

Antti Nousiainen

**Tutkimus sorateiden pinnan lujuusominaisuuksien
parantamisesta teollisuuden sivutuotteilla**

**TUTKIMUS SORATEIDEN PINNAN LUJUUSOMINAISUUKSIEN
PARANTAMISESTA TEOLLISUUDEN SIVUTUOTTEILLA**

Antti Nousiainen
Opinnäytetyö
Syksy 2016
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, yhdyskuntatekniikka

Tekijä: Antti Nousiainen

Opinnäytetyön nimi: Tutkimus sorateiden pinnan lujuusominaisuuksien parantamisesta teollisuuden sivutuotteilla

Työn ohjaaja(t): Terttu Sipilä, Heikki Isohookana ja Esa Perälä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2016

Sivumäärä: 37 + 2 liitettä

Stabilointi on menetelmä, jota käytetään sorateiden parantamiseen. Stabiloinnilla voidaan parantaa vanhan tierakenteen päällysrakennekerrosta tai rakentaa täysin uutta. Se ehkäisee rakenteen muodonmuutoksia ja vaurioita sekä vähentää stabiloitavan kerroksen hienoaineksen routimista. Stabiloinnilla lisätään kuormituskestävyyttä ja korjataan pinnan epätasaisuuksia liikennöitävillä alueilla.

Tässä opinnäytetyössä tavoitteena oli selvittää stabilointia sorateiden parantamismenetelmänä sekä tutkia, voidaanko teollisuuden muuten kaatopaikalle meneviä sivutuotteita käyttää hyväksi tien lujuusominaisuuksien parantamiseen.

Opinnäytetyössä tehtiin Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa erilaisia massaseoksia, joissa käytettiin sideaineina lentotuhkaa, masuunikuonaa ja sementtiä. Massaseoksista tehtiin koekappaleita, joiden ominaisuuksia testattiin puristuslujuuskokeella. Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Oulun yliopiston kanssa.

Kokeista saatiin tuloksia eri massaseosten tiheydestä ja puristuslujuudesta. Puristuslujuustuloksia hyväksikäyttäen analysoitiin seosten sopivuutta sorateiden pinnan lujuusominaisuuksien parantamiseen.

Koekappaleiden puristuslujuustuloksia verrattiin käytössä oleviin ohjearvoihin. 10 %:n sideainepitoisuudella ja 60 %:n vesipitoisuudella tehdyt massaseokset, jotka sisälsivät sideaineina lentotuhkaa ja masuunikuonaa, antoivat parhaat tulokset testatuista massaseoksista. Tulokset antoivat hyvän pohjan tulevaisuudessa mahdollisesti tehtäville jatkotutkimuksille.

Asiasanat: soratie, stabilointi, sideaine, lentotuhka, masuunikuona, sementti

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	5
2 STABILOINTI SORATEIDEN PARANTAMISMENETELMÄNÄ	6
2.1 Sekoitusmenetelmät	7
2.1.1 Asemasekoitus	8
2.1.2 Paikallasekoitus	10
2.2 Stabilointimenetelmät	12
2.2.1 Bitumistabilointi (BST)	12
2.2.2 Komposiittistabilointi (KOST)	13
2.2.3 Masuunihiekkastabilointi (MHST, MHST-A)	13
2.2.4 Sementtistabilointi (SST)	14
2.3 Sivutuotteet stabilointimateriaaleina	14
3 PÄÄLLYSRAKENNEKOEKAPPALEIDEN VALMISTAMINEN	16
3.1 Koekappaleissa käytetyt sideainemateriaalit ja aktivaattorit	16
3.1.1 Lentotuhka	16
3.1.2 Masuunikuona	18
3.1.3 Sementti	18
3.1.4 Natriumhydroksidiliuos	19
3.2 Massaseosten valinta	20
3.3 Massaseosten valmistus	21
3.4 Koekappaleiden valmistus	23
4 PÄÄLLYSRAKENNEKOEKAPPALEIDEN TESTAUS	26
4.1 Testausten tavoitteet	26
4.2 Tarkasteltavat arvot	26
4.2.1 Tiheys	26
4.2.2 Puristuslujuus	27
5 TIHEYS- JA PURISTUSLUJUUSTULOKSET	31
6 POHDINTA	35
LÄHTEET	37
LIITTEET	38

1 JOHDANTO

Luonnonmateriaalien saatavuuden heikkeneminen on lisännyt kiinnostusta korvaavien stabilointimateriaalien käyttöön. Teollisuuden sivutuotteiden käytön lisääminen tarjoaa mahdollisuuden vähentää luonnonmateriaalien käyttöä stabiloinnissa. Tarkoituksena oli tutkia, voidaanko teollisuuden muuten kaatopaikalle meneviä sivutuotteita käyttää hyväksi sorateiden pinnan lujuusominaisuuksien parantamiseen.

Stabiloinnilla parannetaan vanhaa tai rakennetaan täysin uutta tien päällysrakennekerrosta. Se ehkäisee rakenteen muodonmuutoksia ja vaurioita sekä vähentää stabiloitavan kerroksen hienoainekseen routimista. Stabiloinnilla lisätään kuormituskestävyyttä ja korjataan pinnan epätasaisuuksia liikennöitävillä alueilla. Stabiloinnissa käytetään asema- tai paikallasekoitusmenetelmää uuden massan valmistamiseen sekä erilaisia materiaalikohtaisia stabilointimenetelmiä uuden päällysrakenteen luomiseen. (2, s. 9.)

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää sorapintaisten teiden parantamista stabiloimalla käyttäen hyväksi teollisuuden sivutuotteita. Työ tehtiin yhteistyössä Oulun yliopiston kanssa.

Työssä suoritettiin Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa puristuslujuuskokeita erilaisista massaseoksista tehdyille koekappaleille ja samalla selvitettiin koekappaleiden tiheydet. Kokeiden tavoitteena oli selvittää soratien pinnan kulutuskestävyyttä ja kantavuutta.

Käytetyt massaseokset sisälsivät vaihtelevassa määrin kiviainesta, vettä tai natriumhydroksidiliuosta sekä sideaineina lentotuhkaa, masuunikuonaa ja sementtiä. Puristuslujuuskoetukset ja tiheysmittaukset tehtiin keväällä 2015.

2 STABILOINTI SORATEIDEN PARANTAMISEN MENETELMÄNÄ

Stabilointi on menetelmä, joka soveltuu vanhan tien päällysrakenteen parantamiseen sekä täysin uuden päällysrakenteen luomiseen (kuva 1). Stabiloinnilla lisätään soratien pinnan kulutus- ja kuormituskestävyyttä. Stabiloinnin vaikutuksesta päällysrakenteen yläosan jäykkyys kasvaa ja kuormitus jakaantuu laajemmalle alueelle. Tämä pienentää myös alempien rakennekerrosten sekä pohjaan taipumaa ja urautumista. Stabiloidun rakenteen vaihtoehtoja ovat sitomaton kantava kerros ja kantavan kerroksen asfalttibetoni (ABK). Stabilointimenetelmät luokitellaan tavallisesti käytettävän sideainetyypin perusteella. (1, s. 8.)



KUVA 1. Kerrostabilointityöt käynnissä Vuosaaren satamassa (3, s. 27)

Ensimmäisiä stabilointimenetelmiä olivat sementtistabilointi ja bitumistabilointi. 1990-luvun aikana kehitettiin vaihtoehtoisiksi menetelmiksi komposiittistabilointi, masuunihiekkastabilointi ja Remix-stabilointi. Uusien stabilointimenetelmien kehittäminen aloitti myös uusien sekoitusmenetelmien ja niiden vaatiman kaluston kehittämisen. Uusien menetelmien ja kaluston kehittäminen on aina ollut ko-

keellista. Koerakentamisella ja laboratoriokokeilla on ollut suuri rooli tässä prosessissa. Eri menetelmillä stabiloituja kohteita seuraamalla voidaan erotella eri menetelmien ominaisuuksia ja tutkia niiden soveltuvuutta eri olosuhteissa. Vaihtoehtoisten menetelmien ansiosta stabiloinnin kilpailukyky on parantunut Suomessa. (1, s. 8.)

Kehitystyön ansiosta ja sitä jatkamalla voidaan vastata yhä paremmin ja monipuolisemmin tiestön kunnostuksen haasteisiin. Stabiloinnista onkin kehittynyt ympäristön säästämisen kannalta paras vaihtoehto tierakenteiden parantamiseen. Vanha tierakenne pyritään aina käyttämään hyödyksi sataprosenttisesti, joten uutta materiaalia tarvitaan vain vähän. Lisäksi lisättävänä materiaalina, eli sideaineena, voidaan käyttää monia teollisuuden sivutuotteita. Tämän ansiosta säästetään myös niiden vaatimasta jätehuollosta. (1, s. 8.)

2.1 Sekoitusmenetelmät

Sekoitusmenetelmät voidaan jakaa sekoitustavan mukaan asemasekoitus- ja paikallasekoitusmenetelmiin. Stabiloinnit luokitellaan massassa käytettävien materiaalien mukaan. (2, s. 13.)

Asemasekoitusmenetelmässä stabiloitavat materiaalit sekoitetaan keskenään massaksi sekoitusasemalla, josta se tuodaan levityskohteeseen. Paikallasekoitusmenetelmässä työvaiheet ovat esijyrsintä, kastelu tarvittaessa, lisäaineksen levitys tarvittaessa, sideaineen lisäys, stabilointijyrsintä, pinnan muotoilu ja tiivistäminen. (2, s. 13.)

Sekoitusmenetelmä valitaan vertailemalla vaihtoehtoja. Valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat käytettävissä olevat materiaalit, rakennusolosuhteet, kuten tasausviihan paikka ja tiealueen leveys, työn tavoitteet, työn kustannukset sekä rakenteelle suunniteltu käyttöikä. Jos kohde sisältää aiemmin tehdyn lujiteverkon tai vanhoja stabilointikerroksia, ne vaikuttavat myös menetelmän valintaan. Vaikka asemasekoituksessa massan koostumuksesta saadaan tasaisempi, paikallasekoitus on Suomessa paljon yleisempi vaihtoehto stabilointia tehtäessä. (2, s. 13.)

2.1.1 Asemasekoitus

Asemasekoitusmenetelmässä rakennetaan asema, jossa stabiloinnissa käytettävät materiaalit sekoitetaan keskenään (kuva 2). Massa kuljetetaan asemalta stabilointikohteeseen, jossa se levitetään tasaisesti rakenteeseen. Asemasekoitusmenetelmää käytetään tavallisesti uuden tien rakentamiseen tai vanhan rakenteen parantamiseen, kun stabiloitava kerros koostuu uudesta kohteeseen liittävästä materiaalista. (2, s. 14.)



KUVA 2. Sekoitusasema

Asemasekoitus tarjoaa monipuoliset mahdollisuudet materiaalien ja sideaineiden käyttöön. Nykyaikaisella päällysteasemalla voidaan elvyttää asfalttirouhe, annostella kiviaineslajitteet, jauhemaiset täyte- ja sideaineet, vesi sekä bitumi eri muodoissa tarkasti, jolloin massasta tulee homogeeninen. (2, s. 14.)

Asemasekoitukselle tavallista on kiviaineslajitteiden, rouheen ja sideaineen tarkka annostelu, mahdollisuus elvyttää ja/tai lämmittää rouhetta ja kiviainesta, massan homogeenisuus ja tasalaatuisuus sekä kerrospaksuuden tasaisuus. Lisäksi asemasekoituksella voidaan valmistaa kaikkia perinteisiä ja komposiitistabilointimassoja, voidaan käyttää ohuempaa kerrosta kuin paikallasekoituksessa sekä tasaisuus- ja poikkileikkauskaltevuusarvot ovat päällystealustaksi hyvät. Vanhojen rakennekerrosten materiaaleja ei pystytä hyödyntämään. (1, s. 10.)

Asemasekoitusmenetelmässä stabilointimassa valmistetaan erillisellä sekoitusasemalla. Massa kuljetetaan rakennuspaikalle, jossa se levitetään tiivistetylle ja muotoillulle alustalle. Tämän jälkeen kerros tiivistetään. (2, s. 43.)

Sekoitin on jatkuvasekoitteinen tai annoskone. Sekoittimeen rakennetaan bitumin vaahdotuslaite vaahtobitumistabilointia käytettäessä. Emulsiostabilointia tehtäessä sideaine on valmis sen saapuessa sekoitusasemalle tai se valmistetaan asemalla käyttäen emulgointilaitetta. Komposiittistabiloinnissa sekoitusasemalla käytetään omia syöttölaitteita hydraulisille sideaineille, bitumille, vedelle ja rouheelle sekä sen elvyttimelle. Elvyttimien täytyy olla luonnossa hajoavia. (2, s. 43.)

Massan levittämisessä käytetään tavallisesti asfalttilevittämiä, joilla pystytään tekemään jopa 200 mm:n kerroksia yhdellä kertaa. Tiivistykseen käytetään vähintään 10 tonnia painavia täryjyriä (kuva 3). (1, s. 42.)



KUVA 3. Täryjä tiivistämässä tierakennetta

2.1.2 Paikallasekoitus

Paikallasekoitusmenetelmässä sideaine sekoitetaan stabiloitavaan kerrokseen työmaalla, jossa kohde sijaitsee. Sekoitukseen käytetään työhön tarkoitettua jyr-sintäsekoitinta. Paikallasekoitukselle on ominaista vanhojen rakennekerrosten ja päällysteiden hyötykäyttö, lujuudeltaan ja muodoltaan huonommankin kiviaineksen käyttö ja vähäinen lisäkiviainesten kuljetustarve. Paikallasekoitukseen ei vaadita ympäristölupaa. Huonoa tässä menetelmässä on se, että sideaineen ja kiviaineksen sekoittuminen ei ole yhtä tasalaatuista kuin asemasekoituksessa. (2, s. 13.)

Esijyrsintä (EJYR) tehdään tavallisesti aina, kun stabiloidaan vanhoja teitä. Esijyrsinnällä tarkoitetaan tien vanhan päällysteen ja kantavan kerroksen jyr-sintää ja jyr-sittyjen materiaalien sekoittamista keskenään. Esijyrsintä tehdään ennen varsinaista stabilointia. (2, s. 13.)

Stabilointijyrsintä (STJYR) on paikallasekoituksen työvaihe, jossa stabiloitavaan materiaaliin sekoitetaan massaan lisättävät sideaineet. Kerrospaksuus on tavallisesti 150-200 mm. (2, s. 13.)

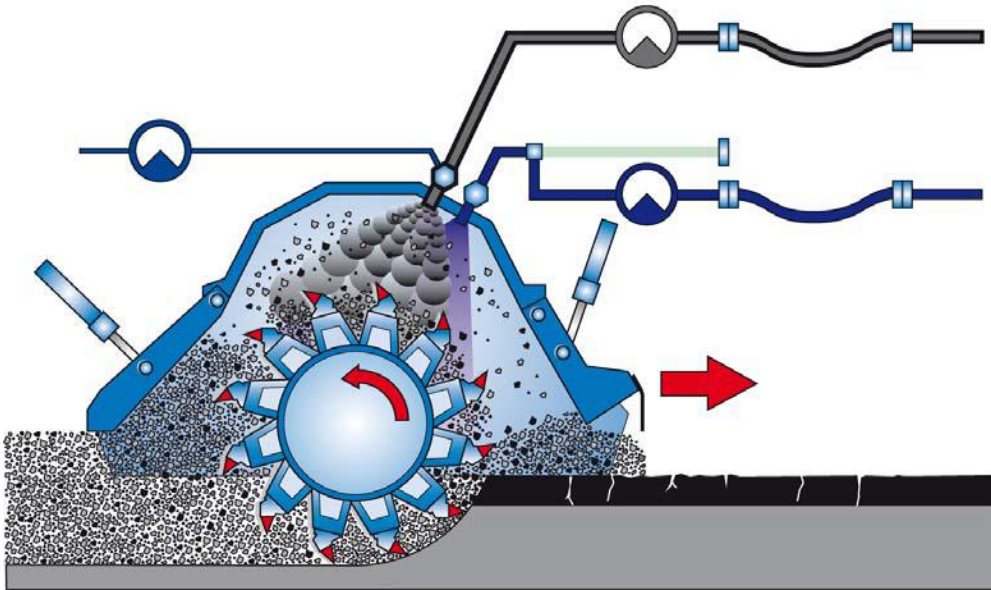
Sekoitusjyrsintä (SJYR) on paikallasekoitusmenetelmä, jota käytetään päällysrakenteessa olevien materiaalien homogenisointiin ilman sideaineen lisäystä ja sen tulos riippuu sekoitettavan kerroksen materiaalien laadusta ja rakeisuudesta. Kerrospaksuus on tavallisesti 150-200 mm. Sekoitusjyrsintä ei ole stabilointimenetelmä. (2, s. 13.)

Paikallasekoitusmenetelmässä stabilointijyrsin jyr-sii kiviaineksen ja sekoittaa siihen sideaineen. Koneesta saadaan ulos tasainen kerros massaa, minkä jälkeen stabiloitu kerros muotoillaan ja tiivistetään. (1, s. 40.)

Jyrsintäkoneena käytetään stabilointijyrsintä tai muuta sekoitukseen hyväksyttyä jyr-sintä. Se, käytetäänkö esijyrsintään asfalttijyrsintä, stabilointijyrsintä tai muuta vastaavat ominaisuudet omaavaa laitetta, riippuu päällysrakenteen materiaalista. Yli 80 mm:n kivet poistetaan stabiloitavasta kerroksesta haraamalla tai kivenkeruulaitteella. Kerros muotoillaan esijyrsinnän jälkeen oikeaan muotoon

tiehöylällä ja tiivistetään, jotta massan siirtely olisi mahdollisimman vähäistä. (1, s. 40.)

Stabilointijyrsimen tehoon vaikuttavat sekoittimen roottorin halkaisija, piikkien järjestely, roottorin pyörimisnopeus sekä sekoitinjyrsimen työnopeus (2, s. 42.). Kuvassa 4 nähdään stabilointijyrsimen rumpu.



KUVA 4. Stabilointijyrsimen rumpu (2, s. 43)

Koneen perässä oleva laite, useimmissa stabilointijyrsimissä takaportti, täytyy olla asennettu niin, ettei lajittumista tapahdu. Riittävä teho jyrsimessä takaa sen, että tierungon kiinteimmät kohdat eivät hidasta työnopeutta eikä jyrsintäsyvyyttä tarvitse vaihtaa työn aikana. Keskimääräinen työsaavutus on yleensä 1 000 m² tunnissa. (1, s. 42.)

Tiivistykseen käytetään painavia täryjyriä säädettävällä iskunpituudella. Minimipainon tulee olla 10 tonnia. Tasaukseen käytetään kaltevuusautomaatiikalla varustettua kalustoa. (1, s. 42.)

2.2 Stabilointimenetelmät

Stabilointimenetelmät luokitellaan käytettävän sideainetyypin perusteella. Sideaineena stabiloinnissa on tavallisesti käytetty vaahdotettua tai emulgoitua bitumia, masuunihiekkaa ja sementtiä. (2, s. 16.)

2.2.1 Bitumistabilointi (BST)

Bitumistabilointia (BST) voidaan tehdä monella eri menetelmällä. Paikallasekoituksena tai asemasekoituksena tehdään vaahtobitumistabilointia ja bitumiemulsiostabilointia. Remix-stabilointilaitteella tehdään paikallasekoituksena Remix-stabilointia, jossa käytetään sideaineena bitumiemulsiota. (1, s. 10.)

Vaahtobitumistabilointi (VBST) on menetelmä, jossa bitumia vaahtoutetaan sekoittamalla vettä kuumaan bitumiin ylipaineessa. Seoksen annetaan purkautua sekoituskammioista normaaliin ilmanpaineeseen, jolloin se vaahtoutuu ja sen tilavuus kasvaa vähintään 15-kertaiseksi alkuperäisestä. Vaahtotettu bitumi sekoittuu kylmään ja kosteaan kiviainekseen ja sitoo hienoaineksen. (1, s. 11.)

Bitumiemulsiostabilointi (BEST) on menetelmä, jolla muodostetaan sidoksia kivirakeiden välille. Bitumiemulsiossa bitumi on jakautunut pieniksi pisaroiksi veteen. Koskettaessaan kivipintaa emulsio murtuu, jolloin vesi ja bitumi erottuvat toisistaan ja bitumi tarttuu kiviin. (1, s. 11.)

Remix-stabilointi (REST) on menetelmä, jossa sideaineena käytetään bitumiemulsiota. Vanha päällyste esilämmitetään ja kantavan kerroksen hienontunut yläosa jyrsitään. Uutta kiviainesta lisätään tarvittava määrä ja se sekoitetaan bitumiemulsion kanssa. Sekoituksen jälkeen massa levitetään ja tiivistetään. Sekoitus tehdään jatkuvatoimisella sekoittimella, joka on tehty pelkästään tätä tarkoitusta varten. (1, s. 11.)

Remix-stabiloinnissa kerrospaksuus on yleensä noin 80-120 mm. Tässä menetelmässä on olennaista, että lämmityksen ansiosta massa sekoittuu, homogenoituu ja tiivistyy hyvin. Tästä johtuen massalla on hyvä sään ja liikenteen kestävyys. Jos kohteen päällystekerros ylittää 100 mm, se täytyy jyrsiä ohuemaksi ennen stabilointia. (2, s. 17.)

2.2.2 Komposiittistabilointi (KOST)

Komposiittistabilointi on menetelmä, jossa käytetään samassa päällysrakenteen kerroksessa bitumista ja hydraulista lisättävää sideainetta. Komposiiteissa on tarkoituksena yhdistää bitumisen ja hydraulisen sideaineen hyvät ominaisuudet. Bituminen sideaine antaa hyvän joustavuuden ja kestävyuden epätasaisia painumia ja routanousuja vastaan. Hydraulinen sideaine antaa hyvän deformaatiokestävyyden rakenteen parhaan mahdollisen kuormituskestävyyden ja kestoian saavuttamiseksi. Bitumin lisäys voidaan tehdä vedellä vaahdotettuna tai emulgoituna ja massa voidaan sekoittaa asfalttirouhetta. Komposiittistabilointimenetelmiä on useita ja sillä on monipuoliset kehitysmahdollisuudet. (2, s. 17.)

Komposiittistabilointi voidaan tehdä paikallasekoituksena tai asemasekoituksena. Paikallasekoituksessa esijyrityn, muotoillun ja tiivistetyn kerroksen päälle levitetään sementti tai muu hydraulinen sideaine, minkä jälkeen tehdään normaali bitumistabilointi vaahdotetulla tai emulgoidulla sideaineella. (1, s. 12.)

2.2.3 Masuunihiekkastabilointi (MHST, MHST-A)

Masuunihiekkastabilointi on menetelmä, jossa sideaineena käytetään terästeollisuuden sivutuotetta masuunihiekkaa. Masuunihiekan koostumus kemiallisesti on hyvin samantapainen kuin sementillä. Masuunihiekkastabiloinnilla saadaan aikaan ominaisuuksiltaan sementtistabilointia muistuttava rakenne. Menetelmässä voidaan tarvittaessa käyttää sementtiä aktivaattorina, joka nopeuttaa sitoutumisreaktiota. Masuunihiekan sitoutumisaika on hitaampi kuin sementillä, mistä johtuen myös työstöaika pitenee. (1, s. 12.)

Masuunihiekkastabilointi tehdään tavallisesti paikallasekoitusmenetelmänä. Muotoillun ja tiivistetyn stabiloitavan kerroksen päälle levitetään masuunihiekka ja mahdollinen aktivaattori eli sementti. Ne sekoitetaan stabiloitavaan kerrokseen stabilointijyrityksellä, minkä jälkeen kerros muotoillaan ja tiivistetään. Stabiloitavaan kerrokseen on mahdollista käyttää myös asfalttirouhetta. (2, s. 18.)

Menetelmän lyhenne on MHST, kun käytetään pelkkää masuunihiekkaa ilman aktivaattoria. Lyhenne MHST-A tulee siitä, kun käytetään sementtiä aktivaattorina. (2, s. 18.)

2.2.4 Sementtistabilointi (SST)

Sementtistabilointi on menetelmä, jossa sekoitetaan sementtiä, vettä ja stabiloitavaa kiviainesta keskenään. Sekoituksesta muodostuu sementtiliima, joka kovettuessaan sitoo kiviaineksen rakeet toisiinsa. Sidoksen lujuus riippuu käytetyn sementin pitoisuudesta, sementtilaadusta, vesi-sementti-suhteesta, kiviaineksen rakeisuudesta, stabiloidun kerroksen tiiveydestä ja iästä. Yleisimmin käytetty sementtipitoisuus on 3-7 % kiviaineksen kuivapainosta (2, s. 18.). Sementtistabilointia on pääasiassa Suomessa käytetty kantavan kerroksen ja ajoittain myös jakavan kerroksen parantamiseen (1, s. 13).

Sementtistabilointi voidaan tehdä paikallasekoitus- tai asemasekoitusmenetelmällä. Sementti lisätään joko jauheena tai lietteenä. Paikallasekoituksessa stabiloitava kerros esitiivistetään, minkä jälkeen sen päälle levitetään sementti. Sementti sekoitetaan stabiloitavaan kerrokseen stabilointijyrsimellä, minkä jälkeen kerros muotoillaan ja tiivistetään. Stabiloitavaan kerrokseen on mahdollista käyttää myös asfalttirouhetta. (2, s. 18.)

2.3 Sivutuotteet stabilointimateriaaleina

Luonnon materiaalin käyttö Suomessa on vaikeutunut huonon saatavuuden vuoksi. Kiviaineksia luonnosta käytetään Suomessa noin 100 miljoonaa tonnia/vuosi. Noin 80 % tästä materiaalista saadaan erillisiltä maa-aineksen otto- paikoilta. Rakentamisalueilta saatavan kiviaineksen määrä on vain 20 %. Väylärakentamiseen käytetään lähes 50 % kaikesta kiviaineksesta Suomessa. (3, s. 12.)

Käyttämällä hyväksi teollisuuden sivutuotteita voidaan säästää luonnon materiaalien käytöstä. Teollisuuden sivutuotteita syntyy vuosittain arviolta 16 miljoonaa tonnia, josta kaivosteollisuuden sivukiveä syntyy arviolta 12 miljoonaa tonnia. Monet sivutuotteet päätyvät kaatopaikalle, jos niitä ei pystytä käyttämään hyödyksi. (3, s. 12.)

Teollisuuden sivutuotteiden kilpailukykyyn vaikuttavat monet asiat. Useat sivutuotteet ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan erittäin hyviä. Esimerkiksi hyvälaatui-

set masuunikuonatuotteet ja betonimurskeet voivat kelvata sellaisinaan käytettäväksi tien jakavassa tai kantavassa rakennekerroksessa. Osa sivutuotteista on liian herkkiä vedelle niiden hienorakeisuuden vuoksi, mistä johtuen niiden käyttö voi olla vaikeaa. Sivutuotteiden sijainti on myös otettava huomioon niiden käyttöönotossa. (3, s. 13.)

Ympäristöominaisuuksiltaan sivutuotteet eroavat huomattavasti toisistaan. Osa sivutuotteista luetaan jätteiksi ja niiden käyttö vaatii ympäristölupaa. Pohjavesialueiden alueiden ulkopuolella osaa jätteiksi luokitelluista sivutuotteista voidaan käyttää ilman ympäristölupaa. Valtioneuvoston asetuksen perusteella näissä tapauksissa täytyy kuitenkin käyttää ilmoitusmenettelyä. Kivihiili, turve, betonimurske ja puuperäisten aineiden polton lentotuhkat ja pohjatuhkat ovat materiaaleja, joita voidaan käyttää pelkällä ilmoitusmenettelyllä monissa tapauksissa, vaikka ne ovat jätteiksi luokiteltuja. Osa sivutuotteista ei lueta jätteiksi, vaan tuotteiksi, jolloin niiden käyttö ei enää tarvitse ympäristölupaa tai ilmoitusta. Näitä ovat esimerkiksi ferrokromikuonasta tai masuunikuonasta valmistetut tuotteet. Ympäristöön liittyvät rajoitteet poistavat käytön mahdollisuuden monilta sivutuotteilta. Taloudelliset ja tekniset rajoitteet vaikuttavat myös suuresti sivutuotteiden käyttöön. Tästä johtuen vain osa teollisuuden sivutuotteista on hyväksyttävä vaihtoehto korvaamaan luonnon materiaaleja. (3, s. 13.)

Sivutuotteiden käyttö jakaantuu sidottuihin materiaaleihin ja sitomattomiin rakeisiin materiaaleihin. Sidotuissa sivutuotteissa on käytetty sideaineena bitumia, sementtiä ja kalkkia tai näistä tehtyjä erilaisia yhdistelmiä. Lisäksi muita sideaineina toimivia sivutuotteita ovat esimerkiksi lentotuhka, masuunihiekka ja masuunikuona. (3, s. 13.)

3 PÄÄLLYSRAKENNEKOEKAPPALEIDEN VALMISTAMINEN

Päällysrakennekoe-kappaleita valmistettiin kuudesta eri massaseoksesta. Massaseoksissa käytettiin kiviainesta runkoaineena ja lisäksi kolmen eri sideaineen yhdistelmiä sideaineseoksena. Koekappaleet valmistettiin Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion tiloissa.

Ensimmäisenä valmistettiin koekappaleita kolmesta erilaisesta massaseoksesta. Näistä valittiin massaseos, jossa oli paras sideaineyhdistelmä puristuslujuuskokeiden perusteella. Tätä sideaineseosta käyttäen päätettiin valmistaa uudet kolme massaseosta eri sideainepitoisuuksilla, jotta löydettäisiin parhaat koetustulokset antava massaseos.

3.1 Koekappaleissa käytetyt sideainemateriaalit ja aktivaattorit

Koekappaleiden valmistamiseen valittiin käytettäväksi kolmea eri sideainetta, jotka olivat lentotuhka, masuunikuona ja sementti. Lisäksi myöhemmin osaan koekappaleita käytettiin veden sijasta natriumhydroksidiliuosta. Materiaalien valinnasta vastasi Oulun yliopisto.

3.1.1 Lentotuhka

Lentotuhka syntyy sivutuotteena energiatuotannon polttoprosesseissa. Lentotuhkan laatu riippuu käytetystä polttoprosessista ja tuhkanerotustekniikasta. Lähtökohtaisesti kaikki lentotuhka luokitellaan jätteeksi. Jäte- ja ympäristösuojelulaki sääntelevät lentotuhkan hyödyntämistä rakentamiseen. Tuhkien käyttäminen maanrakentamisessa vaatii sääntelyjen vuoksi joko ilmoittamismenettely tai ympäristöluvan. (4, s. 8.)

Tuhka muodostuu polttoprosesseissa palamattomista aineista. Tuhkalaatujen luokittelu riippuu niiden keräyspaikasta (pohja- ja lentotuhka) ja niiden polttoprosessista. Tuhkia voi syntyä kivihiilen polton-, seospolton- sekä rinnakkaispolton seurauksena. (4, s. 8.)

Lentotuhka kerääntyy voimalaitosten suodattimiin, joista se kerätään voimalaitoksen varastosiiloihin tai kasoihin. Säilöntämenetelmä voi vaikuttaa tuhkan tekniisiin ominaisuuksiin, jos se kasattuna joutuu esimerkiksi sään armoille. Säilöntäpaikasta tuhka lastataan kuljetusvälineeseen, jolla se toimitetaan hyötykäyttöön. ”Lentotuhka koostuu pääosin seuraavista mineraaleista:

- Kvartsi, SiO_2 , 45-55 %
- Korundi, Al_2O_3 , 20-30 %
- Hematiitti, Fe_2O_3 , 8-11 %
- Kalsiumoksidi, CaO , 4-7 %
- Magnesiumoksidi MgO , 3-5 %
- Kaliumoksidi, K_2O , 1-2 %
- Natriumoksidi, Na_2O , 0-2 %.” (5.)

Lentotuhka saattaa sisältää myös pienissä määrin raskasmetalleja, joista merkittävimmät ovat molybdeeni, kromi, arseeni, lyijy ja seleeni. Pilaantuneelle maalle annetut raja-arvot ylittyvät todella harvoin, koska raskasmetallipitoisuudet ovat lähes olemattomia. Lentotuhka koostuu pallomaisista ja kuitumaisista rakenteista ja se on väriltään harmaata. Mitä enemmän palamistuotteessa on hiiltä, sitä tummempaa se on väriltään. Oikein säilytetty kuvua lentotuhka kovetuu ajan myötä rakenteessa kiinteäksi. Tiivistettynäkin lentotuhka on erittäin kevyt materiaali. (5.)

Teknillinen tarkastuskeskus (TTK) valvoo lentotuhkan laatua ja koostumusta. Voimalasta lähtevistä kuormista otetaan aina näyte ja se analysoidaan laadun varmistamiseksi. Lentotuhkan CE-merkintä tuli Suomessa käyttöön vuonna 2005 eurooppalaisen lentotuhkastandardin valmistuttua. (5.)

Opinnäytetyössä käytetty lentotuhka oli peräisin kivihiilen polttamisprosessista ja se toimitettiin Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorioon Meri-Porin voimalaitokselta, Porista.

3.1.2 Masuunikuona

Raakarautaa valmistettaessa syntyy masuunikuonamursketta, kun murskataan ilmajähdytettyjä kuonakappaleita. Mursketta syntyy nykyään melko vähän vesijähdytyksen ollessa yleisempi tapa. Masuunikuona sisältää kalkkia ja on muoltaan särmikäs. Masuunikuona on huokoinen ja emäksinen materiaali. (3, s. 38-39.)

Masuunikuonan ominaisuudet riippuvat valmistusprosessista. Hyvän tiiveyden saavuttaminen on monesti vaikeaa, koska tiivistäminen voi rikkoa masuunikuonan rakeita. Masuunikuonan sijoituskohde on valittava huolellisesti, jotta sen ympäristövaikutukset voidaan hallita. Kohteet, joissa masuunikuonaa käytetään tulisi tavallisesti päällystää, koska kuonan sisältämä rikki voi aiheuttaa kastuessaan hajuhaittoja. Masuunikuona on täysin sitoutuneena erittäin kovaa, mutta sen sitoutuminen kestää 2-10 kk. Huonosti sitoutuneena se voi olla lievästi routiva. Sitoutumista voidaan nopeuttaa käyttämällä sementtiä aktivaattorina. (3, s. 38-39.)

Työssä käytetyn masuunikuonajauheen (Masuunikuona KJ-400) toimitti ja valmisti Finnsementti. Masuunikuonajauhe on piilevästi hydraulinen sideaine, jota valmistetaan jauhamalla granuloitua masuunikuonaa (9.).

3.1.3 Sementti

Sementti on koostumukseltaan hyvin hienorakeinen, kuten lentotuhka ja masuunikuona. Sideaineena se kovettuu veden vaikutuksen ansiosta erittäin lujaksi. Sementin ainesosat eli klinkkerimateriaalit reagoivat veden kanssa, jolloin hydrataatioreaktiossa syntyy veteen liukenemattomia hydrataatteja. Betonia valmistettaessa sementti sitoo runkoaineen hienoaineksen ja kivet yhteen. Lopputuotteena on kova ja kestävä rakenne. Sama periaate pätee sementtistabiloinnissa sorateitä parannettaessa. Sementin pääraaka-aineet ovat kalkkikivi ja kalsiumkarbonaatti. (6.)

”Sementit jaetaan viiteen pääläjiin niiden koostumuksen perusteella (SFS-EN 197-1/A):

- CEM I Portlandsementti
- CEM II Portlandseossementti
- CEM III Masuunikuonaselementti
- CEM IV Pozzolaaniselementti
- CEM V Seossementti.” (7, s. 29.)

Kuvassa 5 on lueteltu Suomessa käytettävät rakennussementit sekä yleisimmät erikoissementit.

- Suomessa käytetään seuraavia rakennussementtejä;
 - Yleissementti (CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N), normaalisti kovettuva sementti.
 - Rapidsementti (CEM II/A-LL 42,5 R), nopeasti kovettuva sementti.
 - Pikaselementti (CEM I 52,5 R), nopeasti kovettuva sementti.
 - Megasementti (CEM I 42,5 R), soveltuu valmisbetoniin ja elementtien valmistamiseen
 - SR-sementti (CEM I 42,5 N SR), normaalisti kovettuva portlandsementti.
 - Valkosementti (CEM I 52,5 N), valkoisiin tuotteisiin tarkoitettu sementti.
- Erikoissementeistä voidaan mainita;
 - Injektointiselementti, erittäin hienoa sementtiä,
 - Muurauselementti, käytetään muuraustöissä,
 - Aluminaattiselementti, kuumuutta kestäviin rakenteisiin.

KUVA 5. Sementtityypit (7, s. 31)

Tässä opinnäytetyössä käytettiin Finnsementin valmistamaa Rapidsementtiä (CEM II/A-LL 42,5 R). Rapidsementti on nopeasti kovettuva portlandseossementti (10.). Sementtiä on käytetty sitoutumisen nopeuttamiseksi ja puristuslujuuden kasvattamiseksi tien kantavassa ja jakavassa kerroksessa.

3.1.4 Natriumhydroksidiliuos

Natriumhydroksidi (NaOH) on niin sanottu alkaliaktivaattori. Kasvattamalla OH⁻ ionien konsentraatiota sideaineseoksessa se parantaa seoksen lujuutta jo varhaisessa vaiheessa. Natriumhydroksidi nopeuttaa materiaalien reaktiota. (8, s. 4.)

Natriumhydroksidin kanssa voidaan käyttää natriumsilikaattiliuosta reaktioiden tehostamiseksi. Natriumkationit tasapainottavat kovettumisreaktiossa syntyvien vapaiden anionien varausta. Sementtiä korvaavat sideaineet voivat muodostaa kalsium-silikaatti-hydraattirakenteen korvaavia natrium-aluminosilikaatti-hydraattirakenteita. Natriumhydroksidin vaikutusta on testattu sideaineseoksissa aiemminkin. Toimivaksi on todettu jopa 10 mol/l konsentraatio lisättävässä liuoksessa. (8, s. 4-5.)

Tässä työssä natriumhydroksidiliuosta käytettiin yhdessä sideaineseoksessa. Liuoksen natriumhydroksidikonsentraationa käytettiin 3 mol/l.

3.2 Massaseosten valinta

Työn alkaessa valittiin aluksi kolme eri massaseosta, joista valmistettiin ensin koekappaleet (taulukko 1). Massat valmistettiin taulukossa 3 esitetyn rakeisuusohjekäyrän mukaisesti.

TAULUKKO 1. Massaseokset 1-3 10 %:n sideainepitoisuudella

Seos- nu- mero	Sideaineyhdistelmä	Sideainepitoisuus	Vesipi- toisuus %	NaOH - pitoisuus %
1	Lentotuhka - Sementti	10 % (50 % LT + 50 % Sem)	60	0
2	Lentotuhka - Masuunikuona	10 % (50 % LT + 50 % MaKu)	60	0
3	Lentotuhka - Masuunikuona – Sementti	10 % (50 % LT + 35 % MaKu + 15 % Sem)	60	0

Kolmessa ensimmäisessä massassa oli tarkoitus käyttää 40 %:n vesipitoisuutta sideainen massasta. Massa todettiin silmämääräisesti liian kuivaksi ja vettä lisättiin, kunnes massan vesipitoisuus vaikutti sopivalta. 60 %:n vesipitoisuus todettiin hyväksi.

Lentotuhka-masuunikuona-seos todettiin puristuslujuustulosten perusteella parhaaksi vaihtoehdoksi. Tästä syystä seuraavaksi tehdyissä massaseoksissa valittiin käytettäväksi uudestaan lentotuhkan ja masuunikuonan sideaineseokoitusta (taulukko 2). Tällä kertaa kokeiltiin eri sideainepitoisuuksia sekä lisättiin akti-

vaattoriksi natriumhydroksidiliuosta. Sideainepitoisuuden vaihtelun vuoksi vesipitoisuutta muutettiin jälleen, jotta saataisiin koekappaleiden valmistamista varten sopiva käsiteltävyys.

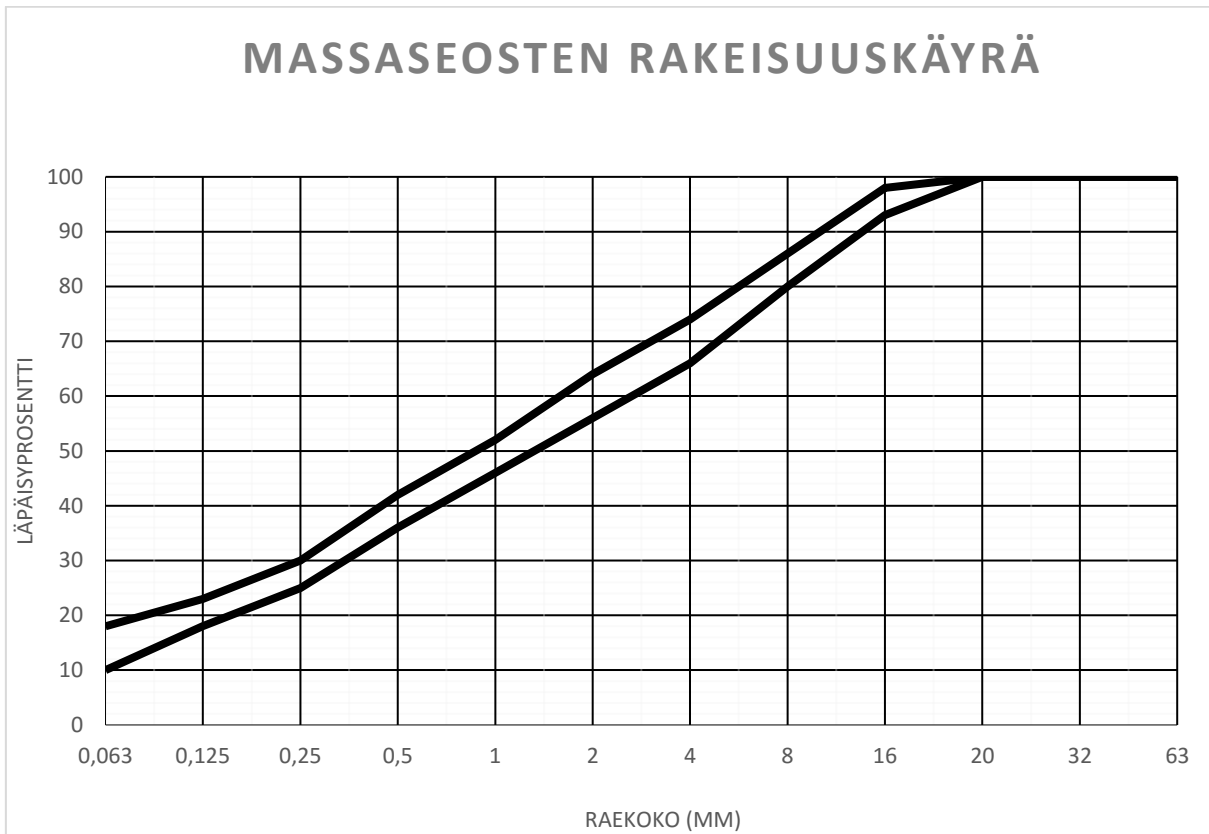
TAULUKKO 2. Massaseokset 4-6 vaihtelevalla sideainepitoisuudella

Seos- nu- mero	Sideaineyhdistelmä	Sideainepitoisuus	Vesipi- toisuus %	NaOH - pitoisuus %
4	Lentotuhka - Masuunikuona	15 % (50 % LT + 50% MaKu)	40	0
5	Lentotuhka - Masuunikuona	5 % (50 % LT + 50 % MaKu)	80	0
6	Lentotuhka - Masuunikuona - NaOH	10 % (50 % LT + 50 % MaKu + NaOH)	0	60

3.3 Massaseosten valmistus

Koekappaleiden valmistus aloitettiin runkoaineeseen käytettävän kiviaineksen seulonnalla. Laboratoriossa olleet kolme eri kalliomurske-erää seulottiin niiden rakeisuuskäyrän selvittämiseksi. Näitä kolmea eri kiviainesmassaa hyväksikäyttäen saatiin aikaiseksi runkoaine käytettäviin massoihin. Seulontaa varten käytettiin 0,063-20 mm:n seulasarjaa ja seulonta suoritettiin siihen tarkoitettussa täryttimessä laboratorion tiloissa. Jokaiselle seulalle jäänyt kiviaines punnittiin erikseen, jolloin saatiin aikaan rakeisuuskäyrä jokaisesta kolmesta eri kiviainesmassasta.

Massaseos valmistettiin laboratoriossa olevalla laastibetonimyllyllä (kuva 7). Runkoainemateriaalien ja sideaineiden rakeisuuskäyriä yhdistämällä saatiin las-kettua, kuinka paljon kutakin materiaalia tuli käyttää, jotta saavutetaan ohjekäyrän mukainen massaseos. Kaikki massaseokset valmistettiin ohjekäyrän mukaan virhemarginaalien sisällä pysyen (kuva 6).



KUVA 6. Massaseosten rakeisuusohjekäyrä

Runkoaine ja sideaine laitettiin myllyyn ja sekoitettiin samalla vettä lisättäessä. Massasta valmistettiin koekappaleet mahdollisimman nopeasti, jotta vesi ei haihtuisi massasta.



KUVA 7. Laastibetonimylly

3.4 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleita valmistettiin yhdeksän kappaletta jokaisesta massasta, kolme per koetusikä. Koekappaleet valmistettiin ICT-testerillä lieriön muotoisella muotilla, jonka halkaisija oli 100 mm (kuva 8). Valmistetusta massasta otettiin arviolta muottiin sen verran massaa, että valmiin koekappaleen korkeus saataisiin mahdollisimman lähelle 100 millimetriä. ICT-testerin asetuksina käytettiin 5 bariin ilmanpainetta ja 100 puristuskierrosta jokaiselle koekappaleelle. Koekappaleet laitettiin säilöön laatikkoon, jonka pohjalle laitettiin vettä ja päälle muovikate kosteuden säilyttämiseksi. Veden haihtuessa ajan kuluessa sitä täytyi käydä ajoittain lisäämässä, jotta koekappaleet eivät kuivuisi liikaa. Koekappaleet olivat astiassa siihen asti, kunnes ne olivat valmiita koetukseen. Koetusiät olivat 7, 28 ja 91 vuorokautta. Vetenä käytettiin puhdasta käyttövettä.

ICT-testerin lieriön muotoinen muotti täytettiin valmistetulla massalla. Muottiin punnittiin noin 1,8 kg massaa, jotta saataisiin valmiin koekappaleen korkeudeksi noin 100 mm.



KUVA 8. ICT-testeri

Kuvassa 9 nähdään juuri valmistettuja koekappaleita. Valmistamisen jälkeen koekappaleet laitettiin säilytysastiaan odottamaan koetusiän täyttymistä. Valmiin koekappaleen korkeus oli noin 100 mm ja halkaisija 100 mm.



KUVA 9. Juuri valmistettuja koekappaleita

4 PÄÄLLYSRAKENNEKOEKAPPALEIDEN TESTAUS

Testauksen tavoitteena oli mitata koekappaleiden tiheydet ja selvittää niiden puristuslujuus. Puristuslujuustuloksia verrattiin käytössä oleviin ohjearvoihin. Koekappaleet testattiin keväällä 2015.

4.1 Testausten tavoitteet

Kokeiden tavoitteena oli selvittää, miten lentotuhka, masuunikuona ja sementti soveltuvat sorapintaisen tien parantamiseen stabiloimalla. Runkoaineesta ja sideaineista valmistettiin aluksi kolme erilaista massaa, joista parhaaksi todettua lentotuhka-masuunikuona-sideaineyhdistelmää lähdettiin testaamaan vielä lisää kolmella erilaisella massaseoksella.

4.2 Tarkasteltavat arvot

Koekappaleille suoritettiin puristuslujuuskoe, josta saatiin selville suurin kuorma murtohetkellä. Jokainen koekappale mitattiin tarkkaan työntömittaa hyväksi käyttäen heti valmistamisen jälkeen sekä juuri ennen koetusta. Näin koekappaleista saatiin laskettua tiheys sekä poikkileikkauksen pinta-ala.

4.2.1 Tiheys

Keskimääräinen tiheys kullekin massaseokselle saatiin selville laskemalla niistä tehdyn yhdeksän koekappaleen tiheyden keskiarvo (kaava 1).

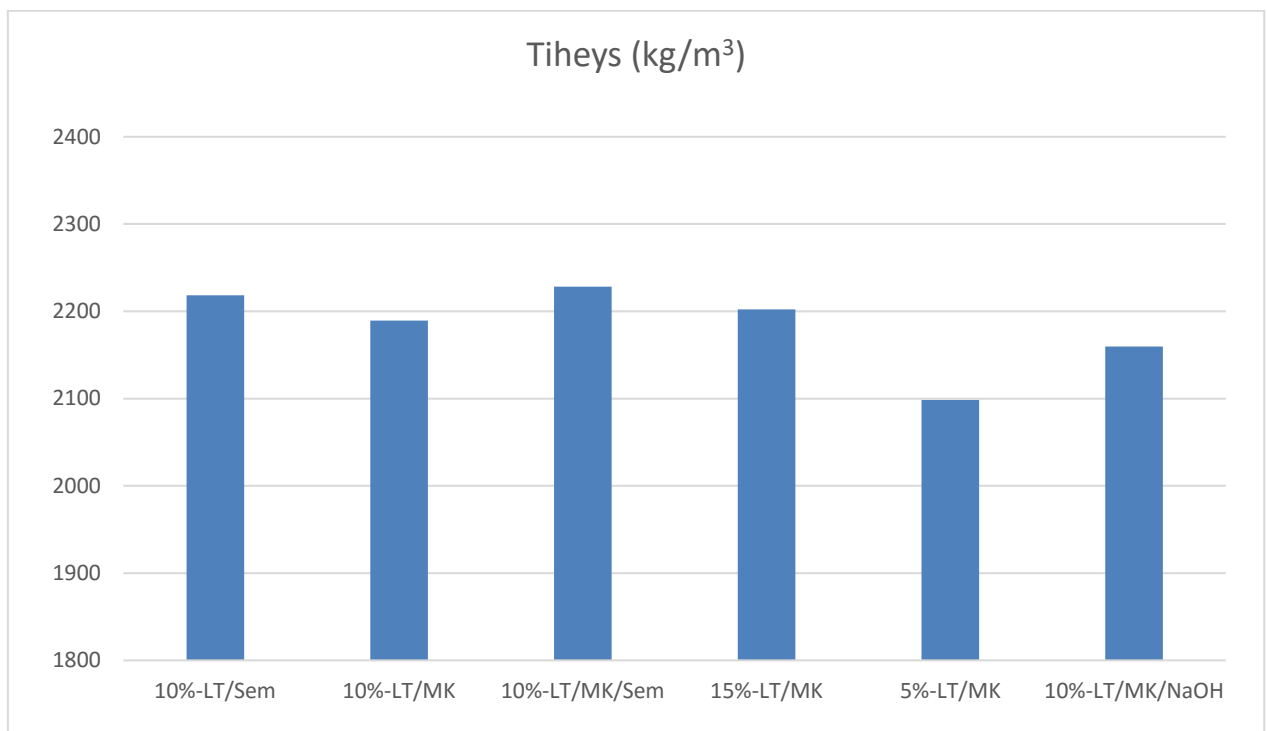
$$\rho_{ka} = \frac{\frac{m_1}{V_1} + \frac{m_2}{V_2} + \dots + \frac{m_9}{V_9}}{9} \quad \text{KAAVA 1}$$

ρ_{ka} = yhden massaseoksen koekappaleiden tiheyksien keskiarvo

m_n = yksittäisen koekappaleen massa

V_n = yksittäisen koekappaleen tilavuus

Kuvassa 10 on esitetty jokaisen massaseoksen koekappaleiden laskettujen tiheyksien keskiarvo.



KUVA 10. Koekappaleiden tiheyksien keskiarvot eroteltuna massaseosten mukaan

4.2.2 Puristuslujuus

Puristuslujuuskoe suoritettiin yleisaineen koetuslaitteella, jonka on valmistanut Dartec Ltd (kuva 11). Ennen koetusta koekappaleiden päät tasoitettiin ohuella rikkilaastikerroksella tasaisen puristusvoiman aikaansaamiseksi (kuva 12). Koneella selvitettiin koekappaleen suurin kuormitus murtohetkellä. Pinta-alaa ja kuormaa hyväksi käyttäen saatiin laskettua kappaleiden puristuslujuus (kaava 2).

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

KAAVA 2

f_c = puristuslujuus

F = suurin kuorma murtohetkellä (N/mm²)

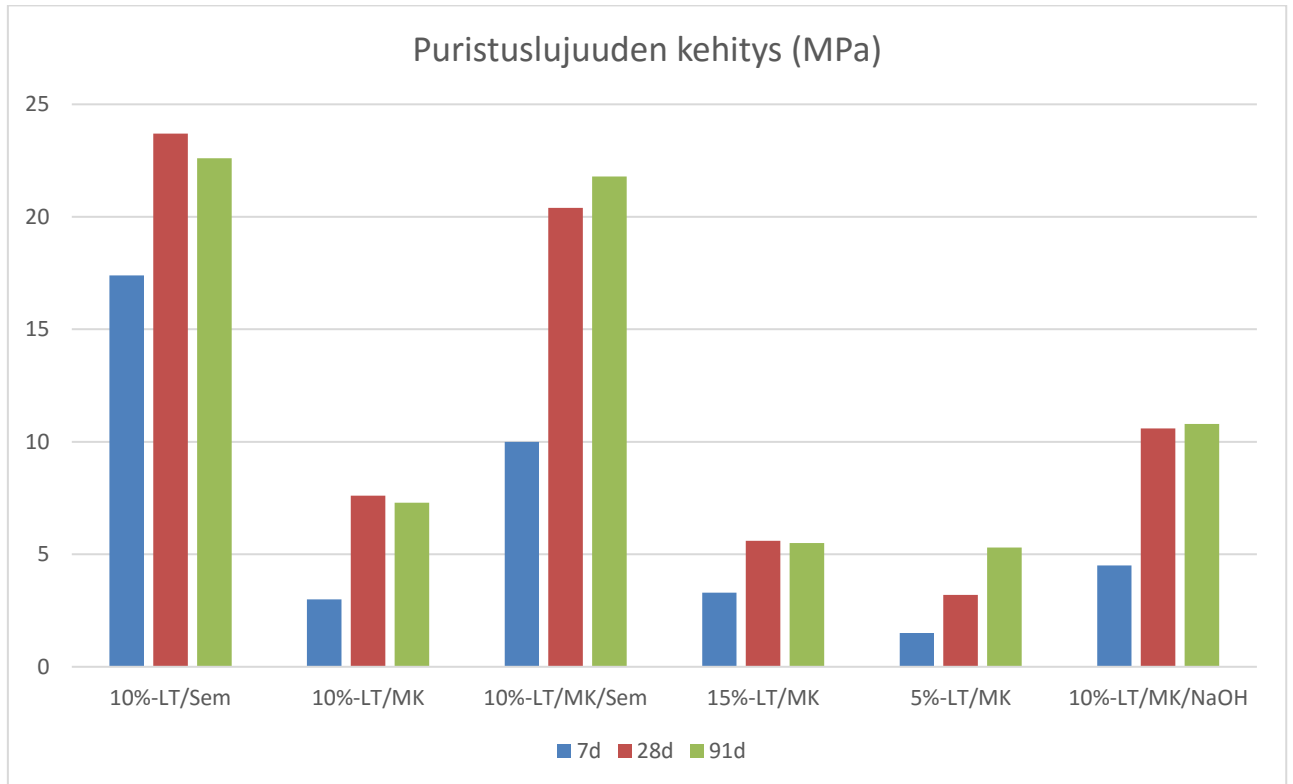
A_c = koekappaleen poikkileikkauksen pinta-ala (mm²)

Koekappaleet puristettiin yksitellen Dartec-koetuslaitteella (kuva 11). Laite lisäsi puristusvoimaa nopeudella 3,5 kN/s, kunnes koekappale murtui. Tämä koetus suoritettiin jokaiselle koekappaleelle sen koetusiän tultua täyteen.



KUVA 11. Dartec-koetuslaite

Kuvassa 12 on esitetty keskiarvo erikseen jokaisen massaseoksen ja koetusiän mukaan. Puristuslujuuden kehitystä tarkasteltaessa huomattiin, että 28 vuorokauden jälkeen kehitys oli olematonta tai hyvin vähäistä.



KUVA 12. Eri massaseoksista valmistettujen koekappaleiden puristuslujuudet eroteltuna koetusiän mukaan

Koekappaleiden päät tasoitettiin rikkilaastikerroksella rakennuslaboratorion tiiloissa. Kuvassa 13 koekappaleet ovat menossa puristuslujuuskoetukseen heti rikittämisen jälkeen.



KUVA 13. Koekappaleet rikitettyinä ennen koetusta

5 TIHEYS- JA PURISTUSLUJUUSTULOKSET

Koekappaleiden tiheydet pysyivät välillä 2 070–2 250 kg/m³. Yhtä lukuun ottamatta kaikkien massaseosten koekappaleiden tiheydet pysyivät lähellä 2 200:n kg/m³ tiheyttä. 5 %:n sideainepitoisuudella tehty lentotuhka-masuunikuonamassa antoi pienimmän tiheyden, n. 2 100 kg/m³. Tämä voidaan selittää sideainepitoisuuden pienuudella. Taulukossa 3 on esitetty koekappaleiden tiheydet jokaisella koetusiällä ja näiden keskiarvo. Tarkat tulokset on esitetty liitteessä 1.

TAULUKKO 3. Koekappaleiden tiheydet

Seosnumero	Sideainepitoisuus	Tiheys (kg/m ³)			
		7 vrk	28 vrk	91 vrk	keskiarvo
1	10 % (50 % LT + 50 % Sem)	2 240	2 220	2 200	2 220
2	10 % (50 % LT + 50 % MaKu)	2 190	2 210	2 180	2 190
3	10 % (50 % LT + 35 % MaKu + 15 % Sem)	2 190	2 250	2 240	2 230
4	15 % (50 % LT + 50 % MaKu)	2 250	2 180	2 180	2 200
5	5 % (50 % LT + 50 % MaKu)	2 090	2 110	2 100	2 100
6	10 % (50 % LT + 50 % MaKu + NaOH)	2 140	2 180	2 160	2 160

Parhaan puristuslujuuden antoivat oletetusti seokset numero 1 ja 3, joissa oli käytetty sementtiä sideaineseoksessa. Seos 1 (10 %: LT - Sem) saavutti 7 vuorokauden iässä jo 17,4 MPa:n puristuslujuuden ja 28 vuorokauden iässä jopa 23,7 MPa:n puristuslujuuden. 28 päivän jälkeen puristuslujuus ei enää kehittynyt.

Seos 3 (10 %: LT - MaKu - Sem) saavutti 7 vuorokauden iässä 10 MPa:n puristuslujuuden ja 28 vuorokauden iässä 20,4 MPa:n puristuslujuuden. 28 vuorokauden jälkeen ei tässäkään massassa kehittynyt enää puristuslujuus.

Seos 2 (10 %: LT - MaKu) oli oletetusti heikoin alkuperäisestä kolmesta massaseoksesta sementinpuutteen takia. 7 vuorokauden iässä se saavutti 3 MPa:n puristuslujuuden ja 28 vuorokauden iässä 7,6 MPa:n puristuslujuuden. Tässäkään massaseoksessa ei kehitystä tapahtunut 28 vuorokauden jälkeen.

Kolmessa ensimmäisessä seoksessa käytettiin 60 %:n vesipitoisuutta sideaine-seoksen massasta. Määrä todettiin sopivaksi hyvän käsiteltävyyden perusteella.

Sementtistabilointi ja masuunihiekkastabilointi olivat ainoat menetelmät, joille löytyi ohjeellisia arvoja puristuslujuudelle. Tuloksia päätettiin verrata sementtistabiloinnin ohjearvoihin masuunihiekkastabiloinnin ohjearvojen ollessa puutteelliset. Sementtistabiloinnissa 7:n vuorokauden koetusiälle annettiin tavoitteeksi 3-8 MPa ja 28:n vuorokauden koetusiälle 5-13 MPa. Näihin arvoihin verrattaessa todettiin, että sementtiä sisältäneet seokset olivat tarpeettoman lujia. Sementti jätettiin tästä syystä pois seuraavista massaseoksista. Lentotuhka-Masuunikuona-seoksen tulokset osuivat ohjearvojen sisäpuolelle, joten seuraavissa massaseoksissa jatkettiin näiden sideaineiden käyttöä.

Ensimmäiset kolme seosta valmistettiin 10 %:n sideainepitoisuudella seoksen kokonaismassasta. Seos 4 (15 %: LT - MaKu) valmistettiin niin ikään lentotuhka-masuunikuona-sideaineyhdistelmää käyttäen, mutta tällä kertaa 15 %:n sideainepitoisuudella. Tuloksiksi saatiin 7 vrk / 3,3 MPa ja 28 vrk / 5,6 MPa. 28 päivän jälkeen puristuslujuus ei enää kehittynyt. Tässä seoksessa vesipitoisuus oli 40 % sideaineseoksen massasta.

Seos 5 (5 %: LT - MaKu) valmistettiin myös lentotuhka-masuunikuona-sidenaineyhdistelmää käyttäen, mutta tällä kertaa 5 %:n sideainepitoisuudella. Tuloksiksi saatiin 7 vrk / 1,5 MPa, 28 vrk / 3,2 MPa ja 91 vrk / 5,3 MPa. Tässä massaseoksessa käytettiin 80 %:n vesipitoisuutta sideaineseoksen massasta. Koekappaleet olivat 7 vuorokauden iässä todella hauraita ja rikkilaastipintaa tehtäessä vain yksi kolmesta koekappaleesta selvisi ehjänä koetukseen (kuva 14). 7 vuorokauden koetusiän tulosta voidaankin pitää hyvin kyseenalaisena sen perustuessa vaan yhden koekappaleen tulokseen. Seos 5 (5 %: LT - MaKu) oli ainoa, jonka puristuslujuus kehittyi vielä 28 vuorokauden jälkeenkin.



KUVA 14. Vaurioitunut koekappale

Seos 6 (10 %: LT - MaKu - NaOH) valmistettiin lentotuhka-masuunikuona-sideaineyhdistelmällä ja 10 %:n sideainepitoisuudella samalla tapaa kuin seos 2 (10 %: LT - MaKu), mutta tällä kertaa lisättiin natriumhydroksidiliuosta aktivaattoriksi. Tuloksiksi saatiin 7 vrk / 4,5 MPa ja 28 vrk / 10,4 MPa. 28 vuorokauden jälkeen puristuslujuus ei enää kehittynyt. Tuloksista voidaan todeta, että natriumhydroksidiliuos vaikutti puristuslujuuden kehitykseen positiivisesti. Ero ei kuitenkaan ollut kovin huomattava. Taulukossa 4 nähdään edellä mainitut puristuslujuustulokset. Tarkat tulokset on esitetty liitteessä 2.

TAULUKKO 4. Koekappaleiden puristuslujuudet

Seos- numero	Sideainepitoisuus	Puristuslujuus (MPa)		
		7 vrk	28 vrk	91 vrk
1	10 % (50 % LT + 50 % Sem)	17,4	23,7	22,6
2	10 % (50 % LT + 50 % MaKu)	3,0	7,6	7,3
3	10 % (50 % LT + 35 % MaKu + 15 % Sem)	10,0	20,4	21,8
4	15 % (50 % LT + 50 % MaKu)	3,3	5,6	5,5
5	5 % (50 % LT + 50 % MaKu)	1,5	3,2	5,3
6	10 % (50 % LT + 50 % MaKu + NaOH)	4,5	10,6	10,8

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, voidaanko lentotuhkaa, masuunikuonaa ja sementtiä käyttää hyväksi sorateiden pinnan parantamiseen stabiloimalla. Oulun ammattikorkeakoulun laboratoriossa valmistettiin koekappaleita kuudesta eri massaseoksesta. Koekappaleista mitattiin tiheyttä ja puristuslujuutta kolmessa eri koetusiässä (7, 28 ja 91 vuorokautta), jotta nähtäisiin miten ominaisuudet kehittyvät.

Puristuslujuustuloksia verrattaessa käytössä oleviin ohjearvoihin voidaan päätellä, että massaseokset 2 (10 %: LT - MaKu) ja 6 (10 %: LT - MaKu - NaOH) kelpaisivat todennäköisesti parhaiten sorateiden parantamiseen. Näissä massoissa käytettiin 10 %:n sideainepitoisuutta, 60 %:n vesipitoisuutta sideaineen massasta ja sideaineseoksena lentotuhkaa (50 %) ja masuunikuonaa (50 %). Ainoana erona näissä massoissa oli, että toisessa käytettiin aktivaattorina natriumhydroksidiliuosta.

Sementtiä sisältävissä massaseoksissa nähtiin todella nopeaa puristuslujuuden kehitystä ja todella suuria kuorman kestävyksiä. Käytössä olevien ohjearvojen perusteella tulokset olivat tarpeettoman korkeita. Koetustulosten ja korkeiden hankintakustannusten perusteella voidaan päätellä, että sementtiä tulisi käyttää vain todella pienissä määrin sorateiden parantamiseen, jos ollenkaan.

Stabiloitavissa kohteissa on monesti tilanne, jossa liikenne alkaa kulkea välittömästi stabiloinnin jälkeen. Tästä syystä tiivistäminen tulisi tehdä todella hyvin. Tiivistämisen onnistumiseen vaikuttaa alustan kantavuus ja reunoilla luiskanjyrkkyys ja reunatuki.

Aikaisimmat puristuslujuuden tulokset olivat vasta 7 vuorokauden iässä testattuja, joten soratien pinnan deformaatiokestävyyttä välitöntä kuormitusta vastaan ei voida näillä tuloksilla ennustaa. NaOH-liuoksen todettiin 7 vuorokauden koetusiässä nopeuttaneen puristuslujuuden kehitystä. Ero tuloksissa oli kuitenkin melko pieni, joten on mahdollista, että natriumhydroksidiliuoksen käytöstä johtuvat kustannukset ja menetelmät eivät ole vaivan arvoisia.

Puutteellisen ohjearvojen takia tässä opinnäytetyössä saatujen tuloksien todellista toimivuutta käytännössä ei voida varmaksi tietää kokeilematta. Tavoitteena oli kuitenkin, että teollisuuden sivutuotteita, tässä tapauksessa lentotuhkaa ja masuunikuonaa, voitaisiin käyttää mahdollisimman paljon samalla säilyttäen soratien hyvä kuormituskestävyys. Vaikka sementin käyttö lisäisi tien kestävyyttä, pyrittiin sen käyttöä pitämään vähäisenä, jotta säilytettäisiin hyvä kustannustehokkuus.

Jatkotutkimuksissa voitaisiin tutkia, miten koekappaleet kestävät kuormitusta välittömästi valmistuksen jälkeen sekä yhden vuorokauden koetusiällä. Näin saataisiin suuntaa antavia tuloksia välittömän kuormituksen kestämisen suhteen. Masuunikuonan sitoutuminen voi kestää 2-10 kuukautta. Sementin käyttö nopeuttaisi masuunikuonan sitoutumista ja lisäisi puristuslujuuden aikaista kehitymistä, joten sen käyttöä pienemmissä määrin sideaineena voitaisiin vielä tutkia niin, että tulokset osuisivat raja-arvojen sisään. Sementin kanssa tai sen sijasta voitaisiin kokeilla myös esimerkiksi metakaoliinia. Muista sivutuotteista esimerkiksi betonimurske voisi olla kokeilemisen arvoinen materiaali.

Tässä työssä valmistettiin 9 koekappaletta per massaseos, 3 koekappaletta per koetusikä. Vastaavanlaisissa tutkimuksissa olisi suotavaa valmistaa enemmän koekappaleita, jopa 10 per koetusikä, luotettavampien tulosten saamiseksi.

Olisi mielenkiintoista nähdä, miten lentotuhka-masuunikuona-seos todellisuudessa kestää liikenteen ja sään kuormitusta. Tämä vaatisi teiden kunnossapitäjiltä halukkuutta kokeilla uusia massaseoksia. Kokeellisesti voitaisiin stabiloida jokin soratie käyttäen kyseistä massaseosta ja seurata tuloksia, jotta selviäisi, ovatko tulokset käytännössä hyviä ja kannattaako niitä lähteä jalostamaan eteenpäin.

LÄHTEET

1. Stabilointiohje, suunnitteluvaiheen ohjaus. 2002. Helsinki: Tiehallinto.
2. Päälysrakenteen stabilointi, suunnitteluvaiheen ohjaus. 2007. Helsinki: Tiehallinto.
3. Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa, suunnitteluvaiheen ohjaus. 2007. Helsinki: Tiehallinto.
4. Tuhkarakentamisen käsikirja, energiatuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. 2012. Luopioinen: Ramboll Finland Oy.
5. Yleistietoa lentotuhkasta. Oy Finn Ash-Power Ltd. Saatavissa: <http://www.ashpower.fi/tietoa.html>. Hakupäivä 30.9.2015.
6. Pihkala, Juhani. Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. Saatavissa: <http://prosessitekniikka.kpedu.fi/doc-html/sementti.html>. Hakupäivä 2.10.2015.
7. Kääriäinen, Hannu 2013. T510103 Betonitekniikka 1 3 op. Opintojakson luennot syksyllä 2015. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
8. Lentotuhkan stabilointi teollisuuden sivutuotteilla. 2014. Oulu: Oulun yliopisto.
9. Seosaineet ja silikajauheet. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/seosaineet-ja-silikajauheet/masuunikuonajauhe-kj400>. Hakupäivä 21.3.2016.
10. Rapidsementti. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/sementit/rapidsementti>. Hakupäivä 10.9.2016.

TULOKSET - TIHEYS

LIITE 1

Seos- numero	Runko- aines %	Sideaine %	Sideaineet %			NaOH % SA:n massasta	Vesipit. % SA:n massasta	Tiheys (kg/m ³)					
			LT	MaKu	Sem			7 vrk		28 vrk		91 vrk	
									ka		ka		ka
1	90	10	5	0	5	0	60	2242,8	2240	2233,2	2220	2190,0	2200
								2245,8		2227,4		2210,3	
								2223,1		2194,3		2197,0	
2	90	10	5	5	0	0	60	2204,9	2190	2219,6	2210	2177,8	2180
								2201,3		2201,8		2172,8	
								2155,4		2195,8		2174,9	
3	90	10	5	3,5	1,5	0	60	2191,4	2190	2239,7	2250	2238,6	2240
								2188,8		2228,0		2231,0	
								2201,5		2293,9		2241,0	
4	85	15	7,5	7,5	0	0	40	2285,0	2250	2175,2	2180	2180,0	2180
								2226,1		2181,6		2180,9	
								2252,0		2173,0		2166,3	
5	95	5	2,5	2,5	0	0	80	2107,6	2090	2108,0	2110	2120,0	2100
								2076,0		2107,5		2103,5	
								2072,4		2105,5		2084,8	
6	90	10	5	5	0	60	0	2131,7	2140	2168,6	2180	2170,3	2160
								2134,7		2183,8		2163,2	
								2143,7		2182,7		2157,8	

Huom.

Keskiarvotulokset pyöristetty

SA = Sideaine

Seos- numero	Runko- aines %	Sideaine %	Sideaineet %			NaOH % SA:n massasta	Vesipit. % SA:n massasta	Puristuslujuus (MPa)					
			LT	MaKu	Sem			7 vrk		28 vrk		91 vrk	
									ka		ka		ka
1	90	10	5	0	5	0	60	17,4	17,4	23,8	23,7	22,3	22,6
								17,4		24,8		22,5	
								17,4		22,6		22,9	
2	90	10	5	5	0	0	60	2,9	3,0	8,6	7,6	8,3	7,3
								3,0		7,2		7,2	
								! - 2,2		7,0		6,5	
3	90	10	5	3,5	1,5	0	60	9,5	10,0	22,3	20,4	23,3	21,8
								9,9		? - 19,7		22,7	
								10,6		? - 19,1		? - 19,5	
4	85	15	7,5	7,5	0	0	40	2,8	3,3	6,0	5,6	6,4	5,5
								3,2		5,8		5,2	
								3,9		5,1		5,0	
5	95	5	2,5	2,5	0	0	80	1,5	1,5	3,0	3,2	6,0	5,3
								! - 0,6		3,2		5,5	
								! - 0,6		3,4		4,3	
6	90	10	5	5	0	60	0	! - 3,3	4,5	10,8	10,6	11,7	10,8
								4,5		10,6		10,0	
								4,4		10,4		10,7	

Huom.

! = Hylätty koetustulos, koekappale vaurioitunut ennen koetusta

? = Hyväksytty koetustulos, koekappale lievästi vaurioitunut ennen koetusta

SA = Sideaine