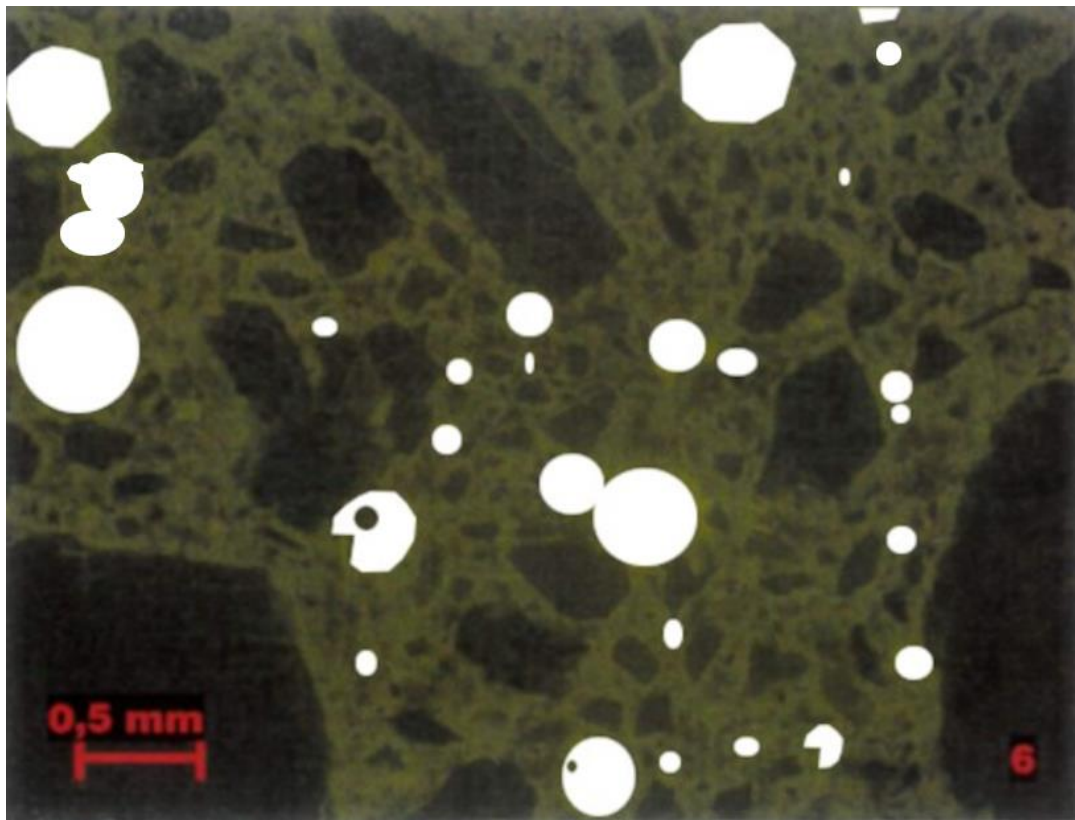
Yleiset huomiot: Kuva edustaa samaa poralierönäytettä kuin edellinen, eli sen sirotepinta on ehjä. Kuvan yläreuna sijoittuu noin 12 mm:n etäisyydelle lattian pinnasta mitattuna, eli nähtävä alue edustaa lattian syvempää kerrosta. Kuvassa ei ole näkyvissä sirotepintaa, sillä sirotepinnan keskimääräinen syvyys on aikaisempien näytteiden perusteella noin 4–5 mm. Kuvan ohuthienäyte on valaistu ultraviolettivalolla.

Sirotepinta: Kuvassa ei ole nähtävissä sirotepintaa, sillä kuva edustaa lattian syvempää kerrosta. Kuvan 6 perusteella voidaan kuitenkin todeta sirotepinnan olevan ehjä.

Runkoaines: Nähtävä runkoaines on kooltaan noin 0,1–3 mm. Kuvassa nähtävät yli 2 mm rakeet ovat muodoltaan pyöreä-, ja alle 2 mm rakeet teräväsärmäisiä. Kiviaines on ehjää ja tasaisesti jakautunutta.

Sideaine: Sideaine näyttää väriltään laajalti tasaiselta, joten hydrataatioasteen voidaan olettaa olevan suurimmilta osin korkea. Paikoitellen pienen runkoaineksen ympärillä sideaineen väri on ympäröivää sementtiä tummempaa, mikä voi viitata paikallisesti epätasaiseen hydrataatioon ja vesisementtisuhteeseen. Sideaineen kiinnittyminen runkoainekseen on tiivistä, eikä näytteen pintaosan kaltaista rakomaista huokoisuutta runkoainesarakeiden ympärillä ole nähtävissä.

Huokoisuus: Koska ultraviolettivalaistussa kuvassa huokosten rajat ovat helposti silmällä havaittavissa, suoritettiin tälle kuvalle manuaalinen arvio huokosten osuudesta nähtävällä alueella. Arviointimenetelmä ei perustu standardeihin tai yleiseen käytäntöön, mutta koska tämän työn tapauksessa kuvien tulkinta on joka tapauksessa tulkitsijan virheelle altista, arvioitiin sen käyttäminen tässä tapauksessa hyväksyttäväksi. Kuvan suojuhuokoseksi luettavat huokokset merkittiin muusta kuvasta poikkeavalla värillä, kuten kuvasta 8 käy ilmi. Tämän jälkeen laskettiin merkintäväristen pikselien määrän suhde kuvan kokonaispikselimäärään. Tällä menetelmällä määritettiin 15 420 kuvan kaikista 205 524 pikselistä huokosiksi, eli huokosten määrä kuvassa on noin 7,5 %. Kuvassa nähtävä huokoisuus on huomattavasti yli sirotteen käytölle suositellun 3 %:n rajan, ja lähellä jopa suojuhuokostetun betonin 8 %:n ylärajaa. Huokokset ovat kaikki suojuhuokosten kokoisia, eikä huokoisuus täten ole tiivistyksestä johtuvaa.



Kuva 8: Kuvasta 7 käsin poimitut suojuhuokokset on merkitty valkoisella. Merkintäväriin osuus koko kuvan pikselimäärästä on noin 7,5 %.

Halkeilu: Kuvassa ei ole havaittavissa halkeilua. Aikaisemmasta kuvasta tiedetään näytteen pintaosassa olevan pieni syvyysuuntainen mikrohalkeama, mutta se ei ulotu näytteen syvempiin kerroksiin.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET JA VIRHEARVIO

Aikaisemmissa luvuissa esitettyjä tietoja yhdistelemällä voidaan tehdä johtopäätös casekohteen sirotepinnan irtoamisen aiheuttajasta. Tutkimuksen johtopäätöksen virhearvio auttaa lukijaa arvioimaan tutkimustuloksen luotettavuutta.

4.1 Irtoamisen syy

Ohuthieiden tulkinnan ja urakoitsijan haastattelun perusteella ensisijainen syy sirotteen irtoamiselle on ollut epäselvästä syystä aiheutuva betonin liian korkea huokoisuus. Sirotteen levitys, hierto ja jälkihoito on toteutettu ohjeiden mukaisesti ja ammattitaidolla noudattaen huokostamattomalle betonille tarkoitettuja työtapoja. Huokostetun betonin tapauksessa sirotteen kiinni hiertäminen olisi tehtävä huomattavasti pienemmissä määrin ja varovammin, jotta tiivistymisen johdosta pintaa kohti nousevan ilman aiheuttama heikko kerros voitaisiin välttää.

Huokoisuuden määrä on ollut työsuorituksen aikaan tiedostamatonta, mistä johtuen lattiaa on työstetty huokostamattoman betonin edellyttämien tapojen mukaisesti. Tästä johtuen sirotteen alapintaan on noussut alusbetonista ilmaa, joka on kasautunut lauttamaisesti, aiheuttaen halkeaman kaltaisen pinnan suuntaisen heikon tason. Myös ehjien näytteiden tapauksessa on havaittavissa vastaavaa huokosten lauttautumista. Niiden tapauksessa huokoslautta on kuitenkin jäänyt kauemmas sirotteen alapinnasta, eikä pinta siksi ole irronnut.

Kohteessa käytetyn sirotteen asettamisissa vaatimuksissa mainittiin alusbetonin alhainen kutistuma. Lattiaa varten valmistettuun betoniin käytettiin SR-sementtiä, jonka kutistuma on pienempi suhteessa yleisimmin käytettyihin sementtilaatuihin. Betonin kutistuman osalta valinta oli siis sirotteen käytölle optimaalinen. Betoni oli niin ikään tilattu huokostamattomana, joten sirotteen vaatimukset oli tiedostettu myös korkeimman sallitun ilmamäärän osalta. Betonin lujuusluokka ja raekoko ovat suositusten mukaiset, eikä betonissa ollut havaittavissa erottumista.

Sirotteen sideaineen hydratoituminen on silmin arvioitavilta osin tasaista, joten voidaan arvioida sen laadun ja toiminnan olleen odotettua. Sirotteen sideaineen liian alhainen määrä voisi olla osatekijä alhaiseen tartunnan tasoon, mutta tätä ominaisuutta ei voi tarkasti saatavilla olleista näytteistä määrittää. Sideaineen hydrataation edellyttämä kustaus on myös saatu hiertämisen avulla nostettua läpi sirotekerrosten. Hierron tiivistävä vaikutus on nähtävillä pinnasta otetuilla ohuthieillä, kun huokoisuuden määrää verrataan

syvemmistä kerroksista otettuihin ohuthieisiin. Hierto on siis ollut oikea-aikaista ja riittävä.

Sirotetta käytettiin kohteessa vähemmän kuin yleensä, mistä johtuen sirotteen hydrataation vaatima pinnan kosteus on helpommin saavutettavissa. Esimerkiksi BLY:n (2013) mukaan sirotetta käytetään yleensä noin kuusi kilogrammaa neliometriä kohden, kun taas kohteessa käytettiin vain neljä kilogrammaa neliometriä kohden. Käytetty sirotteen määrä on siis kiinnittymisen kannalta suurempaan määrään nähden varmemmalla puolella. Käytetyistä lähteistä ei käynyt ilmi sirotteen vähäisemmän määrän käytöllä olevan muita vaikutuksia.

Betonissa ei ole havaittavissa merkittävää pystysuuntaista halkeilua, joka viittaisi kuivumisolosuhteiden soveltumattomuuteen tai jälkihoidon puutteellisuuteen. Myös haastattelun perusteella lattian jälkihoitamiseksi tehdyt toimet ovat noudattaneet sirotteen tuoteohjeita tarkasti.

Sirotteen irtoaminen tapahtui noin puoli vuotta joulukuussa tapahtuneen valun jälkeen, eli ulkona vuodenaika muuttui talvesta kesäksi, ja vuorokauden keskilämpötila nousi. Hallin lämpötila pysyi kuitenkin jatkuvasti selvästi yli 0°C:ssa valun kuivumisen ajan, joten rakenne ei ole voinut jäätyä. Täten ei ole syytä epäillä esimerkiksi jäätyminen aiheuttamaa betonin valelujuuutta, joka betonin sulaessa olisi kadonnut ja irrottanut sirotepinnan.

Syytä betonin huokoisuudelle ei ilmene tehdyssä analyysissä. Tilattu betoni ei sisältänyt huokostinta, mutta ohuthieistä nähtävät huokokset ovat suojahuokosen kokoisia. Huokosten koon vuoksi tiivistämisen osuutta huokoisuuden syntyyn ei ole syytä epäillä. Vaihtoehtoja selittämättömän huokoisuuden syyille voisivat siis esimerkiksi olla lisäaineen laadullinen virhe tai liiallinen kuljetuksen aikainen sekoitus. Varmuutta huokoisuuden aiheuttajasta ei kuitenkaan käytössä olevilla menetelmillä voida saada.

Kun kohteen ongelmien todennäköinen syy on päätelty, voidaan todeta, että merkittävän hyödyn lattian laadun turvaamiselle olisi tuonut betonin ilmamäärän mittaaminen työmaalla. Käytettäessä sirotetta huokostamattoman betonin kanssa ongelmia ilmamäärän suhteen ei kuitenkaan ole odotettavissa, joten on ymmärrettävää, ettei betonin ilmamäärän mittausta ole kohteen tapauksessa koettu tarpeelliseksi, sillä tilattu betoni on nimenomaisesti ollut huokostamatonta. Betonin laatu on toimittajan vastuulla, eikä tapauksen kaltaista ylimääräistä huokoisuutta ole työvaiheessa mahdollista paljain silmin havaita.

4.2 Analyysin virhearvio

Ohuthietutkimus ja pinnan irtoamissyyn analysointi on ammattitaitoa vaativa tehtävä, ja luotettavan johtopäätöksen tuottaminen edellyttää tutkijaltaan laajaa tietämystä sekä mahdollisimman paljon todenmukaisesti kohdetta kuvaavaa näyttemateriaalia. Petrografinen tutkimus sisältää paljon tulkitsemissa, ja tutkijan tapa kiinnittää huomiota eri asioihin on henkilökohtainen ja luultavasti myös kokemuksen myötä muuttuva. Tutkimusta varten löydetty materiaali ohuthieiden tulkittamisen tueksi oli melko niukkaa, ja lähteiden välistä vertailua oli siksi hankalaa toteuttaa. Tietojen perusteella tehdyt havainnot näytteistä pyrkivät kuitenkin ottamaan mahdollisimman suuren määrän asioita huomioon, ja tulkintatapa säilyi neutraalina ja uusille näkökulmille avoimena läpi tutkimuksen. Laajempi kokemuspohja aiheeseen liittyen toimisi varmasti tutkimuksen luotettavuutta parantavana tekijänä.

Ohuthieiden analyysin luotettavuuden kannalta merkittävää olisi ollut saatavilla olleita näytteitä laajempi pääsy kohteesta otettuihin ohuthienäytteisiin, sekä porattujen näyte-kappaleiden silmämääräinen havainnointi. Kustakin näytteestä olisi ollut hyödyllistä nähdä sekä pinnan että syvempien kerrosten betonin rakenne, jotta esimerkiksi pinnan työstön aiheuttamia huokosrakenteen ja raejakauman muutoksia olisi voitu arvioida tarkemmin. Muun muassa hierto tiivistää lattiapintaa huomattavasti, jolloin esimerkiksi alusbetonin runsas huokoisuus ei ole aina riittävällä tavalla havaittavissa pinnan läheisyydessä. Lisäksi ohuthieiden analyysiä kuvista ei voida pitää mikroskoopilla tehtävää tutkimusta vastaavana, sillä kuvien laatu ja valotus voivat aiheuttaa muutoksia niistä nähtäviin ominaisuuksiin ja niiden havaittavuuteen.

Kuvasta 8 määritetty 7,5 %:n huokoisuus on korkea jopa huokostetulle betonille. Analyysin menetelmänä käytetty pikseleiden värin määrittäminen on kuitenkin mittausten menetelmänä riippuvainen käyttäjän kyvystä valikoida huokosen rajat todenmukaisesti. Määrittämiseen käytettävä alue on lisäksi vain noin 4,5 mm leveä ja 3 mm korkea, joten se edustaa huomattavan pientä osaa betonista. Huokosten määrittäminen samalla metodilla suuremman alueen kattavista, pienemmän mittakaavan kuvista on suhteellisen hankalaa ja epäluotettavaa, sillä kuvien yksityiskohtien laatu on heikompi ja värit haaleampia.

Analyysin laajentamiseksi olisi ollut hyödyllistä saada tietoa otettujen näytteiden puristuslujuuksista. Poikkeuksellisen suuri huokoisuus olisi voitu havaita puristuslujuuden merkittävänä alenemisena. Puristuslujuusmittauksia ei ollut saatavissa tätä tutkimusta varten. Lisäksi esimerkiksi sirotteen ja betonin osa-aineiden laadunvarmistuksen tuottamien dokumenttien perusteella olisi voitu arvioida ongelman syytä laajemmin, mutta tuotevalmistajat eivät olleet halukkaita luovuttamaan kyseisiä tietoja.

LÄHTEET

ASTM C856/856-M20 (2020). Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. American Society for Testing and Materials. 15 s.

Master Top 450 (2006), BASF Construction chemicals Finland Oy. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://docplayer.fi/5868097-Taloudellinen-kvartsi-dry-shake-kuivasirote-lattiankovetin-teollisuuden-kaupan-tai-asuintalojen-betonilattioille-tyypillinen-suunnittelu.html>

BY45 (2014). Betonilattiat. Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 187 s.

BY72 (2021). Betonin laadunvarmistus - Osa 1 - Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohuthiestä. Suomen betoniyhdistys ry. Saatavissa (viitattu 16.4.2023): <https://www.betoniyhdistys.fi/julkaisut/verkkojulkaisut.html>

BY201 (2018). Betonitekniikan oppikirja. Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 568 s.

Contesta Oy, ohuthietutkimus. Tarkemmat tunnistetiedot salattu tekijänoikeussyistä. Kuvien käyttämiseen kandidaatintutkielmassa on saatu tekijänoikeuksien haltijan kirjallinen lupa.

Finnsementti Oy, Pienempi kuivumiskutistuma SR-sementillä ja SRA-Parmix-lisäaineella, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/tietoa-betonista-tietoa-betonista-suunnittelijalle/pienempi-kuivumiskutistuma-sr-sementilla-ja-sra-parmix-lisaaineella/>

Fridh, K. & Lagerblad B. (2013). Carbonation of indoor concrete: measurements of depths and degrees of carbonation. Lund university. Saatavissa (viitattu 3.4.2023): <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4007141/4390007.pdf>

Holopainen, Perttu, toimitusjohtaja, Betoniteam Oy, Jyväskylä. Puhelinhaastattelu 21.4.2023, haastattelijana Mikael Nieminen.

Kekäläinen P. (2013). Potkua petrografiaan Tanskasta. Betoniteollisuus ry. Saatavissa (viitattu 30.3.2023): https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1304_71-73.pdf

PiiMat Oy, Kuivasirotteet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.2.2023): <https://PiiMat.fi/tuotteet/kuivasirotteet/>

Punkki, J. & Al-Neshawy, F. (2017). Robust Air - Tutkimus betonin ilmamäärän kohoamiseen vaikuttavista tekijöistä. Betoniteollisuus ry. Saatavissa (viitattu 27.3.2023): https://betoni.com/wp-content/uploads/2017/10/BET1703_74-79.pdf

SFS-EN 12390-3 (2019). Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 20 s.

SFS-EN 12390-7 (2019). Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 6 s.

Suomen Betonilattiyhdistys BLY (2013). Suunnittelu- ja työohje kuivasirotteiden käyttämisestä betonilattioissa. Saatavissa (viitattu 17.2.2023): <http://www.bly.fi/File/BLY16.pdf?rnd=1390297845>

Suomen Betonilattiyhdistys BLY (2017). Yhteenveto BLY:n antamista lausunnoista 1988-2016. Saatavissa (viitattu 16.2.2023): http://www.bly.fi/File/BLY-OHJE_4-2017_Yhteenveto_BLY-lausunnoista_1988-2016.pdf?271279

Suomen betoniyhdistys ry, Betonisanasto, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto.html>