

Päivämäärä
4/2020



Life-IP CIRCWASTE Finland (LIFE15 IPE/FI/004, osahanke C.10)

FINAL TECHNICAL REPORT OF THE PILOTING CIRCWASTE, SAMPAANALANLAHTI



Versio Versio 21.4.2020
Kirjoittaja Ari Mäkinen, Harri Jyrävä
Tarkastaja Tuomas Suikkanen, Pentti Lahtinen

Viite 1510029697-001

SI SÄLTÖ

1.	Johdanto	1
2.	Sampaanalanlahden massastabiloinnissa toteutetut koestabiloinnit hankkeen aikana	2
2.1	Yleistä massastabiloinnista ja Sampaanalanlahden pilottitoiminnan tavoitteista	2
2.2	Stabilointipilotti 2017	3
2.2.1	Lähtökohdat ja tavoitteet	3
2.2.2	Toteutus	3
2.2.3	Tulokset	7
2.2.4	Johtopäätökset	12
2.3	Stabilointipilotti 2018	13
2.3.1	Lähtökohdat ja tavoitteet	13
2.3.2	Ennakkotestit laboratoriossa	13
2.3.3	Toteutus	14
2.3.4	Tulokset	16
2.3.5	Johtopäätökset	21
3.	Päällysrakenteen tekniset kelpoisuustutkimukset	22
4.	Arviointia pilotointien perusteella/Kokonaisyhteenveto	22

LIITTEET

LIITE 1	Laadunvalvonnan yhteydessä toteutettujen teknisten kenttä- ja laboratoriokokeiden menetelmäkuvaukset (1 s.)
---------	---

1. JOHDANTO

Tähän raporttiin on koostettu kansallisen LIFE-IP Circwaste projektin C.10 osahankkeeseen liittyvien Sampaanalanhden pilottien lähtökohdat, tavoitteet, kuvaukset pilottiratkaisuista sekä keskeisimmät tulokset käytännön toteutuksien teknisen toimivuuden seurannasta. C.10 osavaiheen pilotointi koostuu kahdesta eri osasta: Sampaanalanhden massastabiloinnista teollisuuden jätteitä hyödyntämällä, sekä uusiomateriaaleilla toteutetusta kenttärakenteesta. Pilottien tavoitteena on löytää toimivuudeltaan, kustannuksiltaan ja ympäristöön vaikuttavilta päästöiltään kilpailukykyisiä vaihtoehtoratkaisuja verrattaessa niitä esimerkiksi Sampaanalanhden massakohteella normaalitilanteessa käytettävään lentotuhka-sementti sideaineeseen. Tavoitteena on myös, että Rauman UPM:n paperitehtaan alueella sijaitseva Rauman Biovoiman voimalaitoksen tuhkat pystytään hyödyntämään Sampaanalanhden alueella maarakentamisessa yli kymmenen vuoden ajan. Tässä raportissa esiteltyjä massastabilointipilotointeja on tehty Sampaanalanhden B-altaalla vuosina 2017 ja 2018. Päälysrakennepilotointi on tarkoitus toteuttaa 2020-2021 aikana.

Sampaanalanhden allasmassojen stabiloinnin aikaisemmissa vaiheissa vuosina 2012-2014 on otettu käyttöön toteutuksen lähtökohtana olleen sementtistabiloinnin korvaaminen sementti+lentotuhka-stabiloinnilla, jonka on mahdollistanut allasmassojen runkoaineen jalostaminen ulkopuolelta tuoduilla (väyläruoppauksen) massoilla ja kasatuhkan lisäämisellä ennen stabilointia (tai sen yhteydessä). Näiden vaikutus lopputuloksen laatuun on huomattava ja ilman niitä ylipäättään koko stabilointityö ei olisi todennäköisesti ollut taloudellisesti mahdollista. Tässä raportissa esiteltyjen vuosien 2017 ja 2018 pilottien lähtökohtana ja tavoitteena oli stabiloinnissa uusien jättepohjaisten lisäainekomponenttien ja uusien jättepohjaisten sideainereseptiikoiden vaikutusten tutkiminen sekä laatu-, ympäristö- ja kustannushyötyjen selvittäminen.

Teknisen seurannan tavoitteena oli todentaa massastabiloinnissa pilotoitujen uudentyypisten, osittain teollisuuden jätteistä koostuvien, sideaineiden tekninen toimivuus ja käyttövarmuus rakentamisen etene mistä ja lopullista käyttötarkoitusta ajatellen. Tärkeänä asiana jo ennakkotestauksessa tuli esille se, että suuri osa sementistä voidaan korvata energiateollisuuden lentotuhkaa käyttämällä, eli sementti-lentotuhka seoksilla päästään samaan stabilointitulokseen kuin pelkällä sementillä (säästään merkittävä osuus sementistä). Samoin merkittävää hyötyä on todettu saatavan lisämassojen (kasatuhkan, meriväylien ruoppausmassojen) käytöllä runkoaineen parantamisessa stabiloinnin yhteydessä. Tämä raportti sisältää kootusti selvitykset eri resepteillä stabiloidun allasmassan tärkeimmistä teknisistä ominaisuuksista, joita tutkittiin eri menetelmin eri ajankohtina stabiloinnin aikana/jälkeen. Koestabiloinnissa uudentyypisillä sideaineilla stabiloitujen näytteiden teknisiä ominaisuuksia verrattiin lentotuhka-sementti sideaineella stabiloitujen näytteiden teknisiin ominaisuuksiin. Näistä tärkeimpänä lujuusominaisuuksien määrittäminen stabiloidusta massasta kohteella valmistetuista koekappaleista puristuslujuutena tai kohteella puristin-heijarikarakalustolla määritettynä leikkauslujuutena.

Päälysrakenteita koskevat tekniseen kelpoisuuteen liittyvät tutkimukset päivitetään tähän raporttiin myöhemmin.

2. SAMPAANALANLAHDEN MASSASTABILOINNINSSA TOTEUTETUT KOESTABILOINNIIT HANKKEEN AIKANA

2.1 Yleistä massastabiloinnista ja Sampaanalanheden pilottitoiminnan tavoitteista

Massastabilointi on pohjanvahvistusmenetelmä, jossa heikkolaatuisen, pehmeän tai pilaantuneen maa-aineksen teknisiä ja ympäristöllisiä ominaisuuksia muutetaan niin, että joko sen päälle on mahdollista rakentaa tai sitä on kaivettuna ja siirrettynä mahdollista hyödyntää täyttö- tai rakennusmateriaalina sovellyskohteessa. Stabiloinnissa maa-ainekseen syötetään ja sekoitetaan stabiloitavaa maata lujittavaa sideainetta. Massastabilointi edellyttää näytteidenottoa kohteelta ja sideainetutkimuksia laboratorioissa oikean sideainelaadun ja määrän selvittämiseksi.

Laajimmin käytetty sovellutus on in situ-stabilointi, missä luonnontilainen pehmeä maa massastabiloidaan tavoitesyvyyteen asti. Ex situ-sovellutuksissa kaivettu tai ruopattu pehmeä aines siirretään uuteen paikkaan, missä se massastabiloidaan osaksi lopullista rakennetta tai niin, että se siirretään lujittumisen jälkeen lopulliseen hyötykäyttökohteeseen. Massastabilointipilotointilaitteisto ja -menetelmän yleisperiaate on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Massastabilointilaitteisto ja menetelmän yleisperiaate. Pehmeä maa-aines lujitetaan (parannetaan rakentamiskelpoiseksi) syöttämällä sideainetta säiliöstä painesyöttimen avulla kaivinkoneen puomin päässä olevaan sekoitinkärkeen ja sitä kautta maa-ainekseen. (Forsman et al. 2014)

Sampaanalanhedella käytetään in situ (ja osittain ex situ) menetelmää, jossa alueella sijaitsevat allasmasat (ja siihen lisärunkoaineiksi lisättävät meriväylän ruoppausmassat) stabiloidaan sijaintiinsa osaksi tulevien kenttärakenteiden alaosaa/täyttöä. Tässä raportissa käsitellyt massastabilointipilotointeja on tehty Sampaanalanheden B-altaalla vuosina 2017 ja 2018, mutta varsinainen stabilointiprojekti ja tässä raportoituun pilotointiin oleellisena taustatyönä liittyvä stabiloinnin kehitystyö on käynnistynyt jo vuosien 2012-12 aikana. Pilotitoiminnan tavoitteena oli:

- Testata uusien sideaineratkaisujen käyttöä alueen massojen stabiloinnissa.
- Testata käytännön hankkeen yhteydessä erilaisten sideainevaihtoehtojen toimivuuteen, saatavuuteen, logistiikkaan, jalostamiseen ja käsitteilyyn liittyviä kysymyksiä (mm. käyttäytyminen työmaolosuhteissa, säilyvyys, monikomponenttisten seosten käyttö/esisekoitus, työsaavutus erilaisilla sideainevaihtoehdoilla jne.).

- Käytettävän laitteiston ja työtekniikan toimivuus kyseisen kaltaisia sideainekomponentteja käytettäessä.
- Löytää toimivuudeltaan ja kustannuksiltaan kilpailukykyisiä vaihtoehtoratkaisuja verrattaessa niitä usein tämän kaltaisissa kohteissa käytettävään sementtistabilointiin sekä projektin yhteydessä "perusvaihtoehdoksi" valittuun tuhka-sementti sideaineseokseen.
- Lisäksi tärkeänä osana tutkia lisärunkoaineen käyttöä ja sillä saavutettavia etuja (parantaa stabiloitavan runkomateriaalin laatua, ulkopuolelta tuotavien ylijäämämassojen hyödyntäminen kohteella, jossa lisämassoja joka tapauksessa tarvitaan, ja toisaalta edellisestä syntyvä hyöty väyläruoppauksen massojen loppusijoitusta ajatellen, samoin voimalaitosten pohjatuhkien loppusijoitusta ajatellen).
- Selvittää vaihtoehtoisia sideaineratkaisuja käyttäen saavutettava stabilointitulos (käytettävän sideaineen laatu ja määrä suhteessa saavutettavaan lujittumiseen) siten, että niiden käytön suunnittelu, myös laajemmassa mittakaavassa, olisi jatkossa mahdollista.

2.2 Stabilointipilotti 2017

2.2.1 Lähtökohdat ja tavoitteet

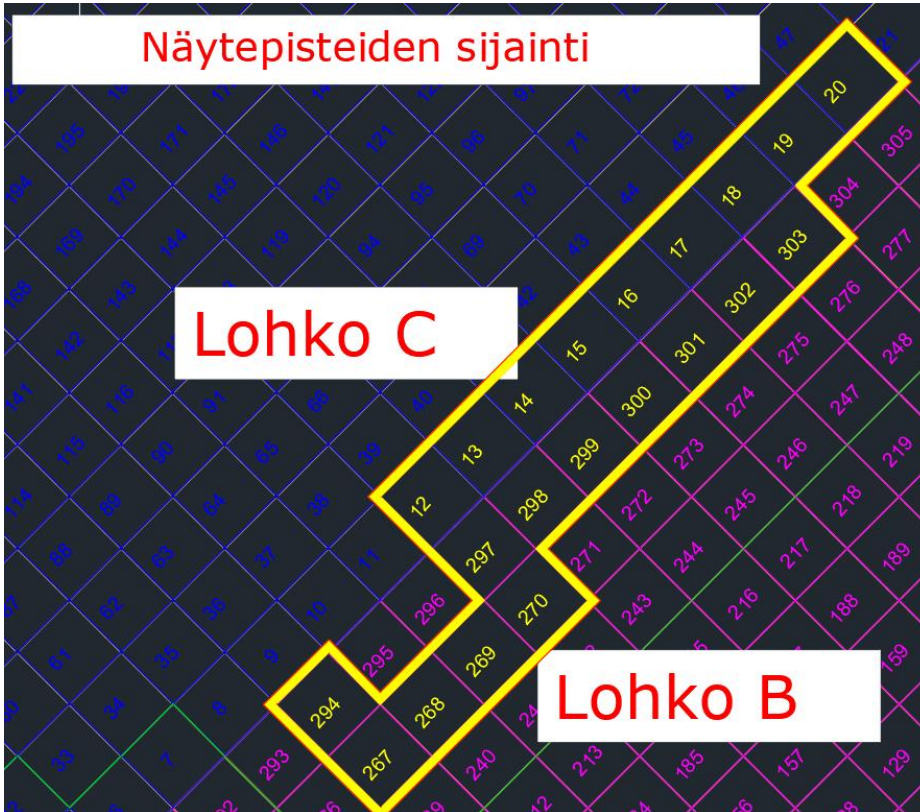
Sampaanalanlahden allasmassojen stabiloinnin aikaisemmissa vaiheissa vuosina 2012-2014 on toteutuksen lähtökohta eli pelkkä sementtistabilointi korvattu sementti+lentotuhka-stabiloinnilla. Tämän on mahdollistanut allasmassojen runkoaineen jalostaminen ulkopuolelta tuoduilla (väyläruoppauksen) massoilla ja kasatuhkan lisääminen ennen stabilointia (tai sen yhteydessä). Näiden toimenpiteiden vaikutus lopputuloksen laatuun on huomattava ja ilman niitä ylipäätään koko stabilointityö olisi taloudelliselta kannalta oleellisesti haastavampaa. Vuoden 2017 pilotin lähtökohtana oli stabiloinnissa uusien lisäainekomponenttien ja uusien sideainereseptiikoiden vaikutusten tutkiminen. Pilottirakentamisen yhteydessä saadaan stabilointityön sujuvuuden kannalta tärkeää lisätietoa eri vaihtoehtojen alkulujittumisessa esiintyvien erojen vaikutuksesta työn käytännön toteuttamiseen. Laboratorioennakkotutkimusten perusteella alkulujittumisessa/aikalujittumisessa esiintyy selkeitä eroja eri sideainetyyppien välillä. Kriittisin tekijä työn sujuvuuden/toteutuksen kannalta on todennäköisesti stabiloitavien massojen riittävä alkuvaiheen lujittuminen heti stabilointityön jälkeen (alkulujittuminen ensimmäisen viikon aikana). Ennakkoon laboratoriossa tehtyjen stabiloituvuustutkimusten perusteella pilotissa käytettäväksi valittiin teknisiltä lopputuloksiltaan ja taloudellisilta kustannuksiltaan potentiaalisimmiksi arvioidut sideaineratkaisut (jotka on esitetty taulukossa 1). Vuoden 2017 pilotin ennakkolaboratoriokokeiden tulokset ja johtopäätökset on esitetty tarkemmin aiemmin laaditussa/toimitetussa materiaalitestiraportissa *"12.12.2017, Circwaste, Sampaanalanlahti, 2017 pilotointiin liittyvä stabiloituvuustestaus, Life-IP CIRCWASTE Finland (LIFE15 IPE/FI/004, osahanke C.10)"*.

Pilotoinnin tavoitteena oli myös arvioida erilaisten vaihtelevien tekijöiden vaikutusta lopputulokseen. Muutuvia seikkoja ovat mm. stabiloituvan massan vesipitoisuus sekä sementin ja lentotuhkan määrät. Stabiloinnin jälkeen on ollut tavoitteena selvittää altaassa toteutuvaa lujuudenkehitystä sekä kokeilla ja selvittää massastabilointityössä käytettävää työtekniikkaa.

2.2.2 Toteutus

Stabilointityö toteutettiin 7.-15.11.2017 Sampaanalanlahden B-altaan lohkoissa B ja C. Stabilointityö eteni altaassa blokki kerrallaan (ala noin 5x5 m, stabilointisyvyys 5 m => 125 m³/blokki). Yhteensä stabilointia

toteutettiin vuoden 2017 pilotissa 8 eri sideainevaihtoehdolla. Sampaanalanhalla stabilointityön aikana ilman lämpötila oli noin 3-7 °C. Stabiloitavan massan lämpötilaa kohteella ei mitattu. Työmaalla valmistetut laadunvalvontakoekappaleet saivat suunnilleen samanlaiset lujittumisolosuhteet kuin laboratoriossa aiemmin ennakkotesteissä tehdyt reseptointikoekappaleet. Laadunvalvonnan yhteydessä toteutettujen kenttä- ja laboratoriotutkimusten menetelmäkuvaukset on esitetty liitteessä 1. Teknisen toimivuuden seurannan näytepisteet on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Teknisen toimivuuden seurannan näytepisteiden sijainti koalueella lohkoissa B (ruudut 267-303) ja C (ruudut 12-20).

Pilotoinnissa käytettiin sideaineina/lisärunkoaineina seuraavia komponentteja:

- sem = Plussementti (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)
- LT = seospolton kuiva lentotuhka, Rauman Biovoima Oy
- KT = seospolton kostutettu lentotuhka ("kasatuhka"), Rauman Biovoima Oy
- Kipsi = kostea di-kipsi kasalta, Yara Siilinjärvi
- OSA8 = palavan kiven kuiva tuhka, Eesti Energia

Toteutetut reseptit on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Testattujen vaihtoehtojen ruutunumerot ja reseptit.

Testattu vaihtoehto ¹⁾	Ruutu-numerot	Stabiloitu massamäärä [m ³]	Sideaineet [kg/m ³]	Huom.
1	B268-B270	375	LT+sem 100+45 (B269, B270) LT+sem 100+50 (B268)	Sideainesyöttö kokonaisuudessaan massastabilointikalustolla.
2	B301-B303	375	LT+sem 150+45	
3	C17-C20	500	LT+kipsi+sem 100+50+40	Kipsi kosteana, levitys ja esisekoitus kasatuhkan esisekoituksen yhteydessä. Tuhkan ja sementin syöttö kokonaisuudessaan massastabilointikalustolla.
4	B299, B300	250	LT 300 (osa LT esisekoituksessa)	LT-määrästä 100 kg/m ³ levitettiin ja esisekoitettiin runkomateriaaliin kasatuhkan esisekoituksen yhteydessä, loppuosa massastabilointikaluston kautta.
5	B297, B298	250	LT 350 (osa LT esisekoituksessa)	
6	B267, B294	250	LT 350 (kaikki LT stab. yhteydessä)	Sideainesyöttö kokonaisuudessaan massastabilointikalustolla.
7	C14-C16	375	LT+OSA8 240+60	Sideainesyöttö kokonaisuudessaan massastabilointikalustolla.
8	C12, C13	250	LT+OSA8+sem 120+30+35	OSA8+sem esisekoitus keskenään. Sen jälkeen kahden sideainekomponentin syöttö kokonaisuudessaan massastabilointikalustolla.

1) Ennen varsinaista stabilointia lisättiin kaikissa vaihtoehdoissa kosteaa tuhkaa tilavuussuhteessa runkoaine+tuhka 3:0,5 eli noin 0,7m paksu kerros. Tuhka esisekoitettiin allasmassaan kaivinkoneella.

Ennen varsinaista stabilointia ruutuihin levitettiin pintaan kostutettua lentotuhkaa eli ns. kasatuhkaa ($w \approx 21\%$) tilavuussuhteessa 3:0,5 stabiloitavaan allasmassaan verrattuna, eli noin 0,7 m kerros. Tuhka oli kostutettu siilosta purettaessa ja varastoitu aumana kentälle stabilointialueen läheisyydessä. Vaihtoehdossa 3 käytetty kipsi levitettiin kasatuhkan päälle. Samoin vaihtoehdoissa 4 ja 5 suunnitelman mukainen osa tuoreesta tuhkasta levitettiin kasatuhkan päälle (näin siksi, että erittäin suuren tuhkamäärän lisääminen sekoitustyön yhteydessä stabilointikalustolla hidastaisi työtä säiliötankkauksineen oleellisesti). Lisäkomponentit esisekoitettiin allasmassaan pitkäpuomisella kaivinkoneella. Kasatuhkan, kipsin ja tuoreen tuhkan lisäys ajoitettiin siten, että kyseinen ruutu ehdittiin stabiloida valmiiksi saman päivän aikana. Vaihtoehdoissa 4 ja 5 pintaan levitettävä osuus kuivasta lentotuhkasta (100 kg/m³) korvattiin käytännön syistä tuoreella, vasta kostutetulla lentotuhkalla. Tuhkan sisältämää vettä ($w = 16\%$) ei huomioitu sideainetuhkan määrässä. Tämä merkitsee sitä, että sideainetuhkan kuivamassaa käytettiin n. 14 kg/m³ vähemmän, joka taas tarkoittaa 4 – 5 % kyseisten reseptien LT-määristä.

Varsinainen stabilointityö tehtiin massastabilointilaitteistolla. Kuivat sideaineet sementti, kuiva lentotuhka ja OSA8 tuotiin työmaalle säiliöautoilla. Vaihtoehdossa 8 käytetyt OSA8 ja sementti esisekoitettiin keskenään puhaltamalla sideainekomponentit säiliöautosta toiseen neljä kertaa. Sideaineet siirrettiin pneumaattisesti stabilointilaitteiston omiin erillisiin kahteen säiliöön. Näistä säiliöistä sideaineet syötettiin paineilman avulla letkuja pitkin stabilointikoneelle, jolla kaivinkoneen puomiin asennetun sekoitinkärjen avulla tehtiin varsinainen sekoitus stabiloitavaan massa.

Stabiloitujen blokkien päälle levitettiin viimeistään seuraavana päivänä suodatinkangas ja sen päälle painopenkereeksi ja työpeditiksi noin 1 m kerros kattilahiekkaa ja kostea lentotuhkaa.



Kuvat 3 ja 4. Massastabilointikalusto: vasemmalla kaivinkone, jossa puomiin kiinnitetty sekoitin. Oikealla sideainesäiliöt sekä syöttöyksikkö.



Kuva 5. Vuoden 2017 pilottialueen stabilointityö käynnissä. Taustalla pitkäpuomikaivinkone poistamassa haralla uppotukkeja altaasta.

Pilotoinnin yhteydessä tehtiin laadunvalvonnan kenttä- ja laboratorionkokeita ottamalla stabilointialueelta allasmassasta useista pisteistä, ennen työn yhteydessä käytettävien lisäkomponenttien lisäämistä, ns. 0-näytteitä stabiloitavien massojen laadun/laatuvariaatioiden selvittämiseksi (ja jotta lähtötilanne on paremmin vertailtavissa myös laboratorion ennakkokokeissa käytettyihin massoihin). Stabiloinnin jälkeen kunkin koevaihtoehdon kohdalta otettiin näytteitä sekoitetuista/stabiloiduista massoista kahdelta eri syvyydeltä mm. lujuuskoekappaleiden valmistamista varten. Lisäksi lujuuden kehitystä rakenteessa seurattiin kevyen siipikairan sekä puristin-heijarikairausten avulla. Tutkimusmenetelmät on esitetty pääpiirteissään liitteessä 1.

2.2.3 Tulokset

Allasmassat ennen stabilointia

Ennen stabilointia ja kostean tuhkan lisäämistä allasmassoista otettujen 0-näytteiden perusominaisuudet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Koealueen allasmassoista määritetyt luokitteluominaisuudet.

Näytteet allasmassasta ennen kasatuhkan levitystä					
Alueella testattu vaihtoehto	Ruutu	Syvyys [m]	ρ_m [kg/m ³]	w [%]	Hh [%]
1	B269	0 - 2	1200	224	15,0
		2 - 4	1220	213	14,1
2	B302	0 - 2	1270	168	7,8
		2 - 4	1300	157	7,6
3	C18	0 - 2	1280	159	8,4
		2 - 4	1290	168	8,2
4	B299	0 - 2	1230	196	7,5
		2 - 4	1240	201	9,3
5	vieressä: 296	0 - 2	1200	233	14,9
		2 - 4	1190	233	13,3
	vieressä: 299	0 - 2	1230	196	7,5
		2 - 4	1240	201	9,3
6	B267	0 - 2	1220	220	13,5
		2 - 4	1210	212	13,2
7	C16	0 - 2	1280	174	7,8
		2 - 4	1290	169	7,5
8	C13	0 - 2	1250	191	8,3
		2 - 4	1270	180	10,0
	vieressä: C11	0 - 2	1260	201	11,8
		2 - 4	1210	223	15,7

Laboratoriossa ennakkoon tehdyissä stabiiliteiväuskokeissa käytetyn runkomateriaalin vesipitoisuus oli 165 % ja hehketushäviö 10,3 %. Pilotointialueella massan ominaisuudet vaihtelivat merkittävästi. Osalla ominaisuudet olivat lähellä ennakkotestauksessa käytetyn massan arvoja, mutta usean testatun vaihtoehdon kohdalla massojen vesipitoisuus ja hehketushäviö olivat selvästi suurempia, eli massat olivat heikommin stabiiliteiväviä. Ennakkotestehihin verrattuna suurimmat erot tai vaihtelu testatun vaihtoehdon alueella olivat vaihtoehdoissa 1, 5, 6 ja 8.

Stabiiliteivä allasmassa

Stabiiliteiväduista allasmassoista oleelliset tutkimustulokset liittyvät lujuustasoihin eri ikäisillä massoilla, määritettynä stabiiliteiväduista massoista joko valmistetuista koekappaleista puristuslujuutena laboratorioissa tai leikkauslujuutena kentällä kevyellä käsikäyttöisellä siipikairalla ja puristin-heijarikairauksilla

kairavaunulla. Kyseiset laadunvalvontatulokset on esitetty taulukossa 3, jossa tuloksia on arvioitu värikoodein. Värit on määritelty testikohtaisesti (lujuudet koekappaleista, kevytsiipikairauksilla, puristin-heijarikairauksilla) ja ikäkohtaisesti (2 – 78 vuorokautta). Vihreä on hyvä tulos, keltainen hyväksyttävissä (rajoilla) oleva kohtalainen tulos ja punainen on huono tulos. Leikkauslujuuden minimimitavoite kentällä lujittumisen alkuvaiheessa on tuotantostabilointityön etenemistä ja stabiloidun massan päällä työskentelemistä ajatellen noin 25 kPa (vastaa karkeasti puristuslujuutta 50 kPa). Tätä tekijää voi arvioida 7 vuorokauden puristuslujuustulosten sekä tehtyjen kevyiden siipikairausten perusteella. Pidempiaikaisen lujittumisen osalta tavoitelujuutena on pidetty 60 vrk puristuslujuuden osalta 80-100 kPa.

Taulukko 3. Laboratorio- ja kenttätutkimustuloksia stabiloiduista massoista.

Vaihtoehto	Ruutu	Sideaineet [kg/m ³]				Huom.	Syvyys [m]	Puristus- koe- kpl tiheys [kg/m ³]	Pur.lujuus [kPa]		Leikkauslujuus siipikairalla [kPa]								
		LT	Se	Kipsi	OSA8				7d	60d	2-4 d	4-7 d	8-14 d						
1 (w ₀ ≈220%)	B268	100	50	-	-		0,5					80 (14d)							
							1			18 (3d)	24 (6d)	93 (14d)							
							2			5 (3d)	5 (6d)	52 (14d)							
							3			5 (3d)	5 (6d)	28 (14d)							
							4			14 (3d)	16 (6d)	36 (14d)							
	B269	100	45	-	-		1	1420	41	102	5/14 (3d)								
							1,5												
							2				5/5 (3d)								
							3				15/22 (3d)								
							3,5	1360	8	10									
							4				5/42 (3d)								
							1	1480	62	101									
4																			
2 (w ₀ ≈160%)	B301	150	45	-	-		1												
							1,5	1480	98	277	42/22 (2d)	37 (5d)							
							2				10/12 (2d)	84 (5d)							
							3				20/10 (2d)	32 (5d)							
	B302	150	45	-	-		1												
							1,5	1450	29	92	18/5 (2d)	26 (5d)							
							2												
							3												
	B303	150	45	-	-		1	1380	36	68									
							1,5												
3,5							1380	59	182										
4																			
3 (w ₀ ≈160%)	C17	100	40	50	-		0,5					58 (6d)							
							1	1430	52	202			13/12 (3d)						
							1,5												
							2						10/5 (6d)						
	C18	100	40	50	-	Kipsi sekoitettiin kasa- tuhkan esi- sekoituksen yhteydessä	1						6/>100 (6d)						
							1,5	1450	19	30			28/78 (6d)						
							2												
							3												
	C19	100	40	50	-	Kipsi sekoitettiin kasa- tuhkan esi- sekoituksen yhteydessä	1	1400	6	13									
							1,5												
3,5							1390	6	7										
4																			
4 (w ₀ ≈200%)	B299	300 (100+ 200)	-	-	-	Tuhkasta 100 kg sekoitettiin kasa- tuhkan esi- sekoituksen yhteydessä	0,5					42 (3d)							
							1	1520	37	114	10/13 (4d)		40/16 (2d)						
							1,5												
							2				10/5 (4d)		12/15 (2d)						
	B300	300 (100+ 200)	-	-	-	Tuhkasta 100 kg sekoitettiin kasa- tuhkan esi- sekoituksen yhteydessä	1	1470	13	55	5/11 (4d)		27/14 (2d)						
							1,5												
							3,5	1470	13	55	6/5 (4d)		13/7 (2d)						
							4												
	5 (w ₀ ≈200- 230%)	B297	350 (100+ 250)	-	-	-	Tuhkasta 100 kg sekoitettiin kasa- tuhkan esi- sekoituksen yhteydessä	1	1500	27	82								
								1,5											
								3,5	1440	11	27								
4																			
B298		350 (100+ 250)	-	-	-	Tuhkasta 100 kg sekoitettiin kasa- tuhkan esi- sekoituksen yhteydessä	0,5						44 (1d)						
							1	1470	14	46	6 (3d)		67 (1d)						
							1,5												
							2				7 (3d)		28 (1d)						
							3	1420	-	-	-	Tuhkasta 100 kg sekoitettiin kasa- tuhkan esi- sekoituksen yhteydessä	1						27 (1d)
													1,5						
	3,5												1420	8	32	5 (3d)		14 (1d)	
4																			
6 (w ₀ ≈220%)	B267	350	-	-	-	Kaikki LT stabilointi- kaluston kautta	1	1380	16	34	10/12 (2d)	32 (5d)							
							1,5												
							2				14/12 (2d)	68 (5d)							
							3				40/28 (2d)	30 (5d)							
	B294	350	-	-	-	Kaikki LT stabilointi- kaluston kautta	1	1470	44	93									
							1,5												
							3,5	1410	16	20	45/40 (2d)	>100 (5d)							
							4												
	7 (w ₀ ≈170- 180%)	C14	240	-	-	-		1	1490	13	62		12/18 (7d)						
								1,5											
								2					6/17 (7d)						
3												5/30 (7d)							
C15		240	-	-	-		1	1510	13	57			5/13 (7d)						
							1,5												
							3,5	1460	16	50									
							4												
C16		240	-	-	-		1	1460	16	50									
							1,5												
	3,5						1450	13	39										
	4																		
8 (w ₀ ≈180- 210%)	C12	120	35	-	-	Se+OSA8 esi- sekoitettiin keskenään	1	1420	43	80			17 (6d)						
							1,5												
							2						40 (6d)						
							3						8 (6d)						
	C13	120	35	-	-	Se+OSA8 esi- sekoitettiin keskenään	1	1360	13	47			22 (6d)						
							1,5												
							3,5	1460	18	30									
							4												

Leikkauslujuus puristin-heijarikairalla 69-78 d [kPa]					
B270		B269		B268	
140	160	120	110	48	82
80	85	82	75	36	78
120	43	46	23	95	42
25	37	22	26	26	48
33	40	38	32	42	40

B303	B302	B301	
>200	>200	>200	160
>200	>200	135	105
>200	>200	57	48
70	100	30	14
43	120	38	8
26	83	64	43

C20	C19	C18	C17
190	>200	>200	>200
130	>200	155	185
125	200	160	190
123	105	120	84
115	115	40	30
125	80	33	24
180	163	42	43
		110	30

B300	B299	
>200	>200	>200
>200	>200	>200
110	140	>200
98	53	72
127	25	26
150	19	35
92	23	68

B298	B297	
>200	>200	>200
>200	>200	>200
>200	100	87
68	72	110
88	53	90
124	30	37
83	22	27
77	87	Vieressä:
75	83	Vasen sarake: ruutu B267
83	127	Oikea sarake: ruutu B294
90	146	
145	68	
192	155	

C16	C15	C14
>200	>200	>200
158	>200	178
>200	>200	189
>200	>200	120
106	130	128
127	48	100

C13	C12
>200	138
>200	98
87	164
75	175
80	62
64	53

"Perusreseptillä" 1 (LT+sem 100+45 kg/m³) lujuudet yläosassa ovat kohtalaisen hyviä, syvemmällä on heikompaa ja tavoitteen alituksia. Lähtömateriaali altaassa oli tällä kohdalla mäempää eli heikommin lujuuttuvaa. Suurempaa vesipitoisuutta (n. 220%) kompensoitiin osittain ruudussa B268 korottamalla suunniteltua sementtimäärää 5 kg/m³, mutta tämä pieni muutos ei näy lujuustuloksissa.

Vaihtoehdossa 2 (LT+sem 150+45 kg/m³) tuhkamäärää oli korotettu perusreseptiin verrattuna. Lujuustulokset olivat parempia ja lähes kaikki tavoitteenmukaisia, mutta tähän on vaikuttanut myös lähtömateriaalin keskimääräistä pienempi vesipitoisuus (n. 160%) kyseisissä testiruuduissa.

Vaihtoehdossa 3 (LT+kipsi+sem 100+50+40 kg/m³) oli perusreseptin lisäksi kipsiä. Koekappale- ja kevytsiipikairatulokset olivat hyvin vaihtelevia, mutta puristin-heijarikairausten tulokset olivat pääosin tavoitteenmukaisia. Syvemmällä lujuudet olivat yläosaa heikompia/vaihtelevampia.

Vaihtoehdossa 4 (LT 100+200 kg/m³) ei ollut lainkaan sementtiä, vaan suuri määrä kuivaa tuhkaa. Tuhkasta kolmannes lisättiin pintaan ja esisekoitettiin massaan kaivinkoneella stabilointikaluston työajan sääntämiseksi. Lujuustulokset koekappaleista ja kevytsiipikairalla ovat vaihtelevia, puristin-heijarikairaustulokset ovat enimmäkseen tavoitteenmukaisia; syvemmällä on joitakin alituksia.

Vaihtoehto 5 (LT 100+250 kg/m³) oli muuten samanlainen kuin vaihtoehto 4, mutta stabilointikoneen kautta syötettävä tuhkamäärä oli neljänneksen (50 kg/m³) suurempi. Etukäteen oli epävarmaa, saadaanko hyvin suuri tuhkamäärä (kostean tuhkan lisäksi yhteensä 350 kg/m³) sekoitettua allasmassaan. Massa muuttui vähän kuivahkoksi, mutta sekoittaminen kuitenkin onnistui. Lujuustulokset koekappaleista ja kevytsiipikairalla ovat vaihtelevia, mutta puristin-heijarikairatulokset ovat pääosin tavoitteenmukaisia. Syvemmällä on heikompaa kuin yläosassa. Kaikkiaan tuloksissa ei ole merkittävää eroa vähän pienemmän tuhkamäärän vaihtoehtoon 4, mutta lähtömateriaali altaassa oli hiukan mäempää, mikä vaikeuttaa vertailua.

Vaihtoehdossa 6 (LT 350 kg/m³) sekoitettiin vaihtoehdon 5 mukainen hyvin suuri tuhkamäärä, mutta kokonaan stabilointikaluston kautta. Sekoitustyö onnistui, mutta kesti luonnollisesti kauemman, tuhkasäiliön tankkauksineen noin 2,5 tuntia/ruutu. Koekappaleiden lujuudet olivat vaihtelevia, kevytsiipikairatulokset pääosin tavoitteenmukaisia. Puristin-heijarikairaustulokset ovat kaikki tavoitteenmukaisia. Toisin kuin muissa vaihtoehdoissa, lujuudet eivät syvemmällä heikkene, vaan päinvastoin lujuus kasvaa syvemmällä. Edellä mainittu viittaa myöskin siis siihen, ettei pintaan levitettävä lisämateriaali/-sideaine (muutamissa muissa vaihtoehdoissa) sekoitu kunnolla syvimpiin osiin.

Vaihtoehdossa 7 (LT+OSA8 240+60 kg/m³) ei myöskään ollut sementtiä, vaan suuri tuhkamäärä, mutta tuhkasta viidennes oli Rauman Biovoiman tuhkan sijasta palavan kiven polton lentotuhkaa (OSA8) Virosta. Alkulujittumista kuvaavat 7 vuorokauden puristustulokset ja kevytsiipikairaustulokset olivat jonkin verran alle tavoitteen. 60 vuorokauden koekappalelujuudet olivat selvästi parempia, ja puristin-heijarikairalla saadut lujuudet ovat kaikki tavoitteenmukaisia. Varsinkin koekappaletuloksissa näkyy, että palavan kiven tuhka on lujittavaa, mutta hitaasti.

Vaihtoehdossa 8 (LT+OSA8+sem 120+30+35 kg/m³) sideaineresepti oli melko lähellä "perusreseptiä". Kohtalaisen tuhkamäärän lisäksi oli pienehkö määrä sementtiä ja pienehkö määrä palavan kiven tuhkaa. Lujuustulokset ovat samansuuntaisia kuin vaihtoehdossa 7. Puristin-heijarikairalla lujuudet olivat kaikki

tavoitteenmukaisia, mutta vähän heikompia kuin vaihtoehdon 7; eroa oli lähinnä syvemmillä. Vertailua näiden kahden vaihtoehdon välillä vaikeuttaa se, että vaihtoehdossa 8 allasmassa oli vähän märempää.

Taulukossa 4 on esitetty 60 vrk puristuslujuustulokset laboratoriossa tehtyjen ennakkokokeiden sekä pilotissa valmistettujen koekappaleiden osalta. Pilotissa käytetyt reseptit johdettiin/päätettiin ennakkokokeista saatujen tulosten, sideaineiden käytännön saatavuuden sekä arvioitujen kustannustekijöiden perusteella. Reseptit eivät siis ole täysin samoja ennakkokokeiden ja pilotissa toteutettujen välillä, vaan käytetyissä sideainemäärissä (sekä tietyistä runkoaineen vesipitoisuuksissa) on eroja, mutta tulkintoja sideaineiden toimivuudesta ja vastaavuudesta voidaan tietyiltä osin silti tehdä.

Taulukko 4. Laboratorion ennakkokoe tulosten ja pilotin (ka.) puristuslujuudet 60 vrk.

Labran ennakkokokeet			Pilotin laadunvalvonta			
Runkoaine	Sideaine		Puristus- lujuus [kPa]	Runkoaine	Sideaine	Puristus- lujuus ka. [kPa]
	laatu	määrä [kg/m ³]	60 vrk			
allasmassat + KT 3:0.5 (til.) (vesipit 165%)	Plus + LT(Rauma)	50+100	141	B269 ja B270 (w ₀ ≈220 %)	45+100	102
		30 + 150	63	B302 ja B303 (w ₀ ≈160 %)	45+150	155
	Plus + LT(Rauma) + kipsi	40 + 100 + 50	> 50	C18 ja C19 (w ₀ ≈160 %)	40+100+50 *	63
	LT(Rauma)	300	72	B299 ja B300 (w ₀ ≈200 %)	300**	77
		400	> 100	B297 ja B298 (w ₀ ≈200-230 %)	350**	47
		400	> 100	B267 ja B294 (w ₀ ≈220 %)	350	50
	LT(Rauma) + OSA8	240 + 60	94	C15 ja C16 (w ₀ ≈170-180 %)	240 + 60	52
Plus + LT(Rauma) + OSA8	30 + 120 + 30	104	C12 ja C13 (w ₀ ≈180-210 %)	35 + 120 + 30	59	

* Kipsi sekoitettiin kasatuhkan esisekoituksen yhteydessä

** Tuhkasta 100 kg sekoitettiin kasatuhkan esisekoituksen yhteydessä

”Perusreseptin” (PlusSe+LT 50+100) osalta pilotin yhteydessä valmistettujen lujuuskoekappaleiden puristuslujuus 60 vuorokauden ikäisenä on hieman matalampi kuin laboratorion ennakkokokeissa samalla reseptillä (keskiarvo laadunvalvonta 102 KPa, ennakkokoe 141 kPa). Tämä johtuu kuitenkin selvästi märemmästä runkomateriaalista pilottiruudussa (w= 220 %) kuin ennakkokokeissa (w= 165 %), ja pilotin koekappaleiden lujuustasoa voidaankin pitää erinomaisena tämä seikka huomioiden.

Ennakkokokeissa ainoa perusreseptin tapaan toiminut ja vähintään saman suuruusluokan puristuskoestuksissa saavuttanut reseptiikka oli pelkkä lentotuhka 400 kg/m³, ja toisaalta lähelle päästiin myös reseptillä PlusSe+lentotuhka+OSA8 30+120+30. Tältä osin on kuitenkin huomioitava, että stabilointia ajatellen tavoitelujuudeksi oli määritelty 80-100 kPa puristuslujuus. Muilla testatuilla vaihtoehdoilla jäätiin selvästi matalampiin lujuustasoihin. Pilottiin valikoiduilla määrillä sideaineseokset ovat toimineet hieman laboratoriossa toteutettua ennakkotestausta heikommin käytännön toteutuksessa. Tähän tosin vaikuttaa monta tekijää, ennen kaikkea suurimpana tekijänä lähtövesipitoisuudeltaan selvästi märempi runkoaine, mutta osaltaan myös esimerkiksi marraskuun sääolosuhteet.

2.2.4 Johtopäätökset

Yleisellä tasolla katsottuna lujittumisessa on havaittavissa selkeästi syvyysuuntaisia eroja, yläosa on lähes poikkeuksetta lujittunut paremmin kuin alemmat osat. Tämä tarkoittaa tehostustarvetta sekoituksen ja etenkin esisekoituksen yhteydessä ja tämän ratkaisumahdollisuuksia on mietittävä. Toisaalta altaan/stabiloidun rakenteen yläosaan kohdistuu suuremmat kuormat ja vaatimukset kuin syvempiin osiin ja tämä kompensoi osittain pystysuunnassa esiintyvää lujuuseroa.

”Perusresepti” LT+sem on toimiva, mutta myös korvaavia ratkaisuja on löydettävissä ja tätä myötä ympäristöllisiä ja taloudellisia hyötyjä on saavutettavissa.

Pelkkää tuhkaa sideaineena käytettäessä on havaittavissa selvä laatuero vaihtoehtoisten sekoitustapojen välillä: Kun koko tuhkamäärä syötetään ja sekoitetaan stabilointilaitteiston sekoituskärjen kautta saavutetaan homogeeninen ja muutoinkin parempi lopputulos kuin verrattuna lopputulokseen sekoitustavalla, jossa osa tuhkasta levitetään pintaan ja sekoitetaan stabiloitavaan massaun muun syöttö- ja sekoitustyön yhteydessä (epähomogeenisempi lopputulos, syvemmällä vähemmän sideainetta ja heikompi lujuustaso kuin pintaosissa). Toisaalta kaiken tuhkamäärän syöttäminen ja sekoittaminen sekoituskärjen kautta on sideainetankkauksineen huomattavasti hitaampaa. Suurten tuhkamäärien sekoittaminen saattaa myöskin johtaa epähomogeeniseen lopputulokseen, sillä massan ”kyllästyessä” suurella sideainemäärällä sekoitustyö samalla hankaloituu, joten tältä osin tarvitaan vielä lisätestausta ja sekoitustyön tehostamismahdollisuuksia on pohdittava.

Altaan ”helpohkoilla” reunaosilla on mahdollista toteuttaa stabilointi ilman sementtiä. Tämä vaatii kuitenkin allasmassojen etukäteistä laatuksentrollia, stabilointi ilman sementtiä soveltuu todennäköisesti alueelle, joilla vesipitoisuustaso on selvästi alle 200 %. Kuten yllä todettiin, parempi laatuso ja homogeenisempi lopputulos saavutetaan, kun koko tuhkamäärä lisätään stabilointikaluston kautta, jolloin tuhka saadaan sekoitettua paremmin myös altaan syvempiin osiin.

OSA8 eli palavan kiven tuhka on selkeästi hidaskujittaja, sillä stabilointityön jälkeen alkuvaiheessa (n. 7 vrk) puristuskoekappalelujuudet ja kevyellä siipikairalla määritetyt leikkauslujuudet ovat selvästi heikompi kuin myöhemmin määritetyt (60 vrk) lujuudet. Palavan kiven tuhka toimii sideaineena hyvin, mutta ainakaan kyseisillä massoilla sillä ei saavuteta suurta lisäetua muihin sideainevaihtoehtoihin verrattuna.

Kipsin ollessa mukana sideainekomponenttina, saavutetaan pääosin hyviä lujuustasoja, mutta sekoituksen tasalaatuisuuteen ja esisekoituksen tehokkuuteen on kiinnitettävä erityishuomiota. Ongelmana on kostean kipsin levitys/sekoitus, joka joudutaan tekemään pinnan kautta ja johtaa epähomogeeniseen lopputulokseen (eli kipsiä vähemmän syvemmissä osissa kuin pintaosissa). Kipsiä sisältävää sideaineseosta voidaan hyvän lujittumisvaikutuksen vuoksi todennäköisesti hyödyntää palavan kiven tuhkan tapaan jatkossa erityisesti stabiloitavilla altaan keskiosilla, jotka ovat vaikeammin lujitettavia.

Kokonaisuutena ajatellen tekninen lopputulos pilottirakenteiden osalta on hyväksyttävällä laatusoalla. Eriyishuomiona voidaan todeta, että pelkän sementin käyttö voidaan stabiloinnissa korvata ainakin osittain (merkittävästi sementin määrää pienentämällä), ja joissain tilanteissa kokonaan, erilaisilla vaihtoehtoratkaisuilla ilman, että lopputuloksen laatu kärsii! Näin voidaan saavuttaa merkittäviä ympäristöllisiä ja taloudellisia hyötyjä. Kaikki tulokset huomioiden alueella voidaan todeta esiintyvän jonkin verran laatuvarjoteltua, mikä näkyy erityisesti lujittumisen alkuvaiheessa. Pitkäaikaislujittuminen huomioitaessa (69-78 vrk)

laatuerot kuitenkin tasoittuvat ja kentän toimivuuden kannalta riittävä laatutaso voidaan katsoa saavutettavan. Erityishuomiota on kuitenkin kiinnitettävä lisärunkoaineen (kasatuhkan) sekoittamiseen ja sekoittamiseen (tehostamismahdollisuuksia mietittävä), sillä tulosten perusteella on selvästi havaittavissa pintaosan keskivertoa parempi lujittuminen. Toisaalta on huomioitava myös riittävä työsaavutus ja tehokkuus siltä osin. Myös useamman sideaineen käyttämisessä on huomioitava työsaavutus ja -tehokkuus, joihin vaikuttavat lisätyövaiheina sideaineiden pumppaaminen/sekoitus säiliöstä toiseen, välitankkausvaiheet ja aiemmin mainittu altaan pintaosan sekoittaminen erikseen (kosteita side-/lisäaineita käytettäessä). Muualla muodostettu/sekoitettu valmis sideaineseos on selkein ja työsaavutuksen kannalta edistävän toimintatapa itse stabilointia ajatellen.

2.3 Stabilointipilotti 2018

2.3.1 Lähtökohdat ja tavoitteet

Vuoden 2018 pilottitoiminnan tavoitteena oli jälleen uusien (aiemmin kohteella testaamattomien) jäte pohjaisten sideaineratkaisujen käytettävyyden testaaminen B-altaan käsiteltävien massojen keskimääräistä laatua vastaavalla alueella. Alue sijoittui samankaltaiselle runkomateriaalialueelle kuin 11/2017 toteutettu pilotti. Tärkeänä osana pilottitoimintaa oli käytännön hankkeen yhteydessä erilaisten täysin uusien jättepohjaisten sideainevaihtoehtojen teknisen toimivuuden, saatavuuden, logistiikan, jalostamisen ja käsittelyn havainnointi (mm. toimitusvarmuus ja -kapasiteetti tuotantopaikalta työmaalle, käyttäytyminen työmaaolosuhteissa, tasalaatuisuus, säilyvyys, työsaavutus erilaisilla sideainevaihtoehtoilla, mahdolliset ongelmat jne.). Edellä mainittujen lisäksi tavoitteena tietysti myös tärkeän lisätiedon saaminen erilaisten sideainevaihtoehtojen toimivuudesta lujuskehityksen kannalta.

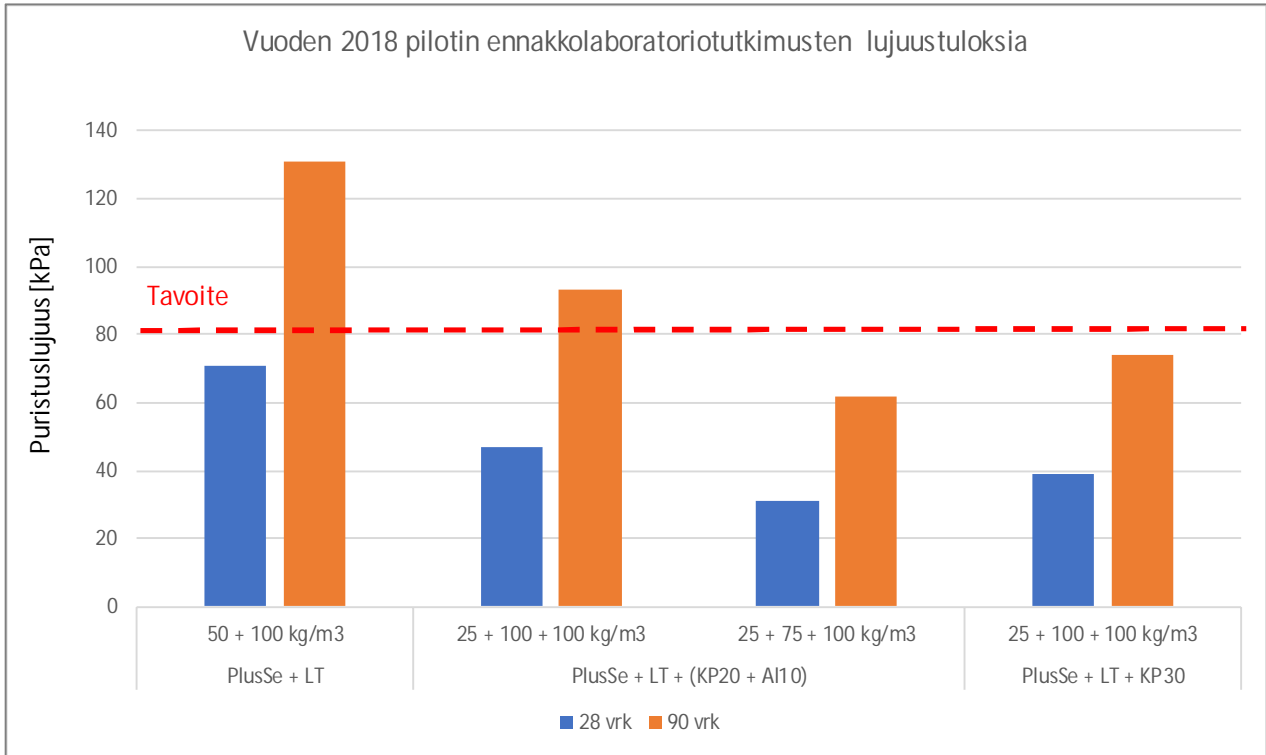
2.3.2 Ennakkotestit laboratoriossa

Vuoden 2018 pilotissa käytettäväksi aiottuja sideaineseoksia ja niiden reseptiikoita stabilointiin optimoitiin laboratorioennakkokokeiden avulla. Ennakkotutkimuksissa käytettiin stabiloitavasta massasta otettua runkoainenäytettä, jonka vesipitoisuus oli $w=165\%$ (näyte otettu altaasta, jonne oli jo lisätty väyläruoppauksen massoja eli lisärunkoainesta). Sideaineiden lisäksi ennakkotutkimuksissa lisättiin runkoaineseen myös kosteaa kasatuhkaa samassa suhteessa kuin pilotissa käytännössäkin (eli tilavuussuhteessa allasmassa: KT 3:0,5).

Sideaineina/lisärunkoaineina käytettiin seuraavia komponentteja:

- PlusSe = Plussementi (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)
- LT = seospolton kuiva lentotuhka, Rauman Biovoima Oy
- KT = seospolton kostutettu ($w=21\%$) lentotuhka ("kasatuhka"), Rauman Biovoima Oy
- KP20 = jättepohjainen sideaineseos 1
- KP30 = jättepohjainen sideaineseos 2
- A110 = jättepohjainen sideaineseos 3

Laboratoriossa tehtyjen ennakkostabiloituvuustutkimusten perusteella pilotissa käytettäväksi valittiin teknisiltä lopputuloksiltaan ja taloudellisilta kustannuksiltaan potentiaalisimmiksi arvioidut (sekä saatavuuden kannalta oletetusti varmimmat) sideaineratkaisut. Nämä ratkaisut ja niillä ennakkokokeissa saavutetut puristuslujuustasot (tavoitetasoon nähden) on esitetty kuvassa 6.

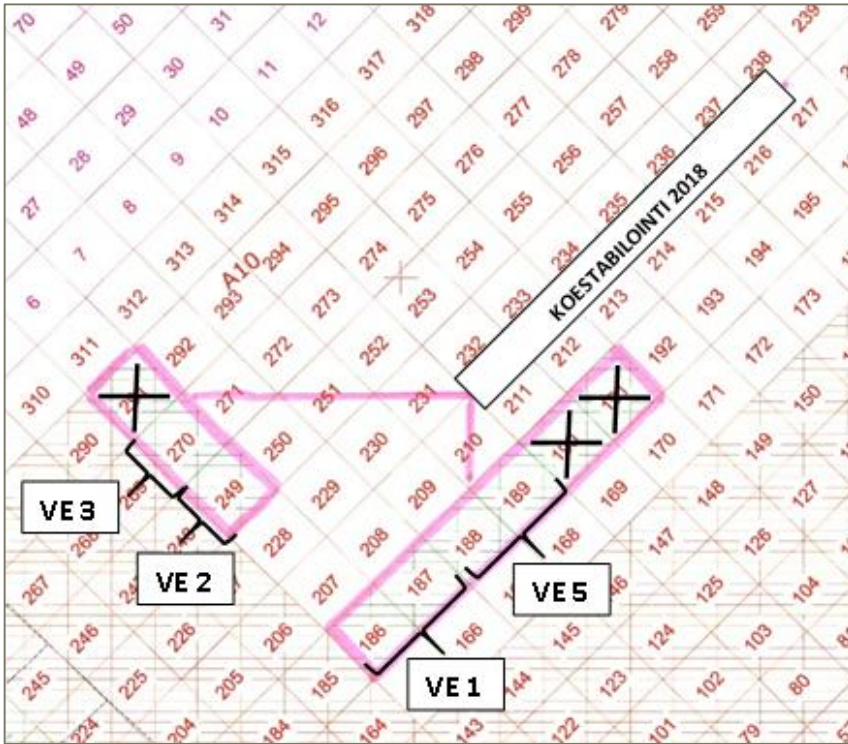


Kuva 6. Laboratorioennakkokokeiden perusteella pilottiin soveltuvimiksi arvioituilla resepteillä saavutetut puristuslujuustasot tavoitetasoon nähden (KP20, KP30 ja AI10 ovat jätöpohjaisia sideaineseoksia).

Yllä esitettyjen tulosten perusteella pilotissa käytettyjä sideainemääriä vielä säädettiin (tarvittaessa korotettiin mikäli tavoitetasoa ei saavutettu ennakkokokeissa käytetyillä määrillä, tai laskettiin hieman mikäli tavoitetaso ylittyi selvästi) ja nämä pilotin toteuttamisessa käytetyt määrät on esitetty seuraavan alakappaleen taulukossa 5.

2.3.3 Toteutus

2018 pilottistabilointialue sijaitsi B-altaan loholla D, jossa päästiin stabiloimaan kaikissa koealueen ruuduissa viiden metrin syvyyteen asti (blokin/ruudun ala noin 5x5 m, stabilointisyvyys 5 m => 125 m³/blokki). Koealueen stabilointityö toteutettiin 13.6.-15.6.2018. Yhteensä vuoden 2018 pilotin toteutukseen oli suunniteltu 5 eri sideainevaihtoehtoa, joista lopulta toteutui 4 (yksi vaihtoehto jäi pois sideaineen toimitusongelman vuoksi). Sampaanalanlahdella stabilointityön aikana ilman lämpötila oli varjossa noin 13-18 °C. Stabiloitavan massan lämpötilaa kohteella ei mitattu. Laadunvalvonnan yhteydessä toteutettujen kenttä- ja laboratoriotutkimusten menetelmäkuvaukset on esitetty liitteessä 1. Teknisen toimivuuden seurannan näytepisteet on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Teknisen toimivuuden seurannan näytenpisteiden sijainti koalueella Sampaanalanlahden B-altaan lohossa D.

Näytenpisteissä käytettyjen sideaineiden reseptit on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Näytenpisteissä käytettyjen sideaineiden reseptit.

Testattu vaihtoehto ¹⁾	Ruutu-numerot	Stabiloitu massamäärä [m ³]	Sideaineet [kg/m ³]	Huom.
1	186-187	250	PlusSe+LT 50+100	Sideainesyöttö kokonaisuudessaan massastabilointikalustolla, yhtäaikaaisesti kahdesta säiliöstä.
2	249	125	PlusSe+LT+(KP20+Al10) 40+100+80	Sideainesyöttö kokonaisuudessaan massastabilointikalustolla, yhtäaikaaisesti kahdesta säiliöstä (sementti sisältyy jo valmiiksi KP20 sideaineeseen).
3	270	125	PlusSe+LT+(KP20+Al10) 25+150+50	Sideainesyöttö kokonaisuudessaan massastabilointikalustolla, yhtäaikaaisesti kahdesta säiliöstä (sementti sisältyy jo valmiiksi KP20 sideaineeseen).
4	-	0	LT+(KP20+Al10) 150+150	Vaihtoehtoa ei päästy toteuttamaan lainkaan sideaineen toimitusongelman vuoksi.
5	188-189	250	PlusSe+LT+KP30 30+100+100	Sideainesyöttö kokonaisuudessaan massastabilointikalustolla, yhtäaikaaisesti kahdesta säiliöstä (sementti sisältyy jo valmiiksi KP30 sideaineeseen).

1) Ennen varsinaista stabilointia lisättiin kaikissa vaihtoehdossa kosteaa tuhkaa tilavuussuhteessa runkoaine+tuhka 3:0,5 eli noin 0,7m paksu kerros blokin päälle. Tuhka esisekoitettiin allasmassaan kaivinkoneella. Altaalle oli jo aikaisemmin tuotu sataman väyläruoppauksen massoja lisärunkoainemassoiksi.

Ennen varsinaista stabilointia ruutuihin levitettiin pintaan kostutettua lentotuhkaa eli ns. kasatuhkaa ($w \approx 21\%$) tilavuussuhteessa 3:0,5 stabiloitavaan massa-
 nahden eli noin 0,7 m kerros (altaalle oli jo aikaisemmin tuotu sataman väyläruoppauksen massoja lisärunkoainemassoiksi). Tuhka oli kostutettu siilosta purettaessa ja varastoitu aumana kentälle stabilointialueen läheisyydessä. Tämä kasatuhka

esisekoitettiin allasmassaan pitkäpuomisella kaivinkoneella. Kasatuhkan lisäys ajoitettiin siten, että kyseinen ruutu ehdittiin stabiloida valmiiksi saman päivän aikana.

Varsinainen stabilointityö tehtiin massastabilointilaitteistolla. Kuivat sideaineet eli sementti, kuiva lentotuhka ja uudet sideaineseokset (KP20+Al10 ja KP30) tuotiin työmaalle säiliöautoilla. Autoista sideaineet siirrettiin pneumaattisesti stabilointilaitteiston omiin erillisiin kahteen säiliöön. Näistä säiliöistä sideaineet syötettiin paineilman avulla letkuja pitkin stabilointikoneelle, jolla kaivinkoneen puomiin asennetun sekoitinkärjen avulla tehtiin varsinainen sekoitus stabiloitavaan massa.

Stabiloitujen blokkien päälle levitettiin viimeistään seuraavana päivänä suodatinkangas ja sen päälle painopenkereeksi ja työpediksi noin 1 m kerros kattilahiekkaa ja kosteaa lentotuhkaa.



Kuvat 8 ja 9. Vuoden 2018 pilottialueen stabilointityö käynnissä.

Pilotoinnin yhteydessä tehtiin laadunvalvonnan kenttä- ja laboratoriokokeita ottamalla stabilointialueelta allasmassasta useista pisteistä, ennen työn yhteydessä käytettävien lisäkomponenttien lisäämistä, ns. 0-näytteitä stabiloitavien massojen laadun/laatuvariaatioiden selvittämiseksi (ja jotta lähtötilanne on paremmin vertailtavissa myös laboratorion ennakkokokeissa käytettyihin massoihin). Stabiloinnin jälkeen kunkin koevaihtoehdon kohdalta otettiin näytteitä sekoitetuista/stabiloiduista massoista kahdelta eri syvyydeltä mm. lujuuskoekappaleiden valmistamista varten. Lisäksi lujuuden kehitystä seurattiin puristin-heijari-kairauksin. Tutkimusmenetelmät on esitetty pääpiirteissään liitteessä 1.

2.3.4 Tulokset

Allasmassat ennen stabilointia

Ennen stabilointia ja kostean tuhkan lisäämistä allasmassoista otettujen 0-näytteiden perusominaisuudet on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Koealueen allasmassoista määritetyt luokitteluominaisuudet.

Näytteet allasmassoista ennen kasatuhkan levitystä ("0-massat")					
Alueella testattu vaihtoehto	Ruutu	Syvyys [m]	ρ_m [kg/m ³]	w [%]	Hh [%]
1	187	0-2	1280	169	12,1
		2-4	1280	164	-
5	189	0-2	1260	183	11,1
		2-4	1250	177	-
-	191	0-2	1280	163	8,7
		2-4	1260	178	-
2	249	0-2	1320	150	12,5
		2-4	1310	154	-
3	270	0-2	1280	163	8,5
		2-4	1270	170	-
-	291	0-2	1290	158	8,7
		2-4	1300	152	-

Laboratoriossa ennakkoon tehdyissä stabiloituvuuskokeissa käytetyn runkomateriaalin vesipitoisuus oli noin 165 % ja orgaanisen aineksen määrä noin 10 % suuruusluokkaa. Pilotointialueella massan ominaisuudet olivat suhteellisen tasaisia ja suhteellisen lähellä ennakkotesteissä käytettyjä massoja, ennakkotesteihin verrattuna suurimmat erot olivat kuitenkin vaihtoehto 5 alueella (w ≈ 180 %) sekä vaihtoehto 2 alueella (w ≈ 150 %). Määritetyt heikutushäviötulokset vaihtelevat 10 % molemmin puolin. Edellä mainitut erot ja vaihtelut saattavat vaikuttaa stabiloinnin onnistumiseen ja saavutettaviin lujuustasoihin (suurempi vesipitoisuus ja suurempi Hh johtavat usein heikompaan stabiloituvuuteen, pienempi vesipitoisuus puolestaan johtaa usein ennakoitua parempaan stabiloituvuuteen).

Stabiloitu allasmassa

Stabiloiduista allasmassoista oleelliset tutkimustulokset liittyvät lujuustasoihin eri ikäisillä massoilla, määritettynä stabiloiduista massoista joko valmistetuista koekappaleista puristuslujuutena laboratorioissa tai leikkauslujuutena kentällä puristin-heijarikairauksilla kairavaunulla. Kyseiset laadunvalvontatulokset on esitetty taulukossa 7, jossa tuloksia on arvioitu värikoodein. Värit on määritelty testikohtaisesti (lujuudet koekappaleista, kevytsiipikairauksilla, puristin-heijarikairauksilla) ja ikäkohtaisesti (6 – 60 vuorokautta). Vihreä on hyvä tulos, keltainen hyväksyttävissä (rajoilla) oleva kohtalainen tulos ja punainen on huono tulos. Leikkauslujuuden minimimitavoite kentällä lujittumisen alkuvaiheessa on tuotantostabilointityön etenemistä ja stabiloidun massan päällä työskentelemistä ajatellen noin 25 kPa (vastaa noin 50 kPa puristuslujuutta). Tätä tekijää voi arvioida 6 vuorokauden puristuslujuustulosten perusteella. Pidempiaikaisen lujittumisen osalta tavoitelujuutena on pidetty 60 vrk lujuuden osalta 80-100 kPa.

Taulukko 7. Laboratorio- ja kenttätutkimustuloksia stabiloiduista massoista.

Testattu * vaihtoehto	Ruutu	Sideaineet [kg/m ³]	Syvyys [m]	Puristus- koe-kpl tiheys [kg/m ³]	Pur.lujuus [kPa]		Leikkauslujuus puristin- heijarikairalla 17-19 d [kPa]			
					6 d	60 d	KP 1	KP 2		
1 (w ₀ ≈170 %)	186	PlusSe + LT 50 + 100	0,5					> 200		
			1					32		
			1,5					36		
			2					68		
			2,5	1370	11,5	69,0	23			
			3				80			
			3,5				> 200			
			4	1430	66,7	119	> 200			
	4,5					> 200				
	5					> 200				
	187		0,5					> 200		
			1					> 200		
			1,5					> 200		
			2					> 200		
			2,5	1390	32,3	91,2	> 200			
			3				> 200			
3,5					> 200					
4		1450	76,9	171	> 200					
4,5				> 200						
5				> 200						
2 (w ₀ ≈150 %)	249	PlusSe + LT + (KP20+AI10) 40 + 100 + 80	0,5					47		
			1					45		
			1,5					> 200		
			2					> 200		
			2,5	1520	94,2	256	> 200			
			3				> 200			
			3,5				> 200			
			4	1550	112	274	> 200			
4,5					> 200					
5					> 200					
3 (w ₀ ≈170 %)	270		PlusSe + LT + (KP20+AI10) 25 + 150 + 50	0,5					> 200	
				1					> 200	
				1,5					> 200	
				2					> 200	
				2,5	1480	51,5	141	> 200		
				3				> 200		
		3,5					> 200			
		4		1440	11,7	34,3	> 200			
4,5					> 200					
5					> 200					
5 (w ₀ ≈180 %)	188	PlusSe + LT + KP30 30 + 100 + 100		0,5					59	
				1					72	
				1,5					> 200	
				2					> 200	
				2,5	1460	48,4	72,2	> 200		
				3				> 200		
			3,5				> 200			
			4	1440	16,5	38,9	26			
	4,5					> 200				
	5					> 200				
	189		0,5					22	> 200	
			1					24	> 200	
			1,5					34	> 200	
			2					> 200	> 200	
			2,5	1440	32,6	40,5	> 200	> 200		
			3				> 200	> 200		
3,5					> 200	> 200				
4		1490	79,0	126	> 200	> 200				
4,5				> 200	32					
5				> 200	46					

"Perusreseptillä" 1, PlusSe+LT, 50+100 kg/m³, lujuudet ovat pääosin kohtalaisen hyviä, tavanomaista satunnaisvaihtelua stabiloinnin laadussa ruutujen sisällä (tosin poikkeuksellisesti syvemmältä otetuissa näytteissä vaikuttaisi olevan enemmän sideainetta, ruutu kenties rikkoutunut yläosastaan näytteenoton yhteydessä ja viereisistä stabiloimattomista päässyt massaa sekaan?). Yksittäisissä syvyytasoissa havaittiin pistemäisesti heikompaa massaa ja tavoitteen alituksia ruudussa 186. Puristuslujuusmääritysten (60 vrk) perusteella tilanne kuitenkin tasaantuu aikalujittumisen myötä, joskin ero on nähtävissä sekä 60 vrk puristuslujuustuloksissa, että kairaustuloksissa. Ruutu 187 on lujittunut hyvin sekä aikalujittumisen että kairaustulosten perusteella. Lähtömateriaali altaassa oli määritetyn vesipitoisuuden ($w \approx 170\%$) ja hehikutushäviön ($Hh \approx 11\%$) perusteella suunnilleen samankaltaista kuin ennakkotesteissä.

Vaihtoehdossa 2, PlusSe+LT+(KP20+Al10), 40+100+80 kg/m³, lujuustulokset olivat jonkin verran parempia kuin "perusreseptillä" toteutetuilla ja kaikki selvästi yli tavoitellun tason, poikkeuksena kuitenkin aivan pintaosan (0-1 m) kairaukset. Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava myös lähtömateriaalin pienempi vesipitoisuus ($w \approx 150\%$), joka vaikuttaa saavutettavaan lujuustasoon suurentavasti ja hankaloittaa täsmällisen vertailun tekemistä. Ruudun stabilointi onnistui suhteellisen hyvin, joskin loppua kohti sekoitus- ja syöttötyö hankaloitui massan käydessä varsin kuivaksi.

Vaihtoehdossa 3, PlusSe+LT+(KP20 + Al10), 25+150+50 kg/m³, lujuustulokset olivat samansuuntaisia kuin perusreseptillä saadut yksittäisine tavoitealituksineen, alkulujittumisessa havaittavissa epähomogeenisuutta (4 m kohdalla huono tulos). Tosin kairakalustolla määritetyt leikkauslujuudet ovat koko syvyyssleikkauksella reilusti yli tavoitetaso. Lopputulosta arvioitaessa toimivuus todetaan hieman heikommaksi kuin vaihtoehto 2, mutta kuitenkin karkeasti saman tasoiseksi kuin vaihtoehto 1. Lähtömateriaali oli vesipitoisuudeltaan samaa kuin perusresepteillä toteutetuilla ($w \approx 170\%$). Vaihtoehtojen 2 ja 3 työvaiheiden yhteydessä arvioitiin sideaineseoksen KP20+Al10 käyttäytyvän tankkausten ja syötön yhteydessä kuin "sementin ja lentotuhkan keskiarvo" eli syöttö toimii hyvin ja tankkaus sujuu nopeammin kuin lentotuhkalla, mutta hitaammin kuin sementillä.

Vaihtoehdoksi 4 suunniteltua reseptiä, LT+(KP20+Al10), 150+150 kg/m³, ei päästy testaamaan lainkaan, koska sideaineseosta ei saatu lainkaan työmaalle logistiikkaketjussa tulleiden ongelmien vuoksi.

Vaihtoehto 5, PlusSe+LT+KP30, 30+100+100 kg/m³, lujuudet ovat pääosin kohtalaisen hyviä, mutta satunnaisvaihtelua esiintyy enemmän kuin "perusreseptissä" ja muissa testatuissa vaihtoehdoissa. Yksittäisiä tavoitteen alituksia esiintyy molemmissa toteutetuissa ruuduissa ja jopa yksittäisen ruudun (R189) eri kairauspisteissä saatiin toisistaan poikkeavat tulokset. Kairauspisteessä 1 havaittiin löysemää massaa ja jopa selkeäköjä tavoitteen alituksia ruudun pintaosassa (s. 0-1,5 m) kun taas kairauspisteessä 2 löysemää massaa havaittiin stabiloinnin pohjaosassa (s. 4,5-5 m), lujuustasojen ollessa ruudun molemmissa kairauspisteissä muutoin yli tavoitteen. Ruudun lähtömassan vesipitoisuus oli piltialueen korkein ($w \approx 180\%$), mutta silti sideaineseos/sideainemäärä vaikutti olevan stabilointikoneelle liian suuri toteutettavaksi, sillä kone ei pystynyt kunnolla sekoittamaan eikä syöttämäänkaan vaadittua määrää sideainetta ruudun käydessä liian kuivaksi. Yhtäaikaisessa sideaineiden syötössä oli myöskin ongelmia johtuen mitä todennäköisimmin sideaineen laadusta. Mahdollinen sideaineen epähomogeenisuus (lajittuminen/rakeisuus tai kosteus/tahmeus) aiheutti sideainevirtaukseen epätasaista ja suurta vaihtelua, jolloin välillä toisesta syöttimestä tuli vain ilmaa, joka puolestaan johtaa stabiloidun rakenteen rikkoutumiseen ja epähomogeeniseen lopputulokseen. Isoimmat ongelmat molempien ruutujen osalta esiintyivät loppuvaiheessa syöttöä. Muutoin sideaineseoksen KP30 arvioitiin käyttäytyvän tankkausten ja syötön yhteydessä kuin lentotuhka eli olevan "hitaampi (kevyempi)" kuin sementti. Taulukossa 8 on esitetty 60 vrk puristuslujuustulokset laboratoriossa tehtyjen ennakkokokeiden sekä pilotissa valmistettujen koekappaleiden osalta. Pilotissa käytetyt reseptit johdettiin/päätettiin

ennakkokokeista saatujen tulosten, sideaineiden käytännön saatavuuden sekä arvioitujen kustannustekijöiden perusteella. Reseptit eivät siis ole yhteneviä ennakkokokeiden ja pilotissa toteutettujen välillä, vaan käytetyissä sideainemäärissä (sekä tietyksi runkoaineen vesipitoisuuksissa) on eroja, mutta tulkintoja sideaineiden toimivuudesta ja vastaavuudesta voidaan tietyiltä osin silti tehdä.

Taulukko 8. Laboratorion ennakkokoe tulosten ja pilotin (ka.) puristuslujuudet 60 vrk.

Labran ennakkokokeet				Pilotin laadunvalvonta		
Runkoaine	Sideaine		Puristuslujuus [kPa]	Runkoaine	Sideaine	Puristuslujuus ka. [kPa]
	laatu	määrä [kg/m ³]	60 vrk		määrä [kg/m ³]	60 vrk
allasmassat + KT 3:0.5 (til.) (vesipit 165%)	Plus + LT(Rauma)	50+100	94	R186 ja R187 (w ₀ ≈170 %)	50+100	112
	Plus + LT(Rauma) + KP20	50+100+100	56	-	-	-
	Plus + LT(Rauma) + (KP20+AI10)	25+100+100	67	R249 (w ₀ ≈150 %)	40+100+80	265
		25+75+100	46	R270 (w ₀ ≈170 %)	25+150+50	88
	Plus + LT(Rauma) + KP30	50+100+100	103	-	-	-
25+100+100		57	R188 ja R189 (w ₀ ≈180 %)	30+100+100	69	

”Perusreseptin” (PlusSe+LT 50+100) osalta pilotin yhteydessä valmistettujen lujuuskoekappaleiden puristuslujuus 60 vuorokauden ikäisenä on karkeasti samaa tasoa tai hieman korkeampi kuin laboratorion ennakkokokeissa samalla reseptillä (keskiarvo laadunvalvonta 112 KPa, ennakkokoe 94 kPa).

Ennakkokokeissa perusreseptin tapaan toiminut ja saman suuruusluokan puristuskoestuksissa saavuttanut reseptiikka oli PlusSe+LT+KP30 50+100+100 kg/m³ (käytännössä 40/45+100+100 olisi riittävä määrä). Muilla testatuilla vaihtoehdoilla jäätin selvästi matalampiin lujuustasoihin. Pilottiin valikoiduilla määrillä sideaineseokset ovat kuitenkin toimineet paremmin käytännön toteutuksessa. Tähän tosin vaikuttaa monta tekijää, kuten esim. runkoaineen pienempi lähtövesipitoisuus, suurempi kokonaissideainemäärä, suurempi sementin määrä reseptiikassa ja korkeampi lämpötilankehitys suuremmissa massassa.

Taulukossa 9 on esitetty 90 vrk lujittumisen jälkeen määritetyt vedenläpäisevyydet pilotissa valmistettujen koekappaleiden osalta. Testien tuloslomakkeet on puolestaan esitetty liitteessä 3. Testatuilla resepteillä vaihtoehtojen 1 (PlusSe+LT 50+150 kg/m³, ”perusresepti”), 3 (PlusSe+LT+(KP20+AI10) 25+150+50 kg/m³) ja 5 (PlusSe+LT+KP30 30+100+100 kg/m³.) vedenläpäisevyydet ovat keskenään täysin samalla tasolla eli 1,1...1,2 x 10⁻⁸ m/s. Vaihtoehdon 2 (PlusSe+LT+(KP20+AI10) 40+100+80 kg/m³) testatulla koekappaleella läpi kulkevan veden määrä on kaksinkertainen edellisiin nähden, mutta k-arvo on siis kuitenkin karkeasti ottaen samaa suuruusluokkaa eli 3,2 x 10⁻⁸ m/s. Kaikki edellä mainitut tulokset ovat samaa suuruusluokkaa myös tuotantostabiloinnin laadunvalvontatulosten kanssa.

Taulukko 9. Pilottistabiloinnin laadunvalvonnan yhteydessä valmistetuista vedenläpäisevyyskoekappaleista määritetyt k-arvot.

Koekappalenumero	Testattu vaihtoehto	Ruutu	Sideaineet [kg/m ³]	Syvyys [m]	Ennen testiä ved.läp. koe-kpl märkätiheys [kg/m ³]	Testin jälkeen ved.läp. koe-kpl märkätiheys [kg/m ³]	Testin jälkeen ved.läp. koe-kpl kuivatiheys [kg/m ³]	Vedenläpäisevyys k-arvo [m/s]
SKV-3A	1 (w ₀ ≈170 %)	186	PlusSe + LT 50 + 100	2,5	1378	1401	687	1,2 x 10 ⁻⁸
SKV-15A	2 (w ₀ ≈150 %)	249	PlusSe + LT + (KP20+AI10) 40 + 100 + 80	2,5	1530	1568	911	3,2 x 10 ⁻⁸
SKV-19A	3 (w ₀ ≈170 %)	270	PlusSe + LT + (KP20+AI10) 25 + 150 + 50	2,5	1337	1386	743	1,1 x 10 ⁻⁸
SKV-9A	5 (w ₀ ≈180 %)	188	PlusSe + LT + KP30 30 + 100 + 100	2,5	1397	1438	758	1,1 x 10 ⁻⁸

2.3.5 Johtopäätökset

Vertailu ja tulokset sekä niistä tehtävät johtopäätökset ovat suuntaa antavia ja suuruusluokkaisia arvioita, eivät suoria verrokkeja tai täsmällisiä faktoja.

”Perusresepti” (PlusSe+LT, 50+100 kg/m³) on toimiva, mutta myös korvaavia ratkaisuja on kuitenkin löydettävissä.

Vaihtoehdossa 2 (PlusSe+LT+(KP20+AI10), 40+100+80 kg/m³) runkoaineen lähtövesipitoisuuskin oli pienempi, mutta tuloksista voidaan silti tulkita stabiloinnin onnistuneen hyvin aivan pintaosan (< 1m) kerroksia lukuun ottamatta. Muutoin lujuustasot ovat jonkin verran parempia kuin ”perusreseptillä”. Karkeasti haarukoituna voidaan arvioida sideaineseoksen KP20+AI10 korvaavan sementtiä suhteessa 4:1 (eli reseptiin tarvitaan 80 kg/m³ KP20+AI10-seosta, jotta saadaan korvattua 15-20 kg/m³ sementtiä).

Vaihtoehdossa 3 (PlusSe+LT+(KP20+AI10), 25+150+50 kg/m³) lujuustasot jäivät heikomaksi kuin vaihtoehdossa 2, mutta tavoittivat kuitenkin karkeasti saman suuruusluokan kuin ”perusresepti” (jossa sama lähtövesipitoisuus). Karkeasti haarukoituna voidaan arvioida sideaineen (KP20+AI10) korvaavan sementtiä suhteessa 3:1 (eli tarvitaan (KP20+AI10)-seosta 75 kg/m³, jotta saadaan korvattua 25 kg/m³ sementtiä).

Vaihtoehdossa 5 (PlusSe+LT+KP30, 30+100+100 kg/m³) esiintyi epähomogeenisuutta molemmissa ruuduissa. Tästä ja muita suuremmasta lähtövesipitoisuudesta huolimatta lujuustasot pääosin kuitenkin kohtalaisen hyviä ja karkeasti samaa suuruusluokkaa kuin ”perusreseptillä”. Karkeasti haarukoituna voidaan arvioida sideaineen KP30 korvaavan sementtiä suhteessa 5:1 (eli tarvitaan KP30 100 kg/m³, jotta saadaan korvattua 20 kg/m³ sementtiä). On kuitenkin huomioitava, että pilotista

saatujen kokemusten perusteella ainakin kyseinen koe-erä erikoissideaineesta (KP30) osoittautui käytännön työskentelyn kannalta haasteelliseksi (ongelmat syötössä).

Kokonaisuutena ajatellen voidaan pilotissa tehtyjen havaintojen perusteella todeta uusien jätepohjaisten sideaineiden jauhatus- ja sekoitustyön sekä logistiikan vaativan vielä lisää kehitystä, toimintavarmuutta, toimituskapasiteettia sekä nopeutta ennen isomman mittakaavan toteutuksia. Tutkittavia, huomioitavia ja/tai avoimia asioita liittyen jätepohjaisten sideaineseosten kehitykseen ja toimintoihin jatkossa ovat mm.

- Sideaineiden lisätutkimukset koostumuksen ja olomuodon suhteen, kuten esimerkiksi raekoko, raemuoto, vesipitoisuus, paakkuisuus, juoksevuus jne.
- Työkustannusten muutokset ja stabiloitavien massojen laatumuutokset, jos esimerkiksi stabilointiin tarvittava kokonaissideainemäärä kasvaa (työvaiheiden, esim. sideainetankkausten lisääntyminen, stabiloitavan ruudun kuivuminen stabiloinnin aikana yms., johtavat työn hidastumiseen/hankaloitumiseen).
- Materiaalin oltava "toiminta- ja käsittelyvarmaa" koko prosessin ajan. Eli sideaineen koko logistiikkaketjun toimivuus saatavuudesta, käsittelystä (sekoitus, jauhaminen), käsiteltävyydestä, kuljetuksista, eri purku- ja tankkausvaiheista aina stabiloinnin syöttö- ja sekoitusvaiheeseen asti. Myös sideaineen säilyvyys on varmistettava (esim. muodostuuko paakkuja tms.?)
- Saatujen tulosten perusteella voidaan karkeasti ja suuntaa antavasti arvioida nyt testattujen jätepohjaisten sideaineseosten korvaavan sementtiä suhteessa 3:1...5:1. Sideaineiden kehitystyötä ja toimivuuden testaamista on syytä jatkaa entistä paremman hyötysuhteen ja prosessin kokonaisvarmuuden saavuttamiseksi.

3. PÄÄLLYSRAKENTEN TEKNISET KELPOISUUSTUTKIMUKSET

Päällysrakenteita koskevat tekniseen kelpoisuuteen liittyvät tutkimukset täydennetään tähän raporttiin myöhemmin. Päällysrakennepilotointi on tarkoitus toteuttaa 2020-21.

4. ARVIOINTIA PILOTOINTIEN PERUSTEELLA/KOKONAISYHTEENVETO

Life-IP CIRCWASTE Finland (LIFE15 IPE/FI/004) osahankkeen C.10 tavoitteena on löytää teollisuuden jätėjakeille hyötykäyttökohteita massastabiloinnin sideaineena sekä erilaisissa päällysrakenteissa. Jättemateriaalien soveltuvuutta arvioidaan sekä teknisen toimivuuden että ympäristökelpoisuuden kannalta, mutta myös kustannuskilpailukyky täytyy huomioida. Tässä raportissa keskityttiin teknisen kelpoisuuden selvittämiseen.

Kenttäolosuhteissa lujittumiseen vaikuttavia muuttujia on enemmän kuin laboratoriossa, jossa olosuhteet on vakioitu. Merkittävimpiä tekijöitä ovat käsiteltävän massan laatu ja laatuvaihtelu stabiloitavalla alueella, sekoitetun valmiin massan homogeenisuus ja varsinkin sideaineen jakaantumisen homogeenisuus sekä stabiloitavan massan lähtölämpötila. On myös huomioitava, että kaikki tässä raportissa esitetyt tutkimustulokset on saatu tilanteessa, jossa stabiloitaviin allasmassoihin on seostettu kasatuhkaa määrää, joka vastaa noin 0,7 m kerrosta altaan pintaan levitettynä. Lisäksi altaaseen tuotiin aiemmin lisärunkoaineeksi massoja satamaväylien ruoppauksista.

Eri sideaineresepteillä stabiloitujen allasmassojen teknistä kelpoisuutta arvioitiin lujuustason kehittymistä seuraamalla, massoista puristuskoemäärityksiä varten valmistettujen koekappaleiden ja erilaisen kairausten avulla. Tarkoitus oli selvittää, päästäänkö uusilla jätepohjaisilla sideaineseoksilla tai muilla perustilanteesta poikkeavilla resepteillä samaan lopputulokseen kuin Sampaanalanlahden stabiloinnissa käytetyllä perusreseptillä PlusSe+Lentotuhka 50+100 kg/m³ (tämä reseptiikka on jo aiemmin todettu toimivaksi ratkaisuksi korvaamaan pelkällä sementillä toteutettua alkuperäistä ratkaisua). Leikkauslujuuden minimimitavoite kentällä lujittumisen alkuvaiheessa on tuotantostabilointityön etenemistä ja stabiloidun massan päällä työskentelemistä ajatellen noin 25 kPa (tätä tekijää voi arvioida 6 vuorokauden puristuslujuustulosten perusteella). Pidempiaikaisen lujittumisen osalta tavoitelujuutena on pidetty 60 vrk lujuuden osalta 80-100 kPa. Pilottien toteutuksessa saavutetut lujuustasot olivat eri reseptiikoilla pääosin hyväksyttävällä ja merkittävilta osin myös hyvällä tasolla täyttäen vaatimukset työn alkuvaiheen etenemisen ja etenkin pitkäaikaislujittumisen osalta. Lujuustasojen laatu tulee esiin etenkin suhteutettuna pilottimassojen lähtövesipitoisuuden merkittävään vaihteluun ja suuruuteen verrattuna laboratorion ennakkokokeissa käytettyihin massoihin.

Sampaanalanlahden stabiloinnissa on käytetty pääosin pelkän sementtistabiloinnin korvaavana "perusreseptinä" PlusSe+LT 50+100 kg/m³, joka on hyvin toimiva. Pilottien yhteydessä saatujen kokemusten perusteella on kuitenkin löydettävissä useita vaihtoehtoisiaakin mahdollisuuksia stabiloinnin toteuttamiselle. Piloteissa toteutettuja ja vertailussa mukana olleita reseptiikoita oli useita, mutta pilottien yhteydessä tehtyjen laadunvalvontatulosten perusteella arvioituna niistä teknisesti lujuuden kehitystä ajatellen parhaita olivat jätepohjaisia sideaineseoksia sisältävät reseptit PlusSe+LT+(KP20+Al10) 40+100+80 kg/m³, PlusSe+LT+(KP20+Al10) 25+150+50 kg/m³ ja PlusSe+LT+KP30 30+100+100 kg/m³. Edellä mainituilla sekä alkuvaiheen lujittuminen että pitkäaikaislujittuminen olivat hyvällä ja vaaditulla tasolla, jopa niin, että nyt käytettyjä määriä hieman pienemmätkin saattaisivat olla riittäviä ainakin helpompia ja kuivempia reuna-alueita stabiloitaessa. Myös pelkällä isolla määrällä (350 kg/m³) lentotuhkaa, tai reseptillä LT+OSA8 240+60 kg/m³, stabiloituna massojen pitkäaikaislujittuminen on hyvällä tasolla, mutta alkuvaiheessa työn etenemistä ajatellen on näiden kohdalla epävarmuuksia riittävän lujuudenkehityksen suhteen. Niitä voidaan kuitenkin hyödyntää erityisesti altaan reuna-alueilla helpompien ja kuivempien massojen stabiloinnissa.

Pilottien yhteydessä tehtyjen tutkimusten ja niiden tulosten perusteella saatiin lujuuden kehityksen kannalta viitteitä sementin korvaamisesta yllä mainituilla jätepohjaisilla sideaineilla suhteessa 5:1...3:1 (helpoimmilla massoilla voidaan tietyissä tilanteissa jättää sementti jopa kokonaan pois), mutta muu tekninen toimivuus vaatii näiden kohdalla vielä kehittämistä. Esimerkiksi jätepohjaisten sideaineseosten (KP20+Al10 ja KP30) logistiikan ja käsittelyn suhteen tarvitaan vielä lisättestaamista ja toimintavarmuuden kehittämistä. Pilottien yhteydessä epävarmuustekijöitä ja kehitystarpeita havaittiin mm. jätepohjaisten sideaineiden valmistuksessa, toimituksessa työmaalle sekä toimivuudessa stabilointilaitteistossa (etenkin jätepohjainen sideaine KP30, ainakin toimitetun erän osalta, osoittautui haasteelliseksi käsiteltäväksi stabilointilaitteistossa). Näiden seikkojen tulee olla täysin kunnossa ennen isomman mittakaavan toteutuksia. Pelkän lentotuhkan käyttö stabiloinnissa on tietyissä tilanteissa mahdollista, mutta sen varsin suuren tarvittavan käyttömäärän vuoksi työsaavutus on jonkin verran matalampi perusreseptiin verrattuna (sideaineiden välitankkaukset, runkoaineen "kyllästyminen" ja sekoittamisen mahdollinen hankaloituminen yms. hidasteet).

Yllä mainittujen sideaineresepien kustannuksista voidaan karkealla tasolla ja yksinkertaistuksia tehden todeta (siis pelkät sideainekustannukset, epävarmuustekijöiden vuoksi ei huomioida vielä esim. eri sideainemateriaalien keskinäisiä eroja stabilointityön käytännön toteutuksen, työmäärän, työsaavutuksen, käsittelyn, välivarastoinnin tms. osalta) arviolta seuraavaa: sideainekustannukset

stabiloitavaa rakennekuutioita kohden ovat selkeästi edullisimmat pelkkää Rauman Biovoiman lentotuhkaa 350 kg/m^3 käyttäen, perusreseptin (PlusSe+LT $50+100 \text{ kg/m}^3$) ja LT+OSA8 $240+60 \text{ kg/m}^3$ reseptien osalta kustannukset ovat keskenään samaa luokkaa (~1,5-kertainen pelkkään tuhkaan 350 kg/m^3 nähden) ja muilla yhteenvedossa mainituilla jätepohjaisilla sideaineresepteillä selvästi suuremmat edellisiin nähden (tosin näiden osalta reseptien sideainemääriä saattaa olla mahdollista pienentää, jolloin tietysti myös kustannukset ovat matalammat). Toisaalta tarkennettuna voidaan todeta ja ajatella kustannustasoista eri vaihtoehdoilla myös seuraavaa: Sampaanalanlahdella stabilointityön alkuvaiheessa käytettiin sideaineena pelkkää sementtiä $100\text{...}200 \text{ kg/m}^3$ (riippuen allasrunkoaineen ominaisuuksista), jonka yleinen hintataso on näinä vuosina ollut noin $85\text{--}95 \text{ €/tonni}$. Alkuvaiheen tilanteeseen nähden altaalla on alettu kuitenkin käyttämään allasmassojen jalostamisessa myös lisärunkoaineita (esim. meriväyläruoppauksen sedimenttimassoja, kasatuhkaa) helpottamaan tilannetta ja vähentämään käytettävissä sideainereseptiikoissa kaupallisen sideainemäärän tarvetta. Nykyisessä Sampaanalanlahden perusreseptiikassa PlusSe+LT $50+100 \text{ kg/m}^3$ osa sementistä onkin jo korvattu lentotuhkalla, ja tämän seoksen hinnan arvioidaan olevan noin $35\text{--}40 \text{ €/tonni}$. Mikäli mainitussa perusreseptissä voidaan lisäksi korvata sementtiä uusilla jätepohjaisilla sideaineilla "turvallisesti" vaikkapa suhteessa 4:1, voidaan vaihtoehtokomponentin "käyväksi hinnaksi" ajatella muodostuvan 25 % sementin hinnasta (eli $20\text{--}25 \text{ €/tonni}$) ja tästä on pääteltävissä uuden jätepohjaisen sideaineen käytöllä saatava kustannushyöty. Eli esimerkiksi reseptiikan PlusSe+LT+uusi jätepohjainen sideaine $40+100+80$ hinnaksi arvioidaan muodostuvan noin $27\text{--}32 \text{ €/tonni}$, mutta toki samalla tarvittava käytömäärä kasvaa. Uudet jätepohjaiset sideainekomponentit pienentävät sementin tarvetta, mutta "hyötysuhteessa" on vielä kehitettävää. Uusien sideainekomponenttien osalta erittäin tärkeää onkin päästä toimintavarmaan ja kapasiteetiltaan riittävän suureen toimintaketjuun (kapasiteetti/määrä, toimitusvarmuus, homogeenisuus) sekä tietysti myös käsittelykustannuksiltaan kilpailukykyiseen hintatasoon.

Tehtyjä tutkimuksia/havaintoja tarkasteltaessa ja johtopäätöksiä tehtäessä, tulee huomioida myös stabilointityön edetessä kohteella mukaan lisätyn lisärunkoaineen käytön (kohteella esim. varsinaisia allasmassoja karkeammat/kiinteämmät/kuivemmat ruoppausmassat sekä erityisesti kasatuhka) oleellinen vaikutus massojen laatuun, tarvittaviin sideainemääriin ja lujittumiseen. Näiden käytön vaikutus on ratkaiseva ja vaikutus "kertaantuu" etenkin jätepohjaisia sideaineita käytettäessä (tukevoittavat runkoainetta, vähentävät tarvittavaa käytettävien sideaineiden määrää, vaikutus merkittävä etenkin jätepohjaisia sideaineita käytettäessä) ja tuottavat näin ollen erittäin merkittäviä kustannussäästöjä kokonaisuuteen. Ylipäätään ilman lisärunkoainekomponenttien käyttöä koko stabilointityö ei todennäköisesti olisi taloudellisesti mahdollista.

Myös kosteiden ja/tai suurten sideainekomponenttien/lisäkomponenttimäärien sekoittamistapaan ja -tehokkuuteen tulee kiinnittää huomiota ja niiden suhteen tehdä kehitystyötä, sillä nykyisellään edelliset aiheuttavat helposti lisätyn sideaineen painottumisen stabiloidun kerroksen pintaosaan.

Yllä oleva yhteenvedo koskee Sampaanalanlahden massastabilointipiloteista saatuja kokemuksia. Päälysrakenteita koskevat tekniseen kelpoisuuteen liittyvät tutkimukset täydennetään tähän raporttiin myöhemmin. Päälysrakennepilotointi on tarkoitus toteuttaa 2020-21.

LIITE 1. (1 s.) Laadunvalvonnan yhteydessä toteutettujen teknisten kenttä- ja laboratoriokokeiden menetelmäkuvaukset

Vesipitoisuus

Allasmassoista määritettiin vesipitoisuus mikroaaltouunikuivauksella. Vesipitoisuudet on laskettu käyttäen ns. geoteknistä laskentatapaa eli vesipitoisuus ilmoitetaan näytteen sisältämän veden massan suhteena näytteen kuivamassaan (SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-1:fi).

Hehkutushäviö

Allasmassan sisältämän eloperäisen aineksen suhteellista osuutta arvioitiin hehkutushäviön (H_h) perusteella kuivapolttomenetelmällä hehkutusuunissa (550°C). Hehkutushäviö laskettiin kuivattua näytettä hehkutettaessa hävinneen massan suhteena näytteen alkuperäiseen kuivamassaan (SFS-FI 1997-2).

Koekappaleet ja puristuslujuus

Stabiloidusta massasta valmistettiin kentällä lujuuskoekappaleita puristuskokeita varten. Kappaleet valmistettiin sullomalla stabiloitua, vielä sitoutumatonta massaa näytesylintereihin siten, että kappaleista tuli homogeenisia. Kappaleiden tiivistys ja säilytys tehtiin pääosin samalla tavalla kuin laboratoriossa valmistettavilla koekappaleilla. Kappaleet säilytettiin noin 2 vuorokauden ajan lämpöeristetyissä laatikoissa kenttälaboratoriossa, jonka lämpötila oli 18-25 °C, ja tämän jälkeen koestamiseen saakka viileässä (n. +8 °C) siten, että niiden kuivuminen oli estetty (pakattu muovipusseihin). Puristuslujuudet määritettiin laboratoriossa 1-aksiaalisesti noin 7 ja 60 vuorokauden kuluttua koekappaleiden valmistuksesta. Koekappaleet tunkattiin ulos koesylintereistä, ja kappaleiden päät tasattiin. Puristuskoe tehtiin vakionopeudella 1 mm/min. Lujuustuloksia ei ole korjattu muotokertoimella (mukailtu SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-7:fi).

Vedenläpäisevyys

Stabiloidusta massasta valmistettiin kentällä koekappaleita myös vedenläpäisevyydestejä varten. Kappaleet valmistettiin ja säilytettiin edellisessä kohdassa esitetyllä tavalla. Koekappaleista käynnistettiin vedenläpäisevyydestit 90 vuorokauden lujittumisen jälkeen. Vedenläpäisevyydestissä (SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-11:fi) testikappale asetetaan membraani kalvon sisälle kolmiaksiaaliseen paineeseen testiselliin. Testikappaleen läpi johdatetaan vettä etusäiliöstä takasäiliöön ja säiliöiden vedenpintojen muutoksia mitataan. Kun etusäiliössä on korkeampi paine kuin takasäiliössä, vesi virtaa koekappaleessa. Vedenvirtaus tapahtuu testimetodissa alhaalta ylöspäin. Vedenläpäisevyys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$k = \frac{Q * L}{A * t * H}$$

jossa k= vedenläpäisevyys [m/s]; Q = testikappaleen läpi menneen veden tilavuus [m³]; L = testikappaleen korkeus [m]; A = testikappaleen poikkileikkauksen pinta-ala [m²]; t = aika [s]; H = hydraulinen paine-ero [m].

Leikkauslujuus puristin-heijarikairauksilla

Stabiloidusta massasta määritettiin jokaisesta ruudusta lujuustaso 17-19 vuorokauden lujittumisen jälkeen (2018) tai 69-78 vuorokauden lujittumisen jälkeen (2017) kairavaunukalustolla (vuoden 2017 pilotissa seurattiin lujuuden kehittymistä ensimmäisen kahden viikon aikana suuntaa antavasti myös kevyen, käsikäyttöisen ja ”pikatestaukseen” tarkoitetun siipikairan avulla).