

Raaka-ainemuutoksien vaikutus lattiatasoitteen lujuuden kehitymiseen

Tuotekehitysprojekti

Riku Touru

OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2020

Laboratoriotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Laboratoriotekniikka

TOURU, RIKU:

Raaka-ainemuutoksien vaikutus lattiatasoitteen lujuuden kehittymiseen
Tuotekehitysprojekti

Opinnäytetyö 53 sivua, joista liitteitä 7 sivua
Maaliskuu 2020

Tämä opinnäytetyö suoritettiin Kiilto Oy:n Lempäälän toimipisteen tuotekehitys-laboratorion rakennusosastolle. Työn tavoitteena oli selvittää, miten eri raaka-aineiden muutokset vaikuttivat lattiatasoitteen kovettumiskäyttäytymisen ja lujuuden kehitykseen ensimmäisten 24:n tunnin aikana. Työn tarkoituksena oli valmistaa lattiatasoitteesta näyte-eriä kolmella eri hidastinmekanismilla, joille suoritettiin samoja raaka-ainevaihdoksia yksi raaka-aine kerrallaan. Tasoiteversioiden kovettumiskäyttäytymistä testattiin ultrasonic pulse velocity (UPV) -mittauksella ja niiden taivutus- ja puristuslujuusarvot mitattiin 2½, 5 ja 24:n tunnin jälkeen valamisesta näyteprismojen avulla.

UPV-mittauksien perusteella raaka-ainevaihdoksista vain aluminaattisementin vaihdoksella oli merkittävä vaikutus tasoitteen kovettumiskäyttäytymiseen, pidentäen tasoitteen työajan kestoa toimivilla hidastinmekanismeilla noin 20 minuuttia. Hidastinmekanismi 2:n todettiin olevan toimimaton, sillä sen sisältämällä tasoitteilla työaika päättyi jo noin 15 minuutin jälkeen valusta. Positiivisesti tasoitteiden lujuuden kehittymiseen vaikuttivat raaka-ainevaihdoksista ainoastaan dispersiopulverin ja notkistimen vaihdokset.

Suoritettut testit käsittelivät vain yhtä osa-aluetta lattiatasoitteen ominaisuuksista. Työn tuloksien perusteella dispersiopulverin ja notkistimen vaihdokset ovat lujuuden kehittymisen kannalta positiivisia muutoksia. Kaikki testatut raaka-ainemuutokset voitaisiin testata myös standardin SFS-EN 13892-2 (2003) määräämän 28 vrk ikäisinä, jotta nähtäisiin raaka-ainemuutoksien vaikutus tasoitteen lujuuden kehityksessä pidemmällä aikavälillä. Hyväksi todetuista raaka-ainemuutoksista tulisi tehdä myös muita ominaisuuksia kuten tartuntalujuutta, kutistumaa ja leviävyyttä käsitteleviä testauksia, jotta saadaan selville, miten raaka-ainemuutokset vaikuttavat myös muihin lattiatasoitteen tärkeisiin ominaisuuksiin.

Luottamukselliset tiedot on poistettu tästä raportista.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Laboratory Engineering

TOURU, RIKU:

The Effect of Ingredient Alterations on the Strength Development of a Levelling Compound

Product development project

Bachelor's thesis 53 pages, appendices 7 pages

March 2020

This thesis work was conducted for Kiilto Oy's product development laboratory in Lempäälä. The purpose was to study the effect of ingredient alterations on the hardening and strength development of leveling compounds during the first 24 hours after mixing. This was studied by forming leveling compound specimens with three different mechanisms of cement retardation and making the same ingredient alterations to all three mechanisms one ingredient at a time. The hardening process was studied using ultrasonic pulse velocity -testing and strength development was studied by testing the flexural and compression strength of the specimens at 2½-, 5- and 24-hour marks using concrete prisms.

During the UPV testing, it was concluded that the retardation mechanism number 2 did not work as intended, leaving the induction period of the leveling compound too short. Of ingredient alterations, only the replacement of aluminat cement influenced the hardening behavior of the leveling compound, and the observed effect was negative, as it lengthened the induction period by a large margin. In terms of strength development, the alterations made to the redispersible polymer and plasticizer showed an increase in both the flexural and compressive strengths of the specimens at all the used time intervals.

The results indicate that alterations to the admixtures and aggregates of the leveling compound do not have a significant effect on the hardening behavior of the compound, while alterations to aluminat cement do. Alterations to the redispersible polymer and plasticizer of the compound affect the strength development of the compound positively. However, considerably more work has to be done to determine the overall effect that these alterations have on the other properties of the leveling compound.

All confidential information has been redacted from this report.

Key words: levelling compound, compression strength, ultrasonic testing

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	LATTIATASOITTEET	7
	2.1 Lattiatasoitteen rakenne	7
	2.1.1 Runkoaineet ja sideaineet	7
	2.1.2 Lisäaineet	10
	2.2 Lattiatasoitteiden vaatimukset	13
3	ULTRAÄÄNIMITTAUS	16
	3.1 Ääniaallot	16
	3.2 UPV-mittaus	19
4	MITTAUS- JA MÄÄRITYSMENETELMÄT	20
	4.1 Näytteiden muodostus	20
	4.2 Kovettumiskäyrän määrittäminen	22
	4.3 Lujuudenkehityksen määrittäminen	24
5	TULOKSET	28
	5.1 Kovettumiskäyrän määrittäminen	28
	5.2 Taivutus- ja puristuslujuus	33
	5.3 Virhetarkastelu	37
6	TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA	38
	LÄHTEET	44
	LIITTEET	47
	Liite 1. UltraTest-24 h kovettumiskäyrät	47
	Liite 2. Taivutus- ja puristuslujuusmittauksien tulokset	50
	Liite 3. Taivutus- ja puristuslujuustulokset virherajoihin	52

ERITYISSANASTO

Avoin aika	Aika, jolloin valettua tasoitetta voidaan muokata tarkoitukseen sopivaan muotoon.
Hydrataatio	Sementin ja veden välinen reaktio
Induktiovaihe	Hydrataation vaihe, jolloin reaktio etenee hitaasti ja sementtituotetta voidaan muokata ja muovata
Sintraus	Kiinteän kappaleen muodostus ainesosista lämmön tai paineen avulla sulattamatta ainesosia
Sitoutuminen	Sementin alkujäykistyminen hydrataation yhteydessä

1 JOHDANTO

Lattiatasoitteita käytetään lattianpäällysteen asennuksen valmistelussa tasaisen lattiapohjan aikaansaamiseksi. Tasoitepintaa voidaan myös pitää varsinaisena lattiapintana joissakin rakennuskohteissa. (Weber, 2019) Lattiatasoitteet voivat olla joko sementti- tai kipsipohjaisia. Tämä opinnäytetyö keskittyy sementtipohjaisiin itsestäänsiliäviin lattiatasoitteisiin.

Opinnäytetyö suoritettiin Kiilto Oy:n Lempäälän toimipisteen tuotekehityslaboratoriossa. Lattiatasoitteet ovat yksi Kiilto Oy:n rakennusosaston tuoteryhmä. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten eri raaka-aineiden muutokset vaikuttavat lattiatasoitteen kovettumiskäyttäytymiseen ja lujuuden kehittymiseen ensimmäisten 24:n tunnin aikana.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli muodostaa lattiatasoitteesta näyte-eriä kolmella eri hidastinmekanismilla, joiden yhtä raaka-ainetta vaihdettiin kerrallaan, ja verrata näytteiden ominaisuuksia pohjatuotteeseen. Tarkoitus oli määrittää näytteiden kovettumiskäyttäytymistä ultraäänimittauksen avulla, ja selvittää niiden lujuuden kehitystä testaamalla taivutusveto- ja puristuslujuusarvoja 2½, 5 ja 24 tunnin näyteprismoista.

2 LATTIATASOITTEET

Lattiatasoitteet ovat veteen sekoitettavia tuotteita, joita voidaan käyttää rakentamisessa eri tarkoituksiin. Lattiatasoitetta voidaan levittää alusvalun päälle silottamaan lattiapintaa, joka helpottaa lattian lopullista päällystämistä (Anderberg & Wadso, 2007). Tasoitettu pinta voidaan myös jättää päällystämättä, jolloin tasoite toimii varsinaisena lattiapintana. Lattiatasoitteella on myös mahdollista paikata betonipinnalla esiintyviä reikiä tai halkeamia. (Hassanein, Shalaby, Amein, Ahmed, Orban, Fathy, Gharieb, Abouzeid & Fahmy, 2016)

2.1 Lattiatasoitteen rakenne

Lattiatasoitteet koostuvat runkoaineesta, sideaineesta ja pieninä määrinä lisättävistä lisäaineista. Lisäaineet ovat tasoitteen ominaisuuksiin vaikuttavia aineita, kuten hidastimia, notkistimia, paksuntajia ja vaahdonestoaineita. (Anderberg & Watso, 2007) Lisäaineiden avulla tasoitteille saadaan luotua myös itsesiliäviä ominaisuuksia, jolloin käyttäjän manuaalista levitystä ei tarvita valamisen yhteydessä. (Hassanein ym. 2016)

2.1.1 Runkoaineet ja sideaineet

Runkoaineena tasoitteissa toimivat useimmiten eri raekokoiset hiekat tai kalkkikivitäyteaine. Runkoaineet lisäävät tasoitteen tiheyttä, ja voivat täyttää tuotteen muissa ainesosissa mahdollisesti esiintyviä huokosia, jonka seurauksena tasoitteessa esiintyy vähemmän ilmaa. Pienempi ilmamäärä johtaa vahvempaan tasoitteeseen. (Odimegwu, Zakaria, Abood & Ibearugbulem, 2018) Täyteaineet myös vähentävät tasoitteen kutistumaa, lisäävät sen hankauskestävyyttä ja sitovat hydrataation alkuvaiheessa tuotettua lämpöä (Goodship, 2010).

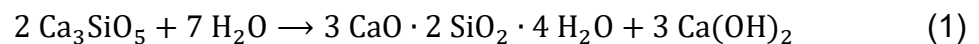
Sideaineena tasoitteissa käytetään portlandsementtiä, aluminaattisementtiä, kalsiumsulfaattia tai näiden aineiden sekoitetta. Portlandsementti on sementtityypeistä yleisin, ja sen esituotetta tuotetaan kuumentamalla kalkkikiven ja saven

yhdistelmää. Tästä yhdisteestä käytetään nimitystä klinkkeri (Al-Neshawy, n.d.). Lopullinen sementti saadaan jauhamalla yhdiste jauheeksi yhdessä kalsiumsulfaatin eli kipsin kanssa. Portlandsementin keskimääräinen kemiallinen koostumus esitetty taulukossa 1.

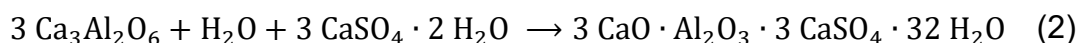
TAULUKKO 1. Portlandsementin keskimääräinen kemiallinen koostumus (Penn State, 2019, muokattu)

Yhdiste	Kemiallinen kaava	m-%
Trikalsiumaluminaatti	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	10
Tetrakalsiumaluminaattiferriitti	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	8
Dikalsiumsilikaatti (beliitti)	Ca_2SiO_5	20
Trikalsiumsilikaatti (aliitti)	Ca_3SiO_5	55
Natriumoksidi	Na_2O	0-2
Kaliumoksidi	K_2O	0-2
Kalsiumsulfaatti	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	5

Sementin reaktiota veden kanssa kutsutaan hydrataatioksi. Hydrataation ensimmäisessä vaiheessa, ensimmäisen muutaman minuutin aikana portlandsementin sisältämän aliitin reagoi vedessä veden kanssa se muodostaa sementtirakeiden pinnalle C-S-H-geelin, joka hidastaa sementin jatkuvaa hydrataatiota estämällä veden pääsyn kosketukseen reagoimattoman sementin kanssa. (Hewlett & Liska, 2019)



Beliitti reagoi veden kanssa samalla tavalla kuin aliitti, mutta beliitin reaktio on huomattavasti hitaampaa, ja reaktiossa syntyy vähemmän kalsiumhydroksidia. (Anderberg & Wadso, 2007) Myös sementin sisältämä trikaliumaluminaatti liukenee, ja kipsin läsnä ollessa reaktiossa muodostuu geelimäistä ettringiittiä, joka C-S-H-geelin tavoin tarttuu sementtipartikkelien pinnalle. (Rolo, 2013)



Hydrataation alkuvaiheen ja C-S-H-geelin muodostumisen jälkeen reaktio siirtyy induktiovaiheeseen, jonka aikana reaktion nopeus hidastuu ja sementtiä voi valaa ja muovata. Tämän vaiheen kestoa voidaan muokata orgaanisilla tai epäorgaanisilla lisäaineilla. Induktiovaiheen kesto määrittää sementtituotteen avoimen ajan. (Mohamed & Antia, 1998)

Induktiovaiheen jälkeen hydrataatio siirtyy kiihdytysvaiheeseen, jossa aliitin reaktionopeus alkaa taas kasvaa ja syntyy kuitumaista C-S-H-yhdistettä, joka tarttuu betonin runkoaineeseen. Lisäksi reaktiossa syntyy kalsiumhydroksidia, joka esiintyy kiteinä yhdisteessä. Aliitin lisäksi myös portlandsementin sisältämä beliitti alkaa reagoida veden kanssa. Betonin jähmettyminen tapahtuu, kun kalsiumhydroksidi ja C-S-H-kuidut muodostavat keskenään verkkomaisia tukirakenteita. Tukirakenteiden muodostuessa betoniin alkaa myös kehittyä lujuutta. Kiihdytysvaiheessa myös geelimäinen ettringiitti muuttuu kiinteiksi, neulamaisiksi partikkeleiksi, joka osaltaan edistää betonin lujuuden kehitystä. (Rolo, 2013)

Kiihdytysvaiheen jälkeen hydrataation kulku hidastuu reagoimattoman aineen vähentyessä. Sekä aliitti että beliitti jatkavat reagoimistaan muodostaen C-S-H-kuituja. Beliitin osuus reaktiosta kasvaa ajan myötä, jolloin myös kalsiumhydroksidin muodostuminen vähenee. Aikaisessa hydrataation vaiheessa muodostunut ettringiitti alkaa reagoimaan aliitin kanssa, muodostaen kalsiumalumiinaattimonosulfaattia. (Hewlett & Liska, 2019) Betonin lujuuden kehittyminen jatkuu niin kauan kuin aineessa tapahtuu hydrataatiota (Rolo, 2013).

Alumiinaattisementiksi kutsutaan sementtiä, jonka alumiinaattioksidi- eli Al_2O_3 -sisältö on vähintään 35 % sementin massasta. Alumiinaattisementillä on portlandsementtiin verraten huomattavasti nopeampi kovettumisaika, jonka lisäksi korkean alumiinaattipitoisuuden omaavat sementit ovat kestävämpiä sulfaatteja sekä hankausta vastaan. Sen mekaaninen kestävyys ei kuitenkaan ole yhtä suuri kuin portlandsementin. Alumiinaattisementti kykenee hydrataatioon myös matalilla lämpötiloilla, ja kestää toistuvaa lämmitystä korkeisiin lämpötiloihin menettämättä toimivuuttaan. (Plank, 2017)

Aluminaattisementtiklinkkeriä valmistetaan yhdistämällä kalkkia ja korkean alumiinipitoisuuden omaavaa ainetta, kuten bauksiittia, ja sintraamalla niitä kierto-uunissa. Yhdisteistä syntyy pääosin kahta sementtifaasia, kalsiummonoalumiinaattia CaAl_2O_4 sekä kalsiumdialumiinaattia CaAl_4O_7 . (Stinnessen, Buhr, Kockegey-Lorenz & Racher, n.d) Nämä yhdisteet vastaavat aluminaattisementin hydrataatiossa alkuvaiheen lujuuden kehityksestä. (AZOM, 2002)

Lattiatasoiteissa voidaan käyttää myös sementtien sekoitusta. Yhdistettäessä portland- ja aluminaattisementtiä yhdisteen sitoutumisreaktio nopeutuu huomattavasti, jolloin yhdisteen avoin aika jää lyhyeksi. Tämän estämiseksi yhdisteeseen täytyy lisätä hidastinainetta. Yhdisteen mekaaninen kestävyys on myös matalampi kuin kummankaan sen komponentin. (Plank, 2017)

2.1.2 Lisäaineet

Hidastinaineet nimensä mukaisesti hidastavat sementin jähmettymistä, joka kasvattaa tasoitteen avointa aikaa (Anderberg & Watso, 2007). Hidastintyyppistä riippuen hidastin voi vaikuttaa tasoitteessa eri tavoilla. Adsorptionhidastimet muodostavat sementtipartikkelien päälle suojaavan kerroksen, joka hidastaa vesimolekyylien pääsyä sementtiin (Levy, 2012). Nukleatioon vaikuttavat hidastimet adsorboituvat hydrataatiossa sementistä vapautuviin kalsiumhydroksidi-ioneihin, ja estävät näiden kiteytymisen ennen jonkintasoista ylikyllästymistä. (Rahman, n.d.) Kompleksointihidastimet luovat komplekseja sementtipartikkeleista hydrataation yhteydessä vapautuvien Ca^{2+} -ionien kanssa, muodostaen sementtipartikkelien ympärille suojaavan kerroksen estämään hydrataatiota. Saostushidastimet reagoivat yhden tai useamman sementtikomponentin kanssa ja muodostavat partikkelien pinnalle saostuman, joka estää veden reagoinnin sementtipartikkelien kanssa. (Myrdal, 2007)

Hidastinaineet voidaan jakaa orgaanisiin ja epäorgaanisiin hidastimiin (Rahman, n.d.). Orgaanisia hidastimia ovat erilaiset lignosulfonaatit, sokerit, hydrokarboksyylihapot ja niiden suolat sekä fosfonaatit. Fosfonaatit voidaan lukea myös epäorgaanisiksi hidastimiksi. Muita epäorgaanisia hidastimia ovat erilaiset boraaatit sekä mm. lyijyn, sinkin ja kuparin suolat. (Myrdal, 2007) Hidastimilla on omat

toiminta-alueensa lämpötilan ja kosteuden suhteen, joten hidastimien yhdistely tasoitteissa on yleinen käytäntö. (Bensted, 1998)

Kiihdyttimiä käytetään nopeuttamaan joko tasoitteen jähmettymistä tai sen lujuuden kehitystä. Yleisimmin tasoitteessa käytetään lujuuden kehittymistä nopeuttavaa kiihdytintä yhdessä jähmettymistä hidastavan hidastimen kanssa. Näin saadaan tasoite, jolla on riittävän pitkä työaika, mutta joka lujittuu nopeasti jähmettymisen alkaessa. (Anderberg & Watso, 2007)

Kiihdyttimet voidaan jakaa kahteen pääryhmään, liukeneviin orgaanisiin suoloihin ja liukeneviin epäorgaanisiin suoloihin ja yhdisteisiin. Liukenevat orgaaniset suolat ovat alkali- ja maa-alkalimetallien suoloja, kuten muun muassa hydroksideja, klorideja, nitraatteja, karbonaatteja sekä sulfaatteja. Suolojen yhteydessä olevilla anioneilla ja kationeilla on myös merkitystä kiihdyttimen tehokkuuteen. Anionit ja kationit nopeuttavat sementin hydrataatiota tehokkuusjärjestyksessä

Anionit: $\text{Br}^- \approx \text{Cl}^- > \text{SCN}^- > \text{I}^- > \text{NO}_3^- > \text{ClO}_4^-$

Kationit: $\text{Ca}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Li}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ \approx \text{Cs}^+ > \text{Rb}^+$

Epäorgaanisia suoloja ja yhdisteitä ovat karboksyylihapot ja niiden suolat sekä alkanoliamiinit. Näistä alkanoliamiineja käytetään useimmin ainoastaan kiihdytinsekoitteiden ainesosana ja hyvin harvoin ainoana kiihdyttimenä yhdisteessä. (Myrdal, 2007)

Kiihdytinsuolojen ionit reagoivat eri tavalla aluminaattisementissä kuin portlandisementissä. Aluminaattisementillä tehokkaat kiihdyttimet ovat kationeista litium- ja natriumionit, ja anioneista hydroksidi-ionit. Litiumionien tehokkuus perustuu litiumaluminaattihydraatin saostumiseen, joka toimii substraattina nukleatioreaktiossa. Näiden yhdisteiden kemiallisia reaktioita ei tunneta vielä kovin tarkasti. (Myrdal, 2007)

Koska tasoitteissa käytetään usein sekä portland- että aluminaattisementtiä, hidastin ja kiihdytinmekanismit suunnitellaan niin, että molempien sementtien avoin aika on tarvittavan pitkä, eikä lujuuden kehittyminen hidastu liiaksi. Tämä voidaan

saavuttaa lisäämällä tasoitteeseen vain aluminaattisementtiin vaikuttavaa kiihdytintä ja lähinnä portlandsementin jähmettymiseen vaikuttavaa hidastinta. (Plank, 2017)

Notkistimia käytetään parantamaan tasoitteen leviävyyttä. Ilman notkistimen läsnäoloa portlandsementin partikkelit saattavat flokkuloitua, jolloin sementtiin syntyy nestelukkoja, ja vesi ei pääse nesteyttämään kaikkia sementin partikkeleja. Kun sementtiseokseen lisätään notkistinta, se absorboituu sementtipartikkelien pinnalle, ja estää niiden flokkuloitumisen keskenään. Näin kaikki sementtiin lisätty vesi on käytössä, jolloin sementtiin lisättyä vesimäärää voidaan pienentää ilman leviävyyden menetystä. Kun tasoitteen vesimäärä pienenee, saadaan tiheämpää ja vahvempaa tuotetta. (Flatt, Houst, Bowen, Oesch, Hofmann, Sulser, Maeder & Burge, 1998)

Paksuntajat ovat lisäaineita, jotka muokkaavat tasoitteen viskositeettia vaikuttamatta tasoitteen muihin ominaisuuksiin. Paksuntajat myös stabiloivat tasoitetta nostoen sen viskositeettia, jolloin tasoitteen sisältämät partikkelit pysyvät helpommin suspensiossa veden lisäyksen jälkeen. Tämä vähentää tasoitteen erotumista. (Boukendakdji, Debieb, Kadri & Benramoul, 2016)

Dispersiopulverit parantavat tasoitteen taivutuslujuutta sekä tarttuvuutta alustaan. Lisäksi ne parantavat työstettävyyttä ja vähentävät läpäisevyyttä esimerkiksi vesihöyryn osalta. (Kulesza, Debski & Fangrat, 2018) Vaahdonestoaineet taas vähentävät ilman määrää tasoitteessa horjuttamalla ilman ja veden rajapintaa saaden ilmakuplat lopulta rikkoutumaan ja poistumaan tuotteesta. Vaahdonestoaineita käytetään usein paksuntajien käytön yhteydessä, sillä paksuntajien aiheuttaman viskositeetin nousun myötä ilmakuplat eivät pääse poistumaan tuotteesta yhtä helposti. (Evonik, 2019)

2.2 Lattiatasoitteiden vaatimukset

Tasoitemassoille ja lattiatasoitteille määritetään vaatimukset ja testattavat ominaisuudet standardissa SFS-EN 13813 (2002). Pakolliset testattavat ominaisuudet määritetään tasoitteen sideaineen mukaan. Pakolliset ja vapaaehtoiset testit eri tasoitteille esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Tasoitteiden määritettävät ominaisuudet (SFS-EN 13813 2002)

Sideaine	Puristuslujuus	Taivutusvetolujuus	Böhmén kulutuskestävyys	BCA-kulutuskestävyys	Pyörivän tuolin pyörän kestävyys	Pinnan kovuus	Tunkeumakovuus	Pyörivän tuolin pyörän kestävyys, kun tasoite on päällystetty lattiapäällysteellä	Sitoutumisaika	Kutistuma ja paisuma	Leviämä	pH-arvo	Kimmoerotin	Iskunkestävyys	Tartuntalujuus
Sementti	X	X	X ^a (Yksi kolmesta)			O	-	O	O	O	O	O	O	O	O
Kalsiumsulfaatti	X	X	O	O	O	O	-	O	O	O	O	X ^a	O	-	O
Magnesiitti	X	X	O	O	O	X ^a	-	O	-	O	O	O	O	-	O
Asfalttimastiksi	-	-	O	O	O	-	X	O	-	-	-	-	-	-	-
Synteettinen hartsi	O	O	-	X (Yksi kahdesta)		O	-	O	-	O	O	-	O	X ^a	X
Selitykset															
X = Velvoittava															
O = Valinnainen tarvittaessa															
- = Ei ole tarpeen															
^a = Vain tasoitteelle, joka on tarkoitettu kulutuspinnaksi															

Kuten taulukossa 2 esitetään, lattiatasoitteelle, jonka sideaineena toimii sementti, on pakollisena määrätty suoritettavaksi vain puristus- ja taivutusvetolujuustes-

taukset. Nämä testaukset suoritetaan standardin SFS-EN 13892-2 (2003) mukaisesti, ja testauksen tulokset määräävät tasoitteelle luokkaluokituksen ominaisuuksien mukaan. Tasoiteprismat testataan 28 vuorokauden ikäisenä.

Tasoitteiden puristuslujuutta merkitään kirjaimella *C*, ja sen yksikkö on N/mm² eli MPa. Taivutusvetolujuutta merkitään kirjaimella *F* ja myös sen yksikkö on N/mm² eli MPa. (SFS-EN 13813 2002) Tasoitteiden puristus- ja taivutusvetolujuusluokat esitetty taulukoissa 3 ja 4.

TAULUKKO 3. Tasoitteiden puristuslujuusluokat. (SFS-EN 13813 2002)

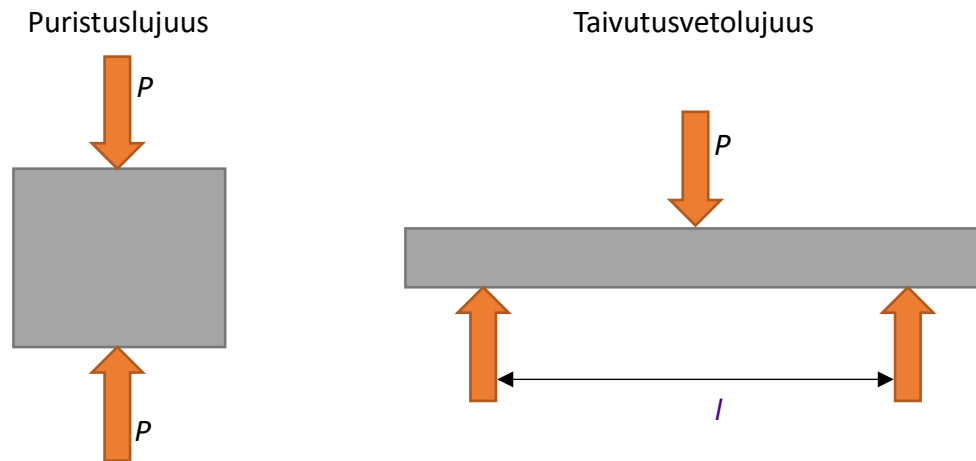
Luokka	C5	C7	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C50	C60	C70	C80
Puristuslujuus (MPa)	5	7	12	16	20	25	30	35	40	50	60	70	80

TAULUKKO 4. Tasoitteiden taivutusvetolujuusluokat (SFS-EN 13813 2002)

Luokka	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F10	F15	F20	F30	F40	F50
Taivutusvetolujuus (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	10	15	20	30	40	50

Puristus- ja taivutusvetoluokat C5 ja F1 muodostavat tasoitteille kynnyksarvot, jotka tuotteen on ylitettävä. Uudelle tuotteelle suoritetaan alkutestaus, jossa osoitetaan tuote standardin mukaiseksi. Vasta kun tuote on osoitettu standardin mukaiseksi, voidaan sitä tarjota myytäväksi. Alkutestaus on suoritettava uudestaan, mikäli tuotteen valmistusprosessissa tai raaka-aineissa tapahtuu jokin muutos. (SFS-EN 13813 2002)

SFS-EN 13813 -standardi (2002) myös määrää tuotteen laadunvarmistuksen sekä tuotantoprosessista että valmiista tuotteesta EN ISO 9001 -standardin (2015) mukaisesti. Puristus- ja taivutusvetolujuuksien testiasetelmat esitetty kuviossa 1.



KUVIO 1. Lujuuksien testiasetelmat

Lujuus on yksi tasoitteiden tärkeimmistä ominaisuuksista. Se kertoo, kuinka suurelle mekaaniselle rasitteelle tasoitteen voi altistaa ennen sen tuhoutumista. Lattiatasoitteissa puristuslujuus on huomattavasti tärkeämpi kuin taivutusvetolujuus, sillä käytössä ollessaan tasoite altistuu huomattavasti enemmän puristavalle kuin taivuttavalle voimalle. Puristus- ja taivutusvetolujuudet voidaan määrittää kaavoilla

$$C = \frac{P}{A}, \quad (3)$$

$$F = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (4)$$

jossa C on kappaleen puristuslujuus, P on suurin kappaleelle kohdistettu voima ennen sen tuhoutumista ja A on kyseiselle voimalle altistettu pinta-ala. Taivutusvetolujuuden F määrittävässä kaavassa l on tukipisteiden välinen etäisyys, b on näytepalan leveys ja h on näytepalan korkeus. (Zhang, 2011)

3 ULTRAÄÄNIMITTAUS

Ultraäänimittaus pohjautuu materiaalien värähtelyyn. Kaikki materiaali koostuu atomeista, jotka voidaan pakottaa värähtelyliikkeeseen omasta tasapainoasemastaan. Värähtelyliikkeitä on montaa eri lajia, mutta ultraäänimittaus hyödyntää vain osaa näistä. (Taylor, 2015)

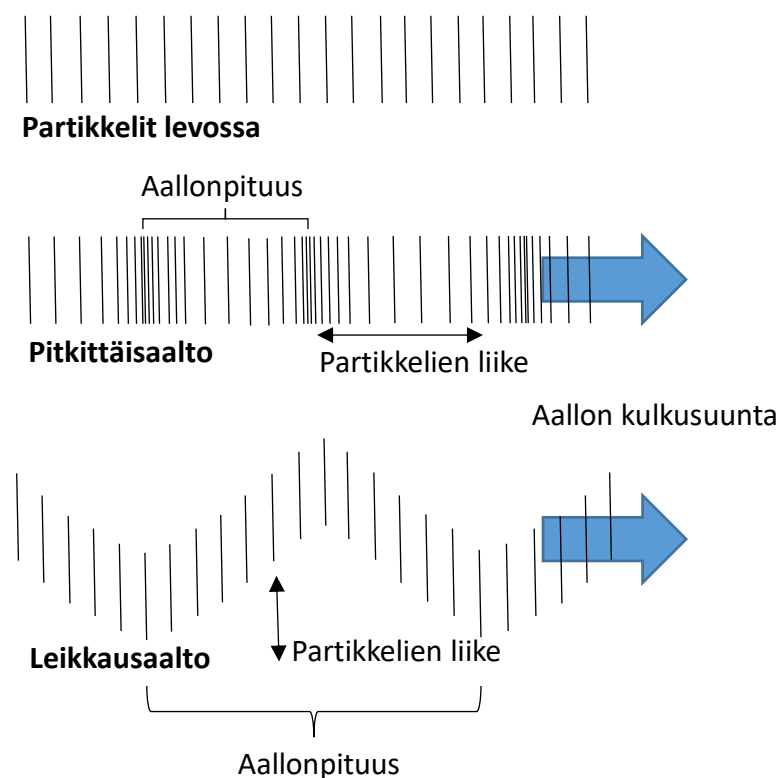
Kun kappale ei ole liiallisen mekaanisen rasituksen kohteena, sen partikkelit värähtelevät elastisesti. Kun partikkelit pakotetaan tässä tilanteessa pois omasta tasapainoasemastaan, kappaleen sisäiset, partikkelien välissä olevat elastiset palautusvoimat yhdessä partikkelien inertian kanssa johtavat väliaineen värähtelyyn. (Hijazi, n.d.)

3.1 Ääniaallot

Ääniaallot voivat liikkua kiinteässä aineessa neljällä eri aaltomuodolla. Aaltomuodot erotellaan toisistaan partikkelien värähtelyliikkeiden muodon mukaan. Näitä ovat pitkittäisaalto, leikkausaalto, pinta-aalto ja Lamb-aalto. Ultraäänimittauksessa käytetään pääosin pitkittäisaaltoa ja leikkausaaltoa (Taylor, 2015). Näiden aaltomuotojen partikkelivärähtelykaaviot esitetty kuviossa 2.

Pitkittäisaallossa partikkelien värähtely tapahtuu aallon kulkusuuntaan. Tämä tarkoittaa partikkelien puristumista ja laajentumista ääniaaltojen mukana, jonka vuoksi pitkittäisaaltoja voidaan kutsua myös paineaalloiksi. Lisäksi materiaalin tiheys vaihtelee paikoittain paineaaltojen kulun myötä, jonka vuoksi pitkittäisaaltoja kutsutaan myös tiheysaalloiksi. Pitkittäisaaltoja esiintyy niin nesteissä, kaasuissa kuin kiinteissäkin aineissa. (Gan, 2012)

Leikkausaallossa partikkelit liikkuvat poikittaissuuntaan aallon etenemissuuntaan nähden. Ne vaativat akustisesti kiinteän aineen kunnolliseen etenemiseen, joten nesteessä ja kaasussa niiden eteneminen on pitkittäisaaltoihin verrattuna heikkoa. (Desjardins & Sahney, 2012)



KUVIO 2. Ultraäänimittauksessa mitattavat ääniaallot

Ääniaaltojen nopeus on suoraan verrannollinen aaltojen frekvenssiin sekä aallonpituuteen. Frekvenssin ja aallonpituuden avulla nopeus V voidaan laskea kaavalla

$$V = f \cdot \lambda, \quad (5)$$

jossa f on frekvenssi ja λ on aallonpituus. Joissakin väliaineissa ääniaaltojen kulunopeus on vakio, jolloin se on aineen ominaisuus. Tällaisissa tilanteissa frekvenssin nousu johtaa aallonpituuden laskuun, ja päinvastoin. (Inkinen, Manninen & Tuohi, 2012)

Erilaiset materiaalit kuljettavat ääniaaltoja eri tavoin. Vaihtelut johtuvat atomipartikkelien erilaisista massoista, jotka vaikuttavat materiaalin tiheyteen, ja eri materiaalien erilaisista jousivakioista. Kiinteän aineen äänennopeuden V ja sen tiheyden ja jousivakion suhde esitetään kaavalla

$$V = \sqrt{\frac{C_{pl}}{\rho}}, \quad (6)$$

jossa C_{pl} on jousivakio, ja ρ on kappaleen tiheys. Yhtälössä täytyy ottaa huomioon, että materiaaleilla on erilaiset jousivakiot eri aaltomuodoille. Yhtälössä ρ osoittaa jousivakion suunnan ja aaltomuodon, eli onko kyseessä pitkittäis- vai leikkausaalto. Pitkittäisaalloille voidaan laskea nopeus V_P myös yhtälöstä

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (7)$$

jossa E on Youngin moduuli, ρ on tiheys, ja ν on Poissonin suhde. Youngin moduuli ja Poissonin suhde ovat materiaalista riippuvia muuttujia. (Rolo, 2013) Youngin moduuli kertoo kappaleen kohtaaman rasituksen suhteen sen pituusyksikön muutokseen puristuksessa (Desjanrdins & Sahney, 2012.) Poissonin suhde taas tarkoittaa suhdetta aineen pitkittäisen lyhentymisen ja poikittaisen leventymän välillä, kun ainetta puristetaan pitkittäissuunnassa (Prakash, 2017). Sementtituotteille Poissonin suhteen oletetaan olevan noin 0,2 (UltraTest GmbH, 2018).

Leikkausaalloille voidaan laskea nopeus V_L yhtälöllä

$$V_L = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (8)$$

jossa ρ on tiheys ja G on leikkausmoduuli. Leikkausmoduuli kertoo aineelle ominaisen suhteen kappaleeseen kohdistuvat poikittaissuuntaisen voiman ja kappaleen esittämän voiman suuntaisen rasituksen välillä (Desjanrdins & Sahney, 2012). Leikkausmoduuli lasketaan kaavalla

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (9)$$

jossa E on Youngin moduuli, ja ν on Poissonin suhde. (Pessiki & Carino, 1987)

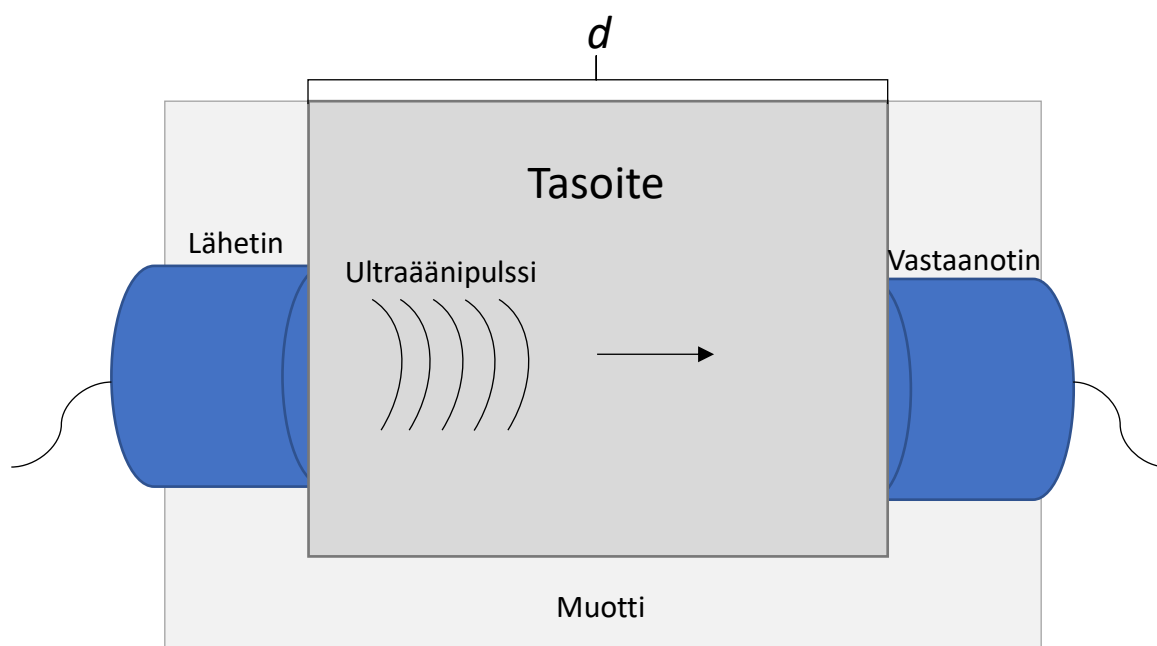
Mikäli ultraääniaallon kulkema matka on tiedossa, voidaan äänennopeus laskea yksinkertaisesti kaavalla

$$V = \frac{d}{t} \quad (10)$$

jossa d on aallon kulkema matka, ja t on matkassa kulunut aika. (Pessiki & Carino, 1987)

3.2 UPV-mittaus

Tasoitteiden jähmettymistä voidaan seurata UPV- eli ultraäänipulssin nopeusmittauksella. UPV-mittauksessa laite lähettää ultraäänipulssin tasoitteen läpi tunnetun välimatkan päässä olevaan vastaanottimeen. Laite mittaa pulssin lähettimestä vastaanottimeen kulkuun kuluneen ajan, ja laskee pulssin nopeuden käyttäen kaavaa (10). Tasoitteen kovettuessa sen Youngin moduuli kasvaa, joka johtaa myös ultraäänipulssin nopeuden kasvuun. (Yoo, Shin, Yoon, 2016) Kun mittauksia tehdään useampia ja tarpeeksi tiheästi, voidaan tasoitteesta muodostaa kovettumiskäyrä kuvaamaan ääniaaltopulssin kulkunopeutta ajan funktiona. UPV- mittausjärjestely esitetty kuviossa 3.



KUVIO 3. UPV- mittausjärjestely

4 MITTAUS- JA MÄÄRITYSMENETELMÄT

Tasoitteen kovettumiskäyttäytymistä ja lujuuden kehitystä tutkittiin muodostamalla näyte-eriä kolmella eri hidastinmekanismilla. Tämän jälkeen tutkittiin näiden hidastinmekanismien käyttäytymistä ja käyttäytymisen eroja, kun jokaisen mekanismin reseptissä suoritettiin sama, yhden raaka-aineen muutos. Näin saatiin myös tietoa vaihdetun raaka-aineen vaikutuksesta tasoitteen käyttäytymiseen. Tuloksia verrattiin kyseisellä hidastinmekanismilla toimivaan pohjatuotteeseen.

4.1 Näytteiden muodostus

Näyte-erien pohjatuotteena toimi uudistettu lattiatasoite, josta käytettiin työssä nimeä Versio 1. Tästä versiosta tehtiin myös eri hidastinmekanismeilla toimivat versiot 2 ja 3. Nämä kolme versiota toimivat muiden raaka-ainemuutosten pohjatuotteina. Raaka-ainemuutosten lisäksi tuotetta verrattiin sen vanhempaan, tuotannossa olleeseen versioon, josta käytettiin nimitystä referenssi. Referenssin sekä versioiden 1, 2 ja 3 raaka-ainekoostumukset esitetty taulukossa 5. Referenssiin sekoitettu vesimäärä oli 22 % tasoitejauheen massasta. Muilla versioilla vesimäärä oli 22,5 %. Näyte-erien valmistuksessa käytettiin vain tietyn raaka-aine-erän tuotteita, jotta raaka-aine-erien välisten laatuerojen vaikutukset tuloksiin saatiin eliminoitua.

TAULUKKO 5. Referenssin ja eri hidastinmekanismien vertailunäytteiden raaka-ainekoostumukset massaprosentteina tasoitteen kokonaismassasta.

Raaka-aine	Referenssi	Versio 1	Versio 2	Versio 3
Täyteaine	20-30	20-30	20-30	20-30
Hiekka	40-55	40-55	40-55	40-55
Portlandsementti	5-15	5-15	5-15	5-15
Aluminaattisementti	5-15	5-15	5-15	5-15
Kipsi	2-8	2-8	2-8	2-8
Stabilointiaine	0,01-0,5	0,01-0,5	0,01-0,5	0,01-0,5
Kiihdytin	0,01-0,5	0,01-0,5	0,01-0,5	0,01-0,5
Hidastin 1.			0,12	
Hidastin 2.	0,07	0,08		0,12
Hidastin 3.		0,05		
Notkistin	0,01-0,5	0,01-0,5	0,01-0,5	0,01-0,5
Vaahdonestoaine	0,01-0,5	0,01-0,5	0,01-0,5	0,01-0,5
Dispersiopulveri	0,5-5	0,5-5	0,5-5	0,5-5
Vesi	22,0	22,5	22,5	22,5

Raaka-ainemuutokset tehtiin kaikkiin kolmeen pohjaversioon, vaihtaen yhtä raaka-ainetta kerrallaan. Mikäli tasoitteeseen lisättiin jotakin raaka-ainetta, korvattiin uudella raaka-aineella osa täyteaineesta. Raaka-ainemuutokset esitetty taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Raaka-aineiden muutokset versioittain massaprosentteina tasoitteen kokonaismassasta.

Versiot	Poistettu raaka-aine	Lisätty raaka-aine	m-%
4-6	Portlandsementti 1	Portlandsementti 2	5-15
7-9	Aluminaattisementti 1	Aluminaattisementti 2	5-15
10-12	Dispersiopulveri 1	Dispersiopulveri 2	0,5-5
13-15	Täyteaine 1	Lisäaine 1	0,7
16-18	Täyteaine 1	Täyteaine 2	2
19-21	Täyteaine 1	Täyteaine 2	5
22-24	Notkistin 1	Notkistin 2	0,01-0,5
25-27	Täyteaine 1	Lisäaine 2	0,15

Jokaista tasoitteen versiota valmistettiin neljä kilogrammaa, joista kolme kului näyteprismojen valmistukseen ja yksi kilogramma ultraäänimittaukseen.

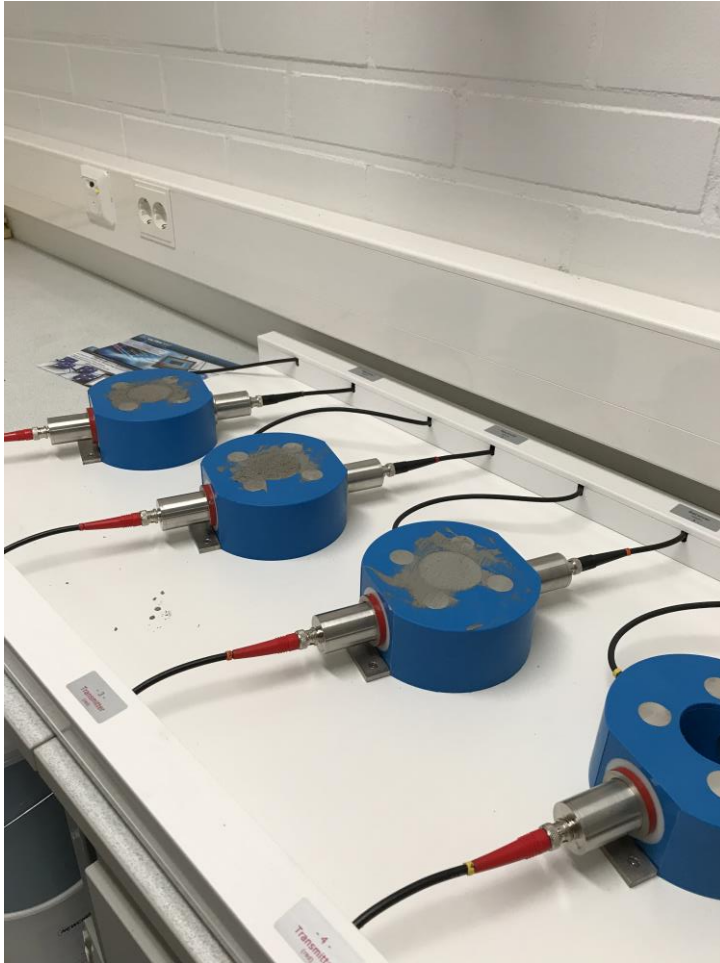
4.2 Kovettumiskäyrän määrittäminen

Tasointäytteistä ajettiin 24:n tunnin jähmettymiskäyrä UltraTest IP-8 -laitteella. 300 g tasoitejauhetta sekoitettiin 500 ml astiassa sille tarkoitettuun vesimäärään Heidolph RZR 2102 -sekoittimella, kunnes saatiin tasainen massa. Tämän jälkeen massan annettiin tasoittua kaksi minuuttia, jonka jälkeen massaa sekoitettiin vielä 15 sekunnin ajan. Sekoittamisen jälkeen massa valettiin UltraTest-laitteen silikonimuottiin, ja sen pinta tasattiin spaattelilla. Mittauksen laiteparametrit esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. UltraTest-parametrit

Mittausaika	24 h
Mittausintervalli	10 s
Herkkyystaso	5
Jännite	600 V
Anturietäisyys	40 mm

UltraTest IP-8 on nelikanavainen ultraäänimittauslaitteisto, joka mittaa yhdisteiden jähmettymiskäyttäytymistä UPV-menetelmällä. Mittaustilanne esitetty kuvassa 1.



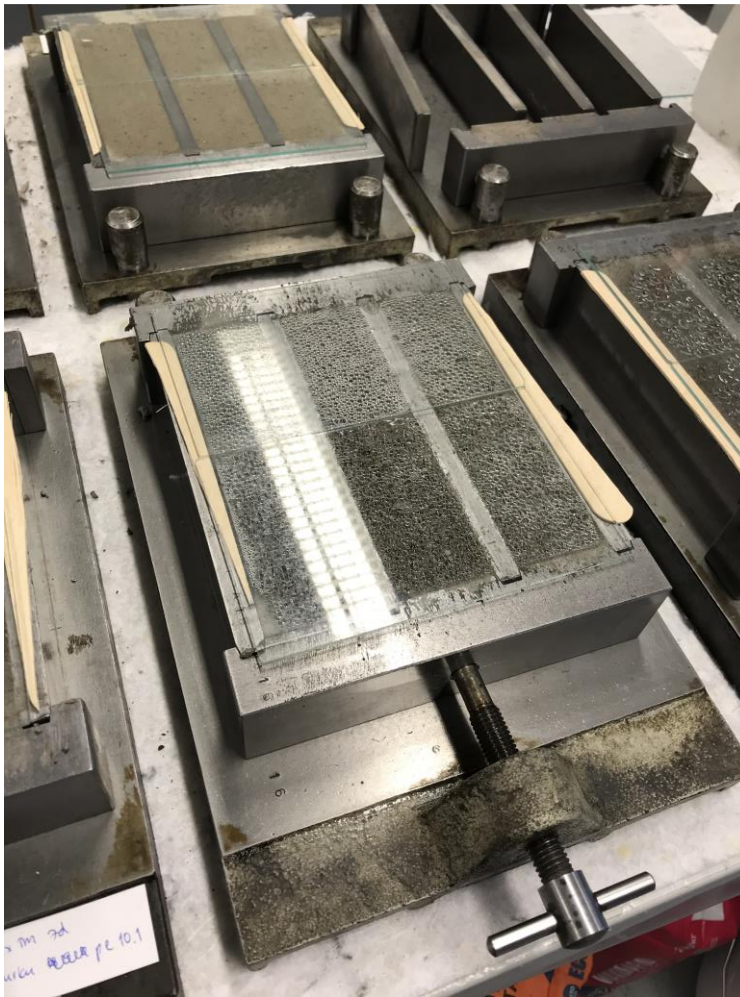
KUVA 1. UltraTest-mittaus

Mittaus on mahdollista suorittaa pulssin nopeuden mittauksen lisäksi sen kulkuajan mukaan, joka laskee näytteen jähmettyessä. Laite mittaa myös näytteen lämpötilaa, jonka käyrästä voidaan havaita esimerkiksi aliitin lämpöä tuottavan hydrataation ajankohta. UltraTest-laitteella on mahdollista suorittaa mittauksia, jotka kestävät 15 minuutista 365 päivään saakka. Mittausintervalli, eli mittaustapahtumien välinen aika on mahdollista säätää 10 sekunnista 60 minuuttiin. (UltraTest GmbH, 2018)

4.3 Lujuudenkehityksen määrittäminen

Lujuudenkehityksen seuraamiseksi tasoitenäytteistä muodostettiin testausprismat kahtena rinnakkaisena kappaleena standardin SFS-EN 13892-1 (2003) mukaisesti. 1-3 kg tasoitejauhetta lisättiin tarvittuun vesimäärään ja sekoitettiin Hobart-sekoittajalla, kunnes massasta tuli tasainen. Tämän jälkeen sekoitus pysäytettiin, ja astian reunoille noussut tasoite kaavittiin massan sekaan. Sekoitusta jatkettiin vielä 45 sekuntia, jonka jälkeen massan annettiin seistä noin kaksi minuuttia valmistajan ohjeen mukaisesti. Lopuksi massaa sekoitettiin vielä 30 sekuntia.

Tasoitemassa valettiin 160 mm x 40 mm x 40 mm kokoiseen teräksiseen prisma-muottiin, ja sen pinta tasattiin valun jälkeen lastalla. Valetun muotin päälle asetettiin lasi suojaamaan tasoitetta liialliselta kosteuden haihtumiselta. Prismoja valmistettiin kahtena rinnakkaisena kappaleena kolmella eri kovettumisajalla, jotka olivat 2½ h, 5 h ja 24 h. Referenssinä toiminut tasoite on määritelty kävelynkestäväksi viiden tunnin kuivumisen jälkeen, ja pinnoituskuivaksi 10 mm kerrospaksuudella 24 tunnin jälkeen valusta. Näiden kuivumisaikojen tuloksia vertailtiin prosentuaalisesti pohjatuotteiden tuloksiin. Prismat kovettumassa muotissa esitetty kuvassa 2. Kovettumisen jälkeen prismoista mitattiin taivutus- ja puristuslujuudet SFS-EN 13892-2 (2003) -standardin mukaisesti.



KUVA 2. Valetut prismat muotissa

Taivutus- ja puristuslujuuden määrittäminen suoritettiin Form+Test MEGA 10-100-10 DM-1-S -laitteella. Kokonainen testiprisma taivutettiin keskeltä kahtia, jonka jälkeen prismen molemmat puoliskot puristettiin. Näin saatiin jokaisen version kunkin ikäisille prismoille kaksi taivutuslujuusarvoa ja neljä puristuslujuusarvoa. Lopullinen arvo oli saatujen tulosten keskiarvo. Taivutus- ja puristuslujuustestit kuvattu kuvissa 3 ja 4.



KUVA 3. Taivutuslujuuden määrittäminen

Taivutuslujuuden mittauksessa testiprismat asetettiin laitteeseen siten, että niiden prismamuotissa yläpintana ollut sivu osoitti laitteesta nähden vasemmalle. Näin varmistettiin, että sivut, joille asetettiin painetta, olivat täysin tasaisia.



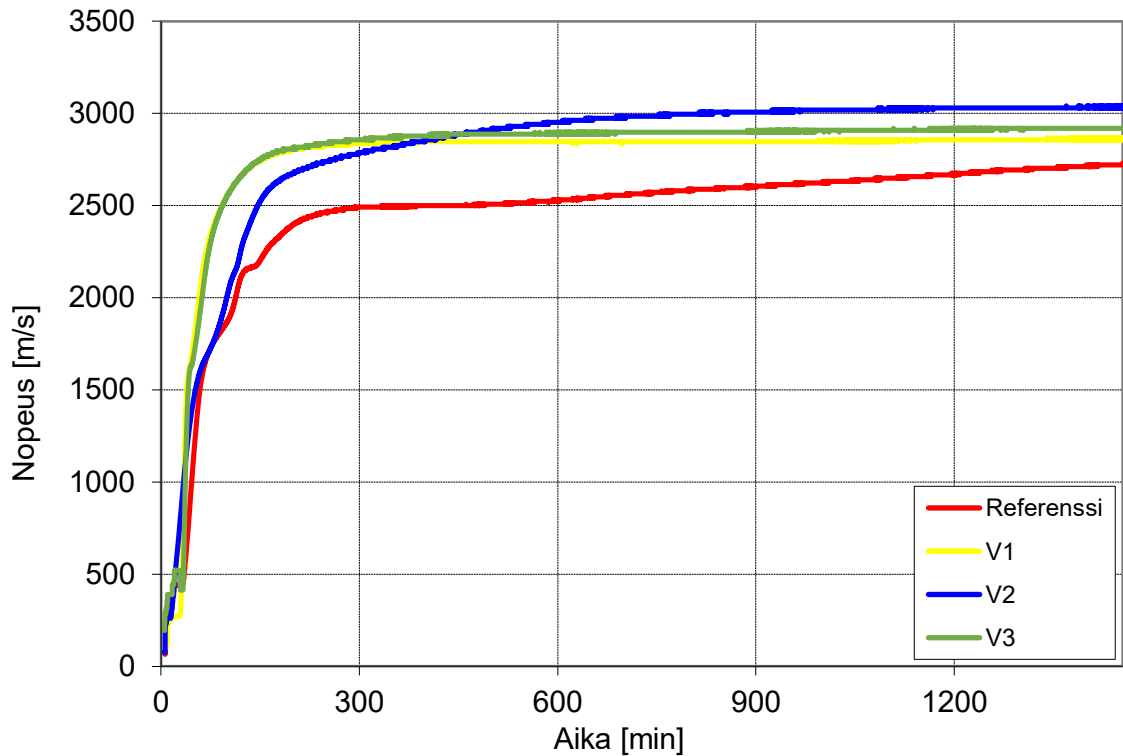
KUVA 4. Puristuslujuuden määrittäminen

Puristuslujuuden määrittämisessä testiprisman yläpinta asetettiin osoittamaan testaajaa kohti, jolloin yläpinnan mahdolliset epätasaisuudet eivät vaikuttaneet paineen tasaiseen jakautumiseen testattavalla 40 mm x 40 mm alueella.

5 TULOKSET

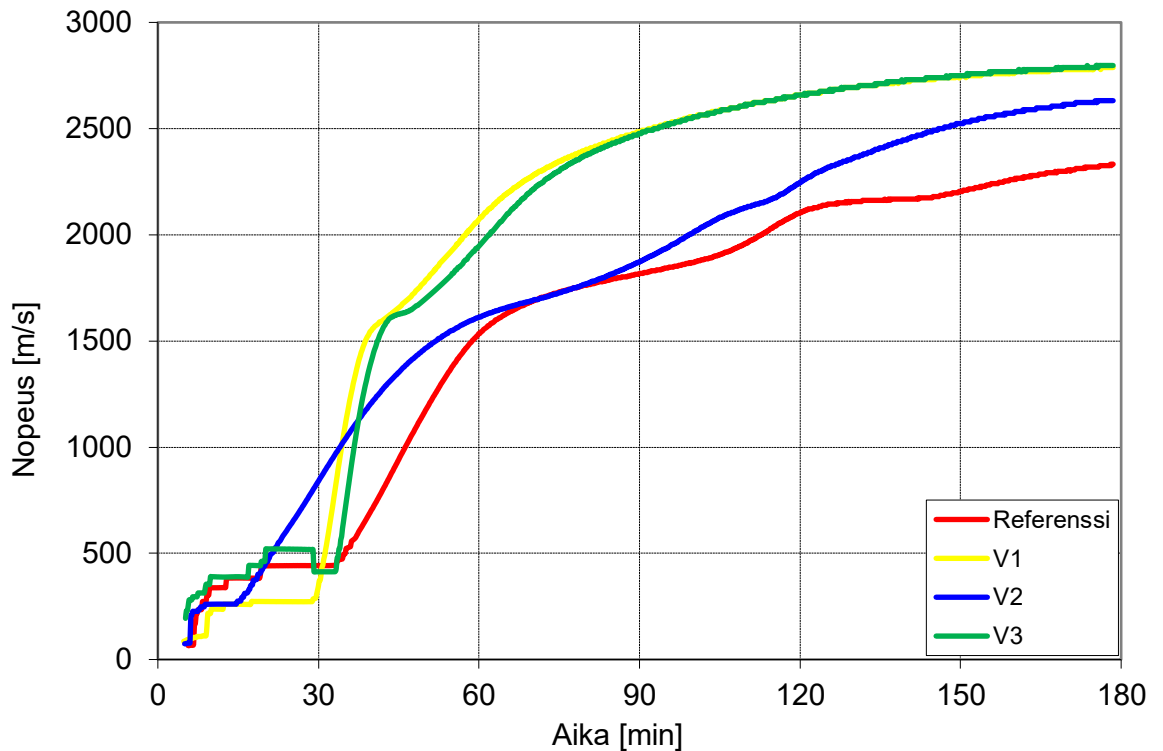
5.1 Kovettumiskäyrän määrittäminen

Kovettumiskäyrät määritettiin kaikille alkuversioille (jatkossa versioita merkitään kirjaimella V) sekä referenssituotteelle yhdessä, jotta hidastinmekanismien toiminnan erot havaittiin selkeästi. Raaka-ainemuutoksia verrataan hidastinmekanismeittain kahdessa erässä, runko- ja sideaineet toisessa ja lisäaineet toisessa kuvaajassa. Referenssin ja hidastinmekanismien 24 h kuvaajat esitetty kuviossa 4.



KUVIO 4. Referenssituotteen ja hidastinmekanismien kovettumiskäyrät 24h ajalta.

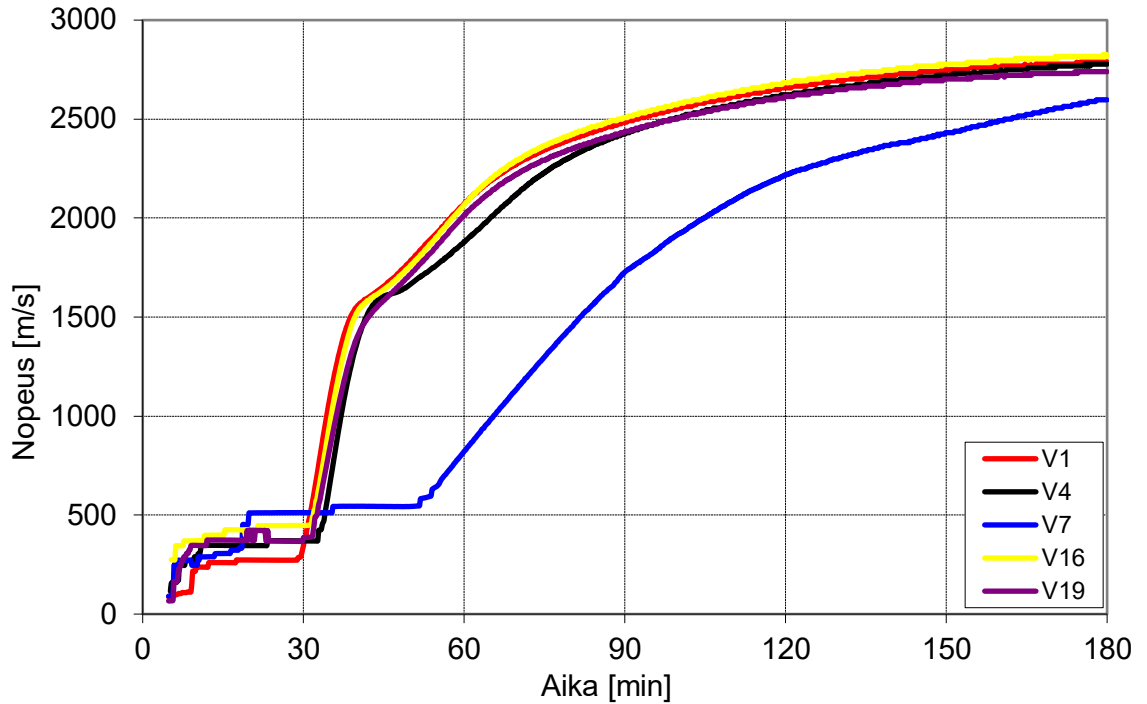
Induktiovaiheen lopun paremmaksi hahmottamiseksi luotiin myös kuvaajat, joiden aika-akselit päättyvät 180 minuutin kohdalla. Näin havaitaan helpommin sitoutumisen ajankohdan erot eri näytteiden välillä. Referenssin ja hidastinmekanismien 180 minuutin kovettumiskäyrät esitetty kuviossa 5. Näytteiden 24 h kuvaajat liitteessä 1.



KUVIO 5. Referenssitasoitteen ja hidastinmekanismien kovettumiskäyrät 180 minuutin ajalta.

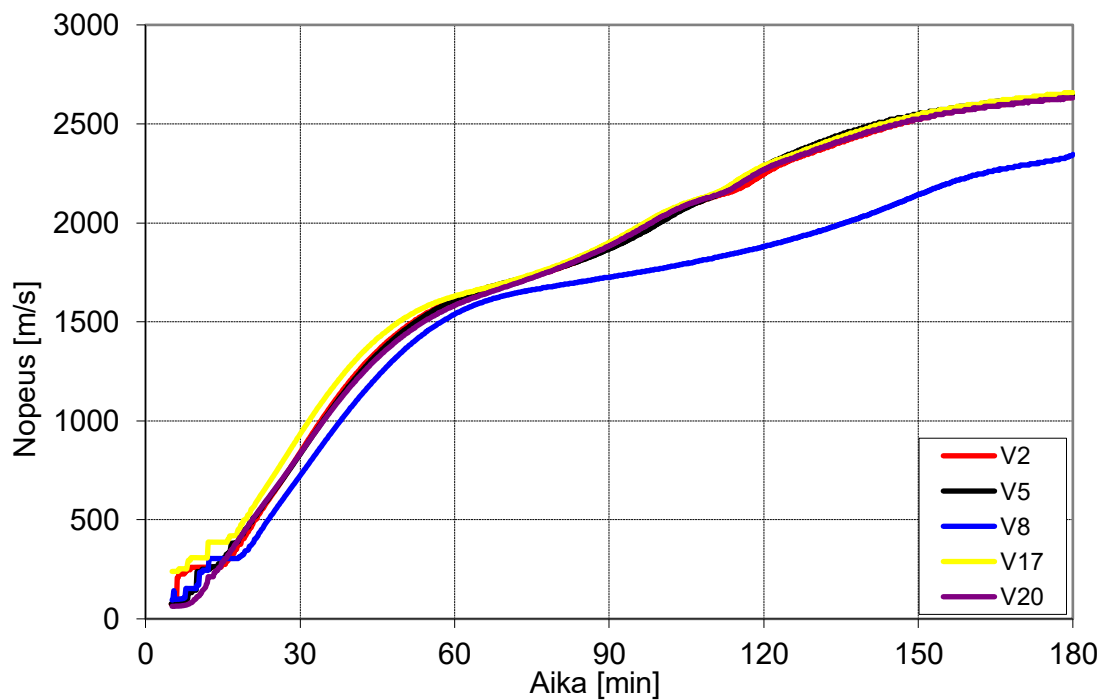
Kuviosta 5 havaitaan, että hidastinmekanismi 2:n kovettumiskäyrä alkaa nousta huomattavasti aikaisemmin kuin referenssin ja muiden hidastinmekanismien kovettumiskäyrät. Kovettumiskäyrän nousu vastaa induktiovaiheen päättymistä eli sementin sitoutumista, joka tapahtuu V2:lla jo noin 15 minuutin jälkeen, kun muilla näytteillä nousu tapahtuu vasta 30 minuutin jälkeen. V2:n sitoutuminen tapahtuu myös hitaammin kuin muilla mekanismeilla.

Runko- ja sideaineiden muutoksia verrattiin toisiinsa ja pohjaversioihin hidastinmekanismeittain. Runko- ja sideaineiden vertailujen kovettumiskäyrät esitetty kuvioissa 6, 7, 8.



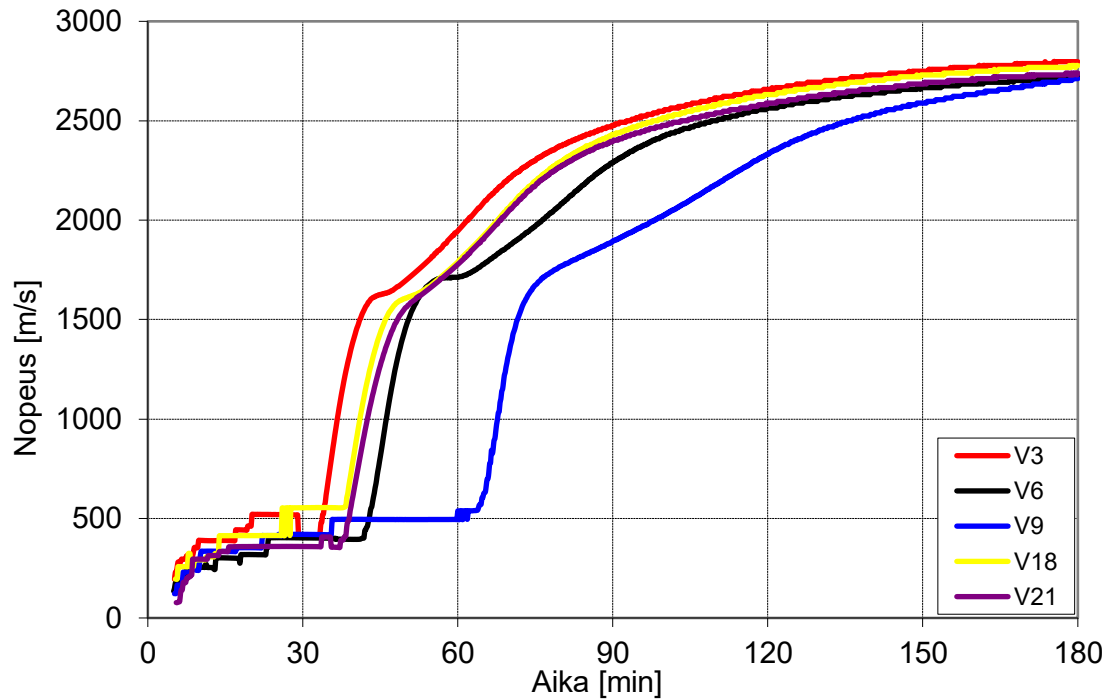
KUVIO 6. Hidastinmekanismi 1:n runko- ja sideainevertailu

Kuviosta 6 huomataan, että Versio 7:n sitoutuminen tapahtuu ja kovettuminen alkaa ja etenee huomattavasti hitaammin kuin muilla versiolla. Muut runko- ja sideainemuutokset eivät juurikaan vaikuta tasoitteen kovettumiskäyttäytymiseen.



KUVIO 7. Hidastinmekanismi 2:n runko- ja sideainevertailu

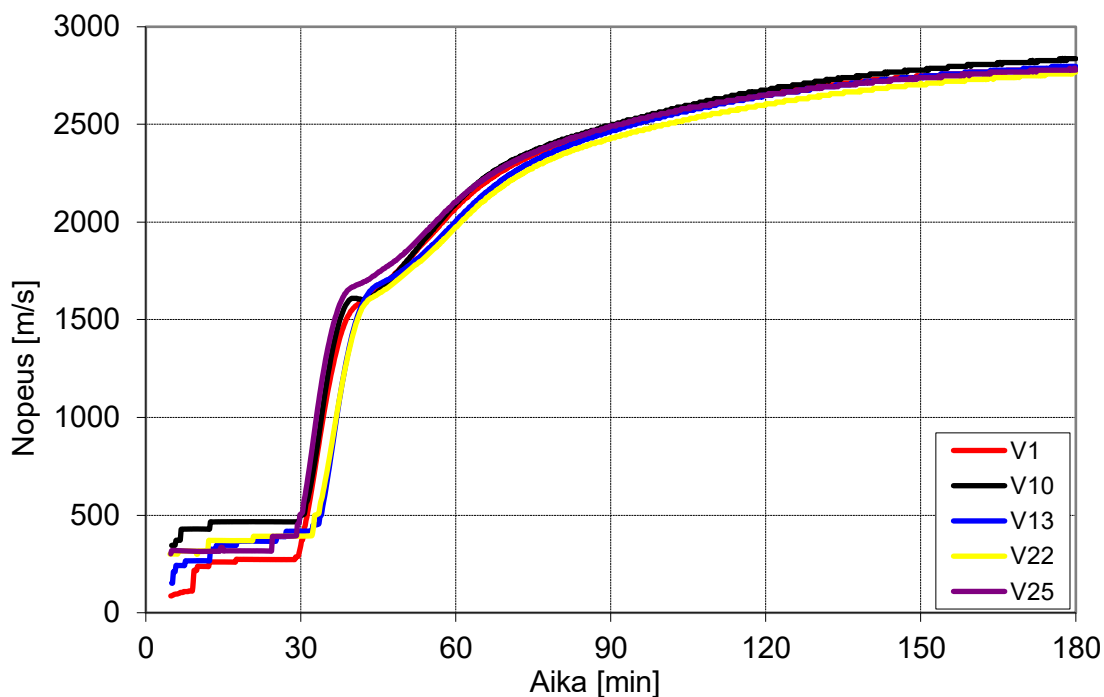
Kuvio 7 osoittaa version 8 olevan hitaampi kuin kuvaajan muut versiot. Ero muihin versioihin ei kuitenkaan ole yhtä suuri kuin versioiden 7 ja 9 nopeusero omiin pohjaversioihinsa, ja suurenee huomattavaksi vasta noin 70 minuutin kovettumisen jälkeen.



KUVIO 8. Hidastinmekanismi 3:n runko- ja sideainevertailu

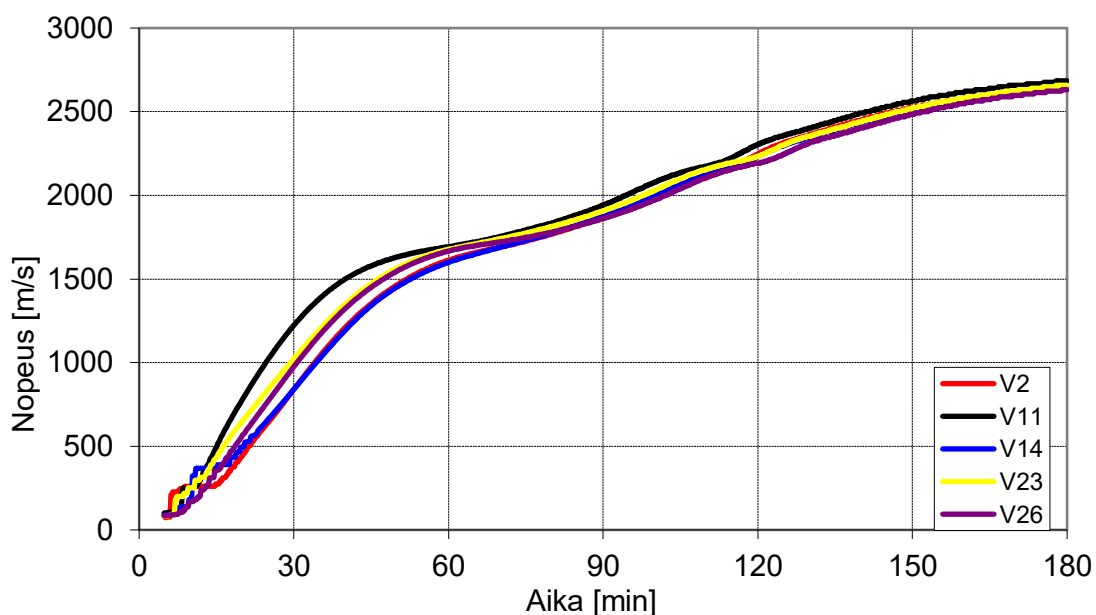
Kuviossa 8 havaitaan runko- ja sideaineiden vertailun suurimmat erot versioiden välillä. Versio 9 on selkeästi hitaampi kuin muut vertailun versiot. Kuitenkin myös muiden versioiden induktiovaiheen päätöspisteellä on jopa kymmenen minuutin eroja pohjaversioon V3 verrattuna.

Lisäaineiden muutosten vertailu suoritettiin samalla tavalla kuin runko- ja sideaineiden vertailu. Lisäaineiden vertailujen kovettumiskäyrät esitetty kuvioissa 9, 10 ja 11.



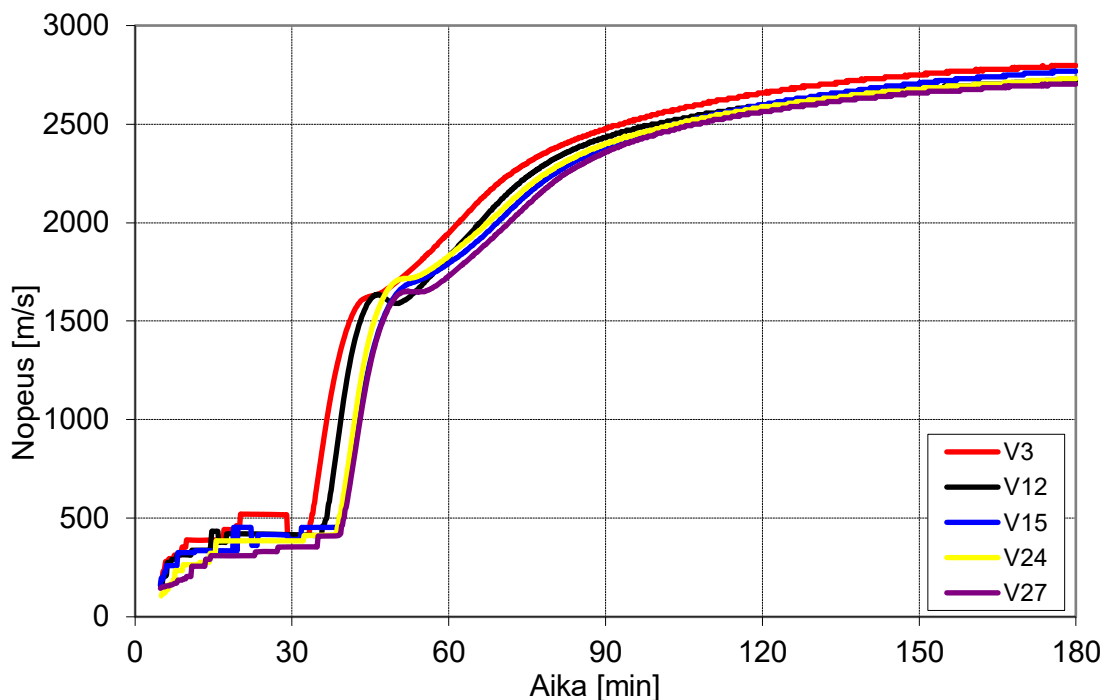
KUVIO 9. Hidastinmekanismi 1:n lisäainevertailu

Kuviosta 9 havaitaan, että hidastinmekanismilla 1 lisäaineiden vaihdoksella ei ollut tasoitteen kovettumiseen juurikaan merkitystä. Suurimmat erot kovettumiskäyrissä ovat tasoitteen induktiovaiheen aikaisessa äänennopeudessa, mutta tämän jälkeen käyrät tasoittuvat, ja seuraavat pohjaversio V1 kovettumiskäyttämistä.



KUVIO 10. Hidastinmekanismi 2:n lisäainevertailu

Kuvio 10 osoittaa, että Versio 11 suorittaa varhaisen jähmettymisensä hieman nopeammin kuin muut versiot. Tämän jälkeen kaikki käyrät kuitenkin tasaantuvat, ja seuraavat pohjatuotteensa jähmettymiskäyttäytymistä.



KUVIO 11. Hidastinmekanismi 3:n lisäainevertailu

Kuvioista 9, 10 ja 11 huomataan, että lisäaineiden muutoksilla ei ole huomattavaa vaikutusta tasoitteiden kovettumiskäyttäytymiseen. Suurimman erot kovettumiskäyrissä ovat hidastinmekanismi 3:n näytteillä, mutta tälläkin suurimmat erot induktiovaiheen päätöspisteillä ovat alle kymmenen minuuttia.

5.2 Taivutus- ja puristuslujuus

Näyteprismoista määritettiin taivutus- ja puristuslujuudet 2½, 5 ja 24 tuntia valun jälkeen. Sekä viiden että 24 tunnin taivutus- ja puristuslujuusarvoja vertailtiin prosentuaalisesti kyseisten hidastinmekanismien pohjaversioihin. Keskiarvoiset taivutuslujuudet hidastinmekanismeittain esitetty taulukossa 8 ja puristuslujuudet

esitetty taulukossa 9. Taulukoihin on merkitty myös referenssin mittauksista saadut tulokset, mutta niitä ei ole vertailtu raaka-ainemuutoksien pohjaversioihin V1, V2 ja V3. Mittauksien raakadata esitetty liitteessä 2.

TAULUKKO 8. Taivutusvetolujuuden tulokset

Versio	F 2,5 h (MPa)	F 5 h (MPa)	ΔF 5 h (%)	F 24 h (MPa)	ΔF 24 h (%)
Referenssi	1,36	2,08	-	3,01	-
Hidastinmekanismi 1					
V1	1,99	2,65	0	3,20	0
V4	1,77	2,49	-6,04	2,97	-7,19
V7	1,58	2,28	-13,96	3,09	-3,44
V10	2,09	2,68	1,13	3,42	6,87
V13	1,90	2,56	-3,40	3,20	0
V16	1,89	2,58	-2,64	3,29	2,81
V19	1,82	2,51	-5,28	3,25	1,56
V22	1,97	2,7	1,89	3,41	6,56
V25	1,9	2,43	-8,30	3,37	5,31
Hidastinmekanismi 2					
V2	2,78	3,65	0	4,54	0
V5	2,50	3,29	-9,86	4,13	-9,03
V8	1,55	3,07	-15,89	4,80	5,73
V11	2,75	3,68	0,82	4,93	8,59
V14	2,60	3,55	-2,74	4,58	0,88
V17	2,55	3,44	-5,75	4,56	0,44
V20	2,55	3,38	-7,40	4,62	1,76
V23	2,41	3,45	-5,48	4,55	0,22
V26	2,83	3,37	-7,67	4,65	2,42
Hidastinmekanismi 3					
V3	1,65	2,27	0	2,88	0
V6	1,60	2,16	-4,85	2,72	-5,56
V9	1,26	2,01	-11,45	3,03	5,21
V12	1,70	2,34	3,08	2,94	2,08
V15	1,55	2,30	1,32	2,85	-1,04
V18	1,64	2,33	2,64	2,97	3,13
V21	1,66	2,2	-3,08	3,07	6,60
V24	1,51	2,33	2,64	3,13	8,68
V27	1,56	2,25	-0,88	2,96	2,78

Pohjaversioita paremmat prosentuaaliset tulokset merkattu vihreällä ja heikommat tulokset punaisella värillä.

TAULUKKO 9. Puristuslujuuden tulokset

Versio	C 2,5 h (MPa)	C 5 h (MPa)	Δ C 5 h (%)	C 24 h (MPa)	Δ C 24 h (%)
Referenssi	4,25	7,06	-	11,32	-
Hidastinmekanismi 1					
V1	7,21	10,11	0	12,77	0
V4	6,07	8,82	-12,76	11,58	-9,32
V7	5,85	8,91	-11,87	12,63	-1,10
V10	7,53	10,33	2,18	13,49	5,64
V13	6,66	9,33	-7,72	12,24	-4,15
V16	6,81	9,53	-5,74	12,54	-1,80
V19	6,74	9,37	-7,32	12,39	-2,98
V22	7,12	10,04	-0,69	12,93	1,25
V25	6,73	9,57	-5,34	12,85	0,63
Hidastinmekanismi 2					
V2	7,50	10,55	0	14,29	0
V5	6,79	10,10	-4,27	13,79	-3,50
V8	4,17	9,52	-9,76	14,49	1,40
V11	8,00	10,98	4,08	14,96	4,69
V14	6,81	10,18	-3,51	14,00	-2,03
V17	7,07	10,31	-2,27	14,10	-1,33
V20	7,08	9,91	-6,07	14,18	-0,77
V23	7,14	10,41	-1,33	14,23	-0,42
V26	7,12	10,21	-3,22	14,33	0,28
Hidastinmekanismi 3					
V3	5,92	8,54	0	11,55	0
V6	5,63	7,88	-7,73	10,47	-9,35
V9	4,47	7,83	-8,31	11,90	3,03
V12	6,12	8,98	5,15	11,94	3,38
V15	5,38	8,26	-3,28	11,23	-2,77
V18	5,94	8,64	1,17	11,61	0,52
V21	5,88	8,33	-2,46	11,70	1,30
V24	5,76	8,65	1,29	11,78	1,99
V27	5,67	8,25	-3,40	11,51	-0,35

Versio 1 oli jo valmiiksi optimoitu tasoitteen versio, joten tärkeimpiä tuloksia taulukosta 9 ovat hidastinmekanismi 1:llä toimivien versioiden tulokset. Näistä huomataan, että versioilla 10, 22 ja 25 oli positiivisia muutoksia puristuslujuuteen.

5.3 Virhetarkastelu

Puristus- ja taivutusvetolujuusmittauksien virhetarkastelu suoritettiin tulosten keskihajonnan s avulla. Tulosten keskihajonta voidaan laskea kaavalla

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (11)$$

Keskihajonnan avulla voidaan laskea jokaiselle näytteelle ominainen absoluuttinen virhe kaavalla

$$\sigma = 2 \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

Mittauslaitteen tarkkuus oli taivutusvetolujuusmittauksissa 0,01 MPa ja puristuslujuusmittauksissa 0,001 MPa. Näin saadaan versio 1:n 2½ h puristuslujuustulokselle (taulukko 9 ja liite 2, taulukko 11) mittausepävarmuudeksi

$$\begin{aligned} s &= \sqrt{\frac{(7,15 \text{ MPa} - 7,21 \text{ MPa})^2 \dots + (7,22 \text{ MPa} - 7,21 \text{ MPa})^2}{4}} \\ &= 0,050249 \text{ MPa} \\ \sigma &= 2 \cdot \frac{0,050249 \text{ MPa}}{\sqrt{4}} \\ &= 0,050249 \text{ MPa} + 0,001 \text{ MPa} \\ &= 0,051249 \text{ MPa} \\ &\approx 0,06 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

Eri tasoiteversioiden taivutus- ja puristuslujuustulokset mittausepävarmuuksineen liitteessä 3.

6 TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA

Hidastinmekanismien ja pohjatuotteen keskinäisessä vertailussa kuviossa 5 havaittiin, että uudistettujen versioiden sitoutumiskäyttäytyminen hidastinmekanismeilla 1 ja 3 oli toivotumpaa kuin referenssinä toimineen tuotteen. Referenssinä käytetyn tasoitteen työajaksi oli määritetty noin 30 minuuttia. Hidastinmekanismi 2:lla toimivan tuoteversion induktioaika jäi huomattavasti lyhyemmäksi kuin muiden versioiden, ja induktiovaiheen jälkeinen kovettuminen tapahtui hitaammin kuin muilla tuoteversioilla. Induktiovaiheen lyhyt kesto tarkoittaa käytännössä tasoitteen työajan lyhenemistä, joka tekee tasoitteesta haastavan käyttää. Kuvioista 7 ja 10 havaitaan, että mikään raaka-ainemuutos ei muuttanut hidastinmekanismi 2:n sitoutumistoimintaa, joten kyseisellä hidastinmekanismilla toimivat versiot ovat kaikki liian nopeita käytettäväksi.

Hidastinmekanismien 1 ja 3 sitoutumiskäyttäytyminen oli toivotun kaltaista. Versioiden induktiovaiheen kesto oli noin 30-40 minuuttia, joka on riittävä lattiatasoitteelle. Myös induktiovaiheen jälkeinen kovettuminen tapahtui molemmilla tasoteversioilla nopeasti, joka on tasoitteen kannalta optimaalista. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että valun jälkeen tasoitteen käyttäjällä on aikaa korjata mahdollisia valuvirheitä, mutta työajan päättymisen jälkeen tasoite sitoutuu ja kovettuu nopeasti, jolloin tasoitteen pinta ei enää muutu mahdollisista pienistä häiriöistä, kuten pintaan kohdistuvista kevyistä iskuista.

Runko- ja sideaineiden muutokset tasoitteiden sitoutumiskäyttäytymiseen nähdään kuvioista 6, 7 ja 8. Kuviossa 6 hidastinmekanismilla 1 toimivan tasoitteen versioiden sitoutumisen alku tapahtuu noin 30-35 minuutin kohdalla, lukuun ottamatta versiota 7. Versiossa 7 muutettiin tasoitteen sisältämää aluminaattisementtiä, jonka johdosta tasoitteen sitoutumisen alku myöhästyi, alkaen vasta noin 50 minuutin jälkeen valusta. Tämä työaika on kyseiselle pohjatuotteelle liian pitkä, joten aluminaattisementin muutos ei ole toimiva vaihtoehto tasoitteen parantamiselle. Muiden runko- ja sideaineiden muutoksilla ei ollut merkittävää vaikutusta tasoitteen sitoutumiskäyttäytymiseen.

Aluminaattisementin muutos hidasti myös hidastinmekanismi 3:lla toimivan tasoiteversion 9 sitoutumisen alkua jopa yli 60 minuuttiin, joten aluminaattisementin muutos ei ole myöskään tällä mekanismilla optimaalinen vaihtoehto. Hidastinmekanismeilla 2 aluminaattisementin hidastava vaikutus ei ollut yhtä suuri kuin muilla hidastinmekanismeilla, mutta tasoiteversion 8 työaika jäi hidastinmekanismin huonon toiminnan vuoksi noin 20 minuuttiin, joka on liian lyhyt kyseiselle tasoitteelle.

Lisäaineiden muutoksien vaikutukset tasoitteiden sitoutumiskäyttäytymiseen nähdään kuvioista 9, 10 ja 11. Hidastinmekanismi 1:n sitoutumiskäyttäytymiseen lisäaineilla ei ole merkittävää vaikutusta, joten kaikkien tasoiteversioiden työaika pysyy noin 30 minuutissa. Lisäaineilla ei ole myöskään vaikutusta hidastinmekanismi 2:lla toimiviin tasoiteversioihin, joiden työaika säilyy reilusti liian lyhyenä. Hidastinmekanismi 3:lla toimiviin tasoiteversioihin lisäaineilla on havaittavaa vaikutusta, etenkin versioissa 15, 24 ja 27. Lisäaine 1:n lisäys, notkistimen muutos sekä Lisäaine 2:n lisäys kasvattavat tasoitteen työaikaa hieman alle 40 minuuttiin, joka on vielä hyväksyttävä kyseiselle tuotteelle. Dispersiopulverin muutos versiossa 12 säilytti tasoitteen työajan ennallaan.

Taivutus- ja puristuslujuuksien vertailut hidastinmekanismeittain nähdään taulukoista 8 ja 9. Puristuslujuus on lattiatasoitteelle tärkeämpi ominaisuus kuin taivutuslujuus, sillä suurin osa tasoitteen kohtaamasta rasituksesta on puristusta. Tästä syystä tässä pohdinnassa käsitellään laajemmin vain puristuslujuuden tuloksia.

Kaikkien hidastinmekanismien pohjaversioiden tulokset ovat puristuslujuutta mittaessa suuremmat kuin referenssinä käytetyn tasoitteen. Tärkeimmät vertailukohdat puristuslujuudelle ovat pohjatuotteelle ilmoitetut kävelynkestävyysskynnys (5 h) ja päällystettävyysskynnys (24 h). Tasoitteiden raaka-ainemuutoksien tuloksia verrataan kunkin hidastinmekanismin pohjaversioon.

Side- ja runkoainemuutoksia tutkittaessa havaitaan, että Portlandsementin muutos aiheutti heikkenemistä kaikilla hidastinmekanismeilla. Aluminaattisementin muutos aiheutti myös heikkenemistä viiden tunnin vertailussa kaikilla hidastinmekanismeilla, mutta 24 tunnin vertailussa hidastinmekanismeilla 2 ja 3 todettiin

noin viiden prosentin parannusta pohjaversioon verrattuna. Aluminaattisementin muutos kuitenkin aiheutti merkittävää hidastumista tasoitteen sitoutumiskäyttämisyssä, joten kummankaan sideaineen raaka-ainevaihdon ei voida todeta olevan varteenotettava vaihtoehto tasoitteen parantamiselle.

Runkoaineen vaihdoksissa osa tasoitteen täyteaine 1:stä vaihdettiin täyteaine 2:een, joka kierrätysraaka-aineena on ympäristöystävällisempi vaihtoehto. Runkoaineen vaihdos heikensi tasoitetta hidastinmekanismeilla 1 ja 2, mutta hidastinmekanismilla 3 version 18 lujuus parani sekä viiden että 24 tunnin mittauksissa, ja version 21 lujuus parani 24 tunnin mittauksessa. Hidastinmekanismi 3:lla muutokset olivat alle 2,5 %, ja hidastinmekanismi 1:llä muutokset 24 tunnin mittauksessa olivat alle 3 %. Näin ollen tasoitteen lujuuden muutos raaka-ainemuutoksen tuloksena ei ole merkittävää, joka puoltaisi ympäristöystävällisemmän raaka-aineen käyttöönottoa. Täyteaine 2 on kuitenkin huomattavasti kalliimpaa kuin täyteaine 1. Tämän vuoksi runkoaineen vaihdoksesta saatava imagollinen hyöty ympäristöystävällisyydestä olisi todennäköisesti pienempi kuin tasoitteen valmistushinnan nousun aiheuttama taloudellinen tappio.

Versioissa 10, 11 ja 12 suoritettu dispersiopulverin vaihdos tuotti kaikilla hidastinmekanismeilla positiivisia tuloksia kummallakin aikakynnyksellä. Lujuuden kasvu vaihteli noin 2-6 % välillä ja oli suurimpia saatuja positiivisia tuloksia kaikista raaka-ainevaihdoista. Dispersiopulverin vaihto ei myöskään juurikaan vaikuttanut tasoitteen sitoutumiskäyttämiseen, joten kyseinen raaka-ainevaihdos aiheuttaisi saatujen tulosten mukaan tasoitteen paranemista.

Lisäaine 1:n lisäys tasoitteeseen pölyämättömyysominaisuuksien aikaansaamiseksi heikensi tasoitteen puristuslujuutta kaikilla hidastinmekanismeilla. Suurin muutos tasoitteen puristuslujuuteen saatiin hidastinmekanismilla 1, jossa viiden tunnin mittauksessa lisäaine 1:tä sisältävä tasoite oli lähes kahdeksan prosenttia pohjaversiota heikompa. Ero pieneni 24 tunnin mittauksessa noin neljään prosenttiin, ja muilla hidastinmekanismeilla ero pohjatuotteeseen oli 2-4 %. Referenssituotteen ei mainosteta olevan pölyämätöntä, joten kyseisen raaka-ainemuutos ei ole tarvittava. Mikäli tuotetta muutettaisiin pölyämättömäksi, voitaisiin lujuuden muutosta mahdollisesti korvata jollakin muulla raaka-ainevaihdoksella,

kuten aiemmin lujuuden näkökulmasta hyväksi todetulla dispersiopulverin muutoksella.

Notkistimen vaihdoksesta saatiin positiivisia tuloksia hidastinmekanismeilla 1 ja 3. Hidastinmekanismilla 1 tasoitteen lujuus oli viiden tunnin mittauksissa vain 0,69 % pienempi kuin pohjaversio, ja nousi 1,25 % suuremmaksi 24 tunnin mittausten kohdalla. Hidastinmekanismilla 3 tasoitteen lujuus oli 1,29 % ja 1,99 % suurempi kuin pohjaversiolla. Hidastinmekanismilla 2 tasoitteen lujuus laski noin prosentin verran. Kaikki lujuuserot pohjaversioihin verrattuna ovat pieniä, eikä notkistimella ollut juurikaan merkitystä myöskään tasoitteen sitoutumiskäyttäytymiseen. Näin ollen saatujen tulosten perusteella ei voida tehdä johtopäätöstä siitä, onko kyseinen raaka-ainevaihdos kannattava.

Lisäaine 2:n lisääminen tasoitteeseen tuotti hidastinmekanismilla 1 sekä positiivisia että negatiivisia tuloksia. Viiden tunnin mittauksessa tasoite oli jopa 5,34 % heikompaa kuin pohjaversio, mutta 24 tunnin mittauksessa se oli saavuttanut 0,63 % pohjaversiota suuremman lujuuden. Muilla hidastinmekanismeilla lujuuden kehitys oli joko negatiivista tai positiivinen vaikutus oli merkityksettömän pieni. Hidastinmekanismilla 1 lisäaine 2:n lisäys saattaisi olla kannattavaa, jos kävelykuivuuskynnyksen lujuuden menetystä kyettäisiin korvaamaan muilla raaka-aineilla.

Kun verrataan hidastinmekanismeja keskenään kokonaisuuksina, huomataan, että hidastinmekanismi 1 oli vaihtoehtoista paras. Hidastinmekanismien 1 ja 3 sitoutumiskäyttäytymiset olivat toivotun kaltaiset, kun taas hidastinmekanismien 2 sitoutuminen tapahtui aivan liian nopeasti ja sitoutumisen jälkeinen kovettuminen oli hidasta. Lujuustesteissä hidastinmekanismi 1:n tulokset olivat pienempiä kuin hidastinmekanismi 2:n, mutta selvästi suurempia kuin hidastinmekanismilla 3. Näin ollen ne raaka-ainevaihdokset, jotka olivat kannattavia hidastinmekanismilla 1, ovat parhaita kandidaatteja jatkotutkimuksia ajatellen. Näitä muutoksia olivat dispersiopulverin ja notkistimen vaihdokset sekä lisäaine 2:n lisäys tasoitteeseen. Nämä vaihdokset tuottivat positiivisia tuloksia myös taivutuslujuuksien osalta.

Tässä työssä tutkittiin tasoitteiden lujuuden kehittymistä vain ensimmäisen 24 tunnin aikana niiden valusta. Standardin SFS-EN 13892-2 (2003) mukaan tasoitteiden testiprismat tulisi testata 28 vuorokauden jälkeen valusta. Standardin SFS-EN 13813 (2012) määäämät taivutus- ja puristuslujuusluokat (taulukot 3 ja 4) määräytyvät myös 28 vuorokauden ikäisten testiprismojen mukaan. Näin ollen kaikki raaka-ainemuutokset tulisi myös testata 28 vuorokauden ikäisinä, jotta nähtäisiin kokonaiskuva raaka-ainemuutoksien vaikutuksista tasoitteiden lujuuteen. Tasoitteelle tehtyjä raaka-ainemuutoksia voitaisiin myös yhdistellä, jotta nähtäisiin, onko yhden raaka-ainemuutoksen aiheuttama lujuuden menetys mahdollista korvata toisella, lujuutta parantavalla muutoksella. Tämä olisi kiinnostavaa varsinkin täyteaine 2:n kohdalla, raaka-aineen tarjoaman ympäristöystävällisen vaihtoehdon vuoksi.

Puristuslujuuden ja työajan lisäksi tärkeitä ominaisuuksia tasoitteelle ovat kuivumisen yhteydessä tapahtuva kutistuma, tasoitteen tartuntalujuus sen alla olevaan pintaan sekä erilaiset työominaisuudet, kuten leviävyys. Notkistin on lisäaine, joka vaikuttaa huomattavasti tasoitteen leviävyyteen (Flatt ym. 1998), joten notkistimen vaihdoksen sisältäneessä tasoitteversiossa leviävyysominaisuuksien tarkistaminen on erityisen tärkeää. Sama periaate pätee myös tartuntalujuuteen dispersiopulverin vaihdoksen sisältäneessä tasoitteversiossa, sillä dispersiopulveri on tärkeä osatekijä tasoitteen tartuntalujuudessa (Kulesza ym. 2018) Tästä työstä saatujen tuloksien perusteella ei ole mahdollista päätellä, miten raaka-ainemuutokset vaikuttavat edellä lueteltuihin ominaisuuksiin, joten ominaisuudet on testattava ennen kuin on mahdollista päätellä raaka-ainemuutoksien kannattavuutta. Tasoitteiden tuotekehityksessä tärkeää on tuotteen ominaisuuksien balansointi, eli että kaikki tasoitteen tärkeät ominaisuudet ovat tasapainoisia, ja ylittävät niille asetetut vaatimukset.

Tasoitteiden testaus koostuu lähinnä punnitsemisesta ja sekoituksesta, joten laboratoriotöiden virhelähteet ovat yksinkertaisia. Mahdollisia virheitä työssä ovat voineet aiheuttaa punnitusvirheet tasoittekoee-erien koontivaiheessa, tasoitteen punnitsemisen virhe veteen sekoittaessa ja veden määrän punnitsemisvirhe sekoituksessa. Virhettä on myös voinut syntyä tasoitteen sekoitusvaiheessa, mikäli kaikkea tasoitetta ei olla saatu sekoitettua veteen. Lisäksi vaakojen kalibroinnin virhe on mahdollinen virhelähde. UPV-mittauksessa mahdolliset virhelähteet ovat

laitteen pohjataso asettamisen virhe tyhjän muotin mittaamisessa ja mahdolliset ilmakuplat valetussa tasoitteessa. Varsinaisesta äänennopeuden suuruudesta tasoitteessa ei kuitenkaan tehty johtopäätöksiä, joten näiden virhelähteiden vaikutukset jäivät pieniksi.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten raaka-ainemuutokset vaikuttavat lattiatasoitteen kovettumiseen ja lujuuden kehittymiseen ensimmäisen 24 tunnin aikana tasoitteen valusta. Kokonaisuutena opinnäytetyön tavoitteeseen päästiin. Opinnäytetyössä saatiin dataa ultraäänimittausten ja prismatestien avulla tasoitteiden ominaisuuksista eri raaka-ainekoostumuksilla, ja tästä datasta tehtiin johtopäätöksiä siitä, mitkä testatuista tasoiteversioista olivat hyviä ja huonoja raaka-ainekoostumuksia työn tavoitteita ajatellen. Lisäksi annettiin kehitysehdotuksia, miten opinnäytetyön jälkeisistä lähtökohdista voidaan jatkaa eteenpäin tuotteen kehityksessä.

LÄHTEET

Al-Neshawy, F. n.d. Lecture 6: Cement. PDF-tiedosto. Luettu 5.2.2020 https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/272892/course/section/60458/Lec06_Cement.pdf

Anderberg, A & Wadso, L. 2007. Moisture properties of self-leveling flooring compounds. Institute of technology. Lund University. Lisensiaattityö. Luettu 26.1.2020. <https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/4653015/1659446.pdf>

AZoM. 2012. The phases and structure of calcium aluminate cements (CACs). www-sivu. Luettu 5.2.2020. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1635>

Boukendakdji, O., Debieb, F., Kadri, E. & Benramoul, N. 2016. Effect of viscosity modifying admixtures on the workability and mechanical resistances of self compacting mortars. Journal of materials and environmental science 7 (2). https://www.researchgate.net/publication/298076248_Effect_of_viscosity_modifying_admixtures_on_the_workability_and_mechanical_resistances_of_self_compacting_mortars

Desjardins, G. S. & Sahney, R. 2012. Encyclopedic Dictionary of pipeline integrity. Houston: Clarion technical publishers.

Flatt, R. J., Houst, Y.F., Bowen, P., Oesch, R., Hofmann, H., Widmer, J., Sulser, U., Maeder, U. & Buerge, T.A. 1998. Analysis of superplasticizers used in concrete. Analusis magazine 26 (2). https://www.researchgate.net/publication/37409861_Analysis_of_Superplasticizers_used_in_Concrete

Goodship, V. 2010. Management, recycling and reuse of waste composites. Oxford: Woodhead publishing.

Hassanein, A., Shalaby, E., Amer, O., Ahmed, R., Orban, S., Fathy, A., Gharieb, Y., Abouzeid, M. & Fahmy, E. 2016. Self-Leveling Mortar: Why And How?. CSCE-konferenssiraportti. Luettu 26.1.2020. https://www.researchgate.net/publication/303887054_Self_Leveling_Mortar_Why_And_How

Hewlett, P. & Liska, M. 2019. Lea's chemistry of cement and concrete. 5. painos. Kidlington: Elsevier.

Inkinen, P., Manninen, R. & Tuohi, J. 2012. Momentti 2: Insinöörifysiikka. Helsinki: Otava.

Kulesza, M., Debski, D. & Fangrat, J. 2018. Effect of redispersible polymer powder on setting time of thin-bed mortars. MATEC web of conferences 163. 04005. https://www.researchgate.net/publication/325786020_Effect_of_redispersible_polymer_powder_on_setting_time_of_thin-bed_mortars

Levy, S.M. 2012. Construction calculations manual. Kidlington: Elsevier.

Mohamed, A. M. O. & Hogan, E. 1998. Geoenvironmental engineering. Amsterdam: Elsevier.

Myrdal, R. 2007. Accelerating admixtures for concrete. SINTEF Building and Infrastructure. Luettu 6.2.2020. https://www.researchgate.net/publication/288883755_Accelerating_admixtures_for_concrete

Myrdal, R. 2007. Retarding admixtures for concrete. SINTEF Building an Infrastructure. Luettu 6.2.2020. https://www.sintef.no/globalassets/sintef-byggforsk/coin/sintef-reports/sbf-bk-a07035_retarding-admixtures-for-concrete.pdf

Penn State University. Composition of Cement. Luettu 25.1.2020. <https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/construction/currenting/composition%20of%20cement.htm>

Pessiki, S.P. & Carino, N.J. 1987. Measurement of the setting time and strength of concrete by the impact-echo method. U.S. Department of commerce. Gaithesburg: National Bureau of standards. Luettu 6.2.2020. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-b35db2f42d0c23998a6da1c482ac9a68/pdf/GOVPUB-C13-b35db2f42d0c23998a6da1c482ac9a68.pdf>

Plank, Johann. 2017. Self-leveling flooring compounds based on ternary binder systems. Technische Universität München. CIMSA- Dry mix mortar seminar. Seminaariesitys. Luettu 25.1.2020 <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/71DDE-CEE521E470BA4ADA95A091840/8F12E5AB70764F83A47F19E06C3F3C28.pdf>

Prakash, A. 2017. Design of reinforced concrete. New Delhi: Scientific International.

Rahman, F.U. n.d. Retarders for concrete – mechanism, types and effects on properties. www-sivu. Luettu 5.2.2020. <https://theconstructor.org/concrete/concrete-retarders-mechanism-types/26633/>

Rolo, L. 2013. Monitoring of the cement hydration behavior and determination of non-standard laboratory indicators of setting time. University of Strathclyde. Maisterityö. Luettu 6.2.2020. https://www.researchgate.net/publication/265843578_Monitoring_of_the_Cement_Hydration_Behavior_and_Determination_of_Non-Standard_Laboratory_Indicators_of_Setting_Time

SFS-EN ISO 9001. 2015. Laadunhallintajärjestelmät. Vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 6.2.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi.libproxy.tuni.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/9/394310.html.stx>

SFS-EN 13813. 2012. Tasoitemassat ja lattiatasoitteet. Tasoitemassat. Ominaisuudet ja vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 6.2.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi.libproxy.tuni.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/7057.html.stx>

SFS-EN 13892-1:en. 2003. Methods of test for screed materials. Part 1: Sampling, making and curing specimens for test. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 6.2.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi.libproxy.tuni.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/7158.html.stx>

SFS-EN 13892-2:en. 2003. Methods of test for screed materials. Part 2: Determination of flexural and compressive strength. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 6.2.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi.lib-proxy.tuni.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/7159.html.stx>

Stinnessen, I., Buhr, A., Kockegey-Lorenz, R. & Racher, R. n.d. High purity calcium aluminate cements, production and properties. Alcoa world chemicals. Luettu 5.2.2020. https://almatis-umbraco.azurewebsites.net/media/3985/high_purity_calcium-aluminate-cements_production_and_properties.pdf

Taylor, P. & Wang, K. 2015. Comparison of setting time measured using ultrasonic wave propagation with saw-cutting times on pavements. National concrete pavement technology center. Luettu 6.2.2020. https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/PCC_setting_time_and_joint_sawing_w_cvr-1.pdf

UltraTest GmbH. 2018. IP-8 Ultrasonic measuring system for precise measurement of setting process. Luettu 13.2.2020. <https://www.ultratest.de/ip-8-measuring-system/?lang=en>

UltraTest GmbH. 2018. UltraTestlab V4.5 User manual. Käyttöohje. PDF-tiedosto. Luettu 31.1.2020.

Weber Saint-Gobain. 2019. Weber-opas. Luettu 11.2.2020. s.182-183. https://ejulkaisu.grano.fi/grano/weber_katalogi_2019#p=3

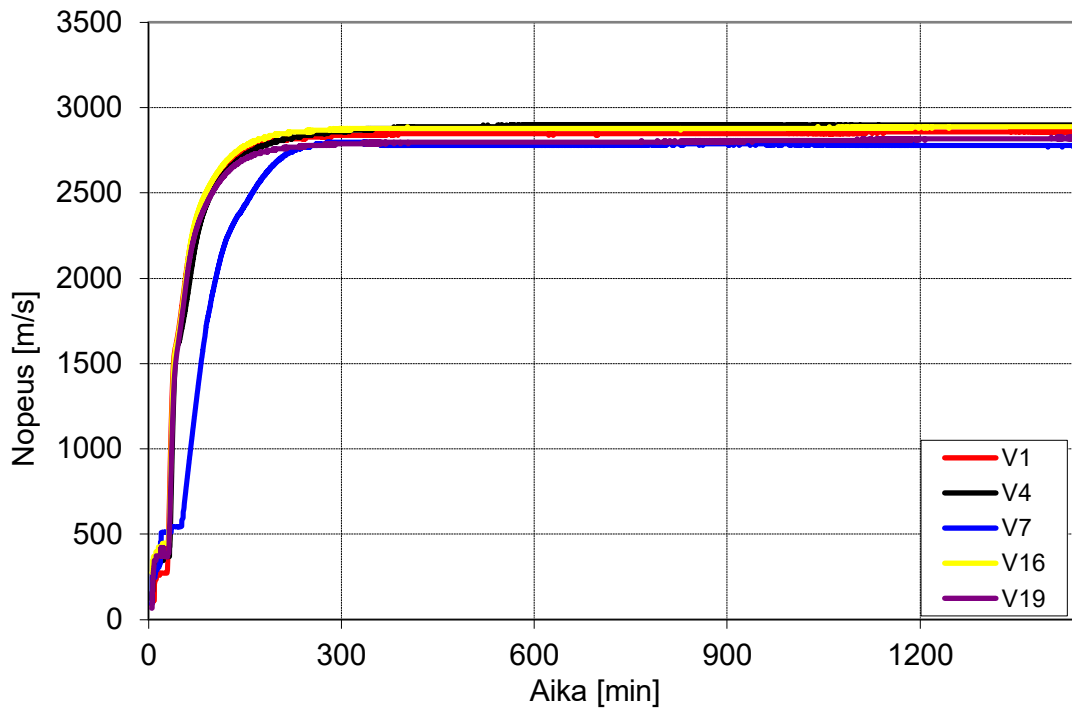
Yoo, D.-Y., Shin, H.-O. & Yoon, Y.-S. 2016. Ultrasonic monitoring of setting and strength development of ultra-high-performance concrete. Materials (Basel, Sveitsi) 9 (4). Luettu 3.2.2020. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5502987/>

Zhang, Haimei. 2011. Building materials in civil engineering. Cambridge: Woodhead publishing limited.

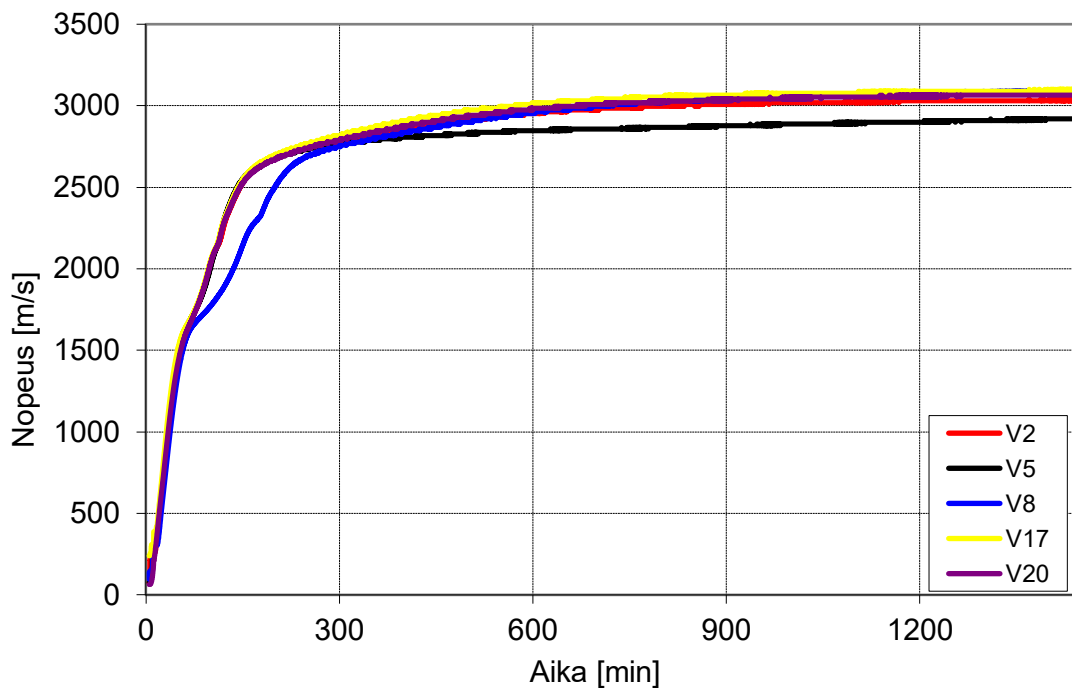
LIITTEET

Liite 1. UltraTest-24 h kovettumiskäyrät

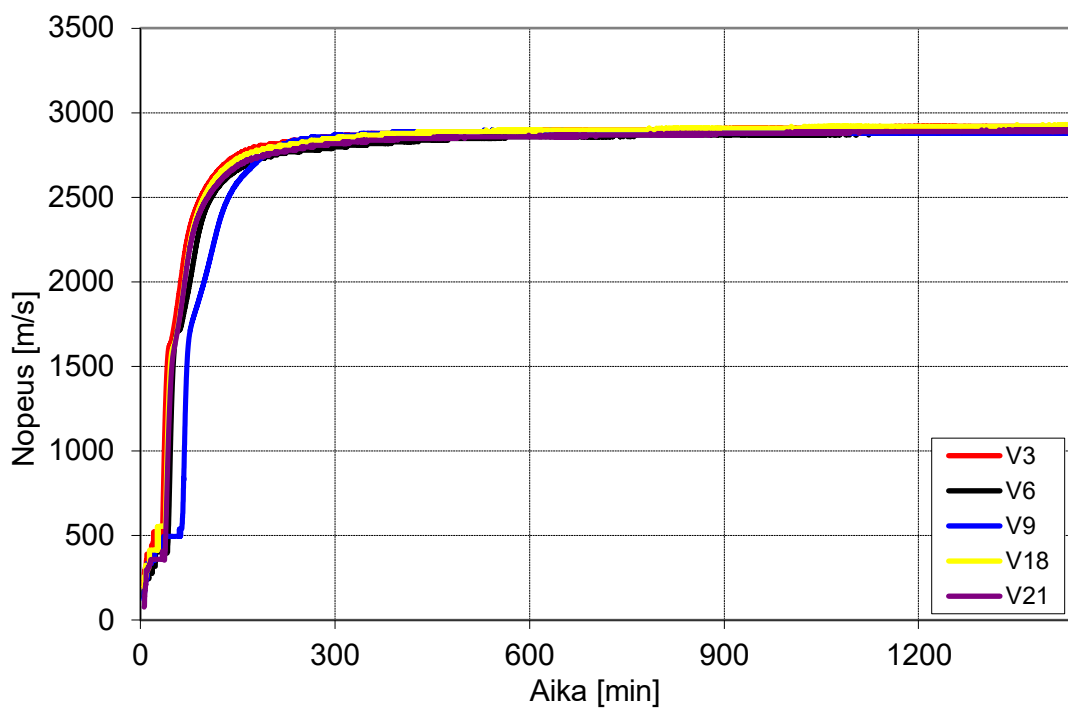
1(3)



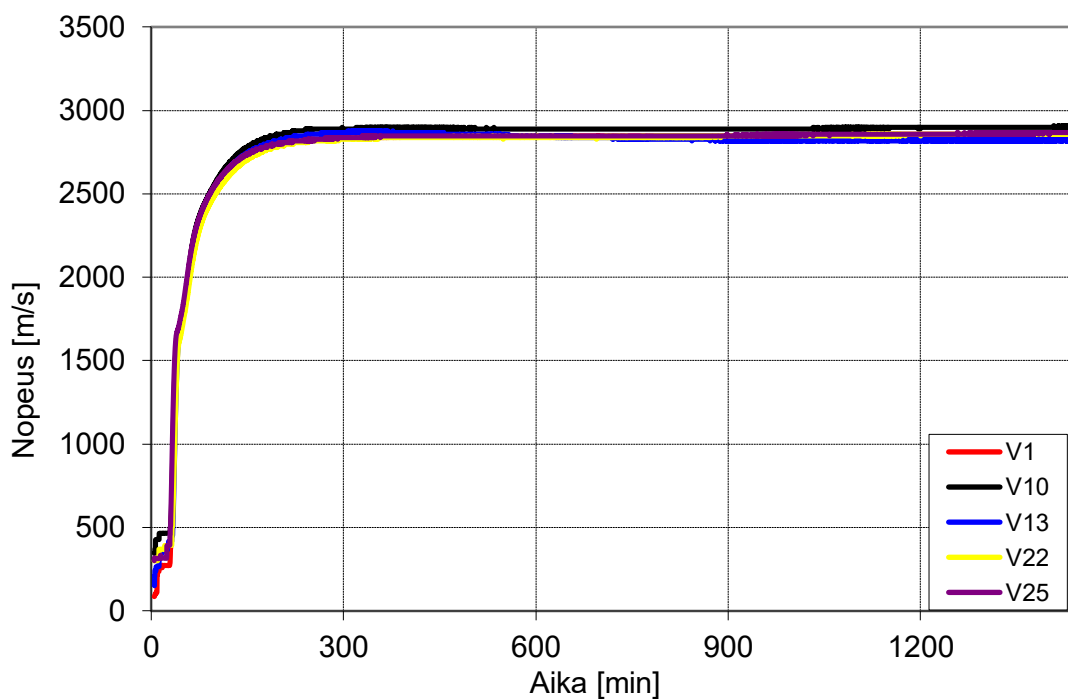
KUVIO 12. Hidastinmekanismi 1:n runko- ja sideaineiden 24 h kovettumiskäyrät



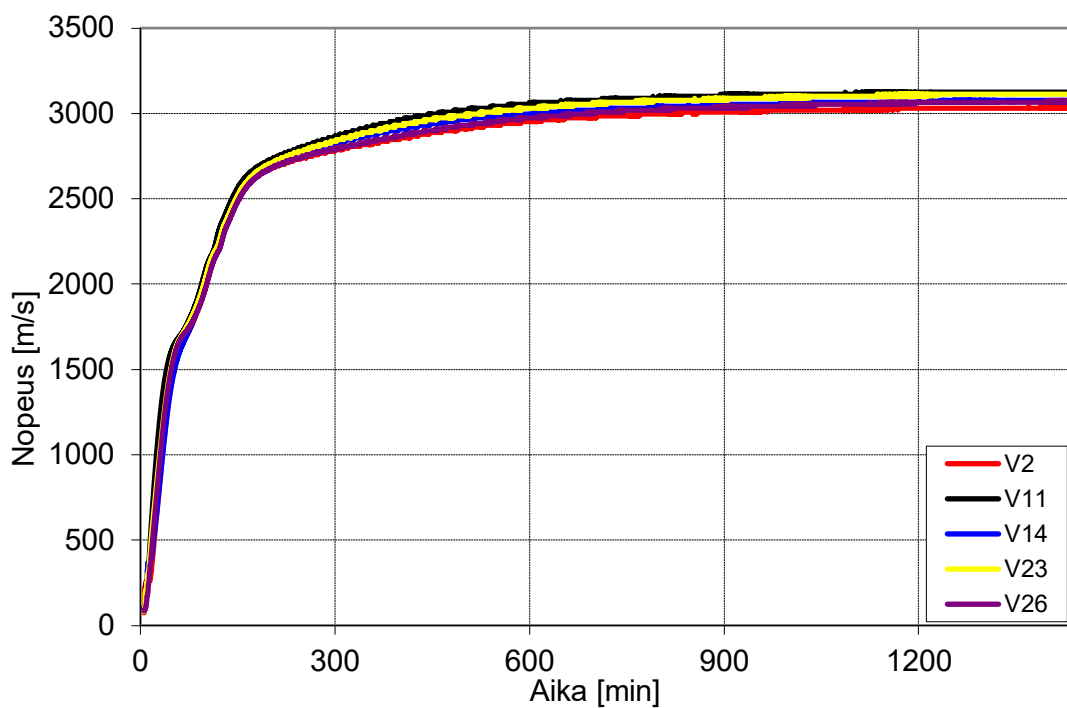
KUVIO 13. Hidastinmekanismi 2:n runko- ja sideaineiden 24 h kovettumiskäyrät



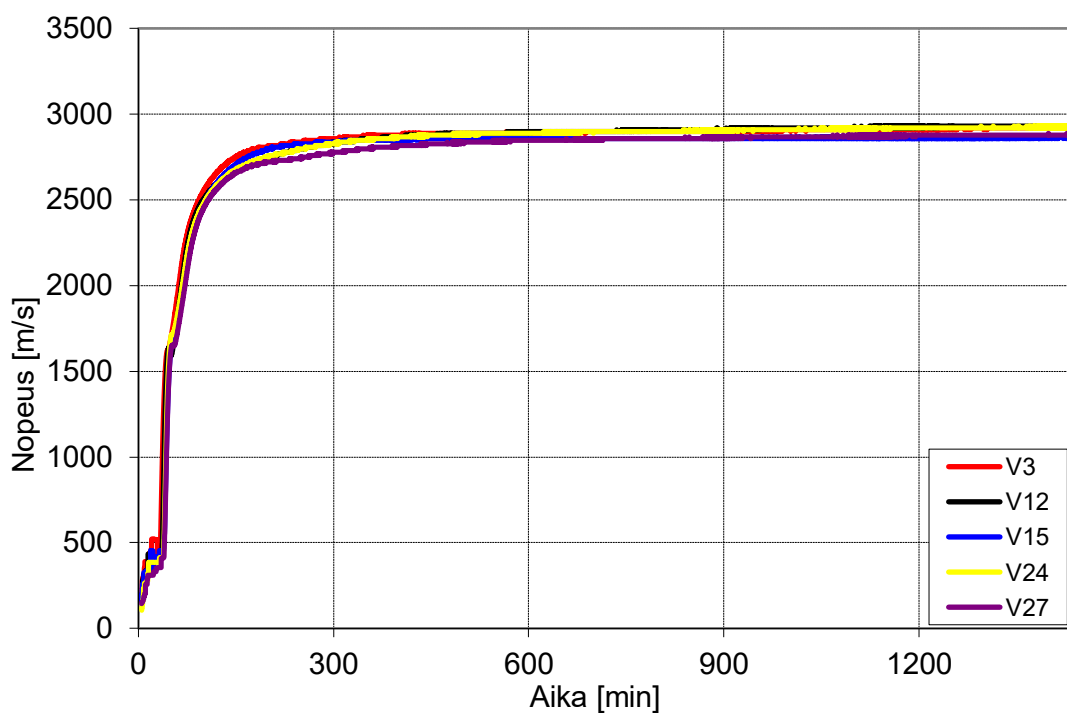
KUVIO 14. Hidastinmekanismi 3:n runko- ja sideaineiden 24 h kovettumiskäyrät



KUVIO 15. Hidastinmekanismi 1:n lisäaineiden 24 h kovettumiskäyrät



KUVIO 16. Hidastinmekanismi 2:n lisäaineiden 24 h kovettumiskäyrät



KUVIO 17. Hidastimekanismi 3:n lisäaineiden 24 h kovettumiskäyrät

Liite 2. Taivutus- ja puristuslujuusmittauksien tulokset

TAULUKKO 10. Taivutuslujuusmittauksien tulokset. Silminnähtäviä 1(2)
 valuvirheitä sisältäneet tulokset yliviivattu.

Versio	2.5 h (MPa)	5 h (MPa)	24 h (MPa)
Referenssi	1.34	2.06	2.95
	1.37	2.09	3.06
V1	2.00	2.61	3.07
	1.98	2.69	3.32
V2	2.84	3.72	4.51
	2.72	3.58	4.57
V3	1.64	2.32	2.86
	1.66	2.21	2.90
V4	1.75	2.49	3.01
	1.78	2.48	2.92
V5	2.44	3.31	4.25
	2.55	3.26	4.00
V6	1.54	2.16	2.72
	1.65	2.15	2.71
V7	1.56	2.27	3.07
	1.59	2.28	3.11
V8	1.58	2.99	4.79
	1.52	3.14	4.80
V9	1.24	1.98	3.05
	1.27	2.03	3.00
V10	2.09	2.59	3.39
	2.09	2.76	3.44
V11	2.76	3.76	5.02
	2.73	3.59	4.84
V12	1.72	2.42	2.90
	1.68	2.26	2.97
V13	1.92	2.61	3.18
	1.87	2.51	3.22
V14	2.60	3.54	4.66
	2.38	3.56	4.51
V15	1.54	2.32	2.91
	1.56	2.28	2.78
V16	1.82	2.60	3.29
	1.96	2.55	3.29
V17	2.66	3.43	4.72
	2.44	3.44	4.40
V18	1.64	2.36	2.89
	1.64	2.29	3.05
V19	1.73	2.44	3.28
	1.90	2.57	3.21
V20	2.54	3.27	4.76
	2.56	3.49	4.48
V21	1.62	2.14	3.08
	1.70	2.26	3.06
V22	1.95	2.74	3.36
	1.98	2.65	3.45
V23	2.43	3.46	4.52
	2.39	3.43	4.58
V24	1.49	2.34	3.15
	1.53	2.32	3.11
V25	1.90	2.29	3.34
	1.67	2.57	3.39
V26	2.83	3.38	4.68
	2.34	3.35	4.62
V27	1.57	2.30	2.89
	1.54	2.19	3.02

TAULUKKO 11. Puristuslujuusmittauksien tulokset. Silminnähtäviä valuvirheitä sisältäneet tulokset yliviivattu.

Versio	2,5 h (MPa)		5 h (MPa)		24 h (MPa)	
Referenssi	4,12	4,33	7,01	7,04	11,23	11,42
	4,16	4,39	7,15	7,05	11,25	11,37
V1	7,15	7,29	10,03	10,11	12,73	12,84
	7,24	7,22	10,11	10,18	12,78	12,73
V2	7,53	7,44	10,51	10,59	14,13	14,39
	7,59	7,43	10,36	10,73	14,21	14,41
V3	5,89	5,97	8,56	8,58	11,56	11,56
	5,87	5,96	8,52	8,51	11,46	11,60
V4	5,98	6,19	8,84	8,83	11,56	11,58
	5,95	6,15	8,79	8,80	11,56	11,60
V5	6,73	6,81	10,03	10,17	13,62	14,00
	6,78	6,85	10,10	10,09	14,43	14,11
V6	5,59	5,71	7,76	7,96	10,48	10,58
	5,56	5,67	7,83	7,96	10,40	10,43
V7	5,81	5,79	8,89	8,97	12,68	12,51
	5,87	5,93	8,81	8,96	12,88	12,46
V8	4,04	4,33	9,61	9,53	14,52	14,46
	4,03	4,27	9,55	9,40	14,66	14,32
V9	4,41	4,52	7,78	7,86	11,97	11,54
	4,50	4,46	7,87	7,82	11,82	11,92
V10	7,41	7,65	10,26	10,34	13,46	13,61
	7,53	7,54	9,93	10,38	13,47	13,42
V11	8,11	7,85	10,93	11,01	14,72	14,89
	8,13	7,89	11,06	10,93	15,14	15,08
V12	6,09	6,11	9,01	9,01	11,96	12,00
	6,13	6,13	8,99	8,91	11,88	11,91
V13	6,53	6,77	9,36	9,24	12,13	12,42
	6,65	6,67	9,39	9,02	12,11	12,28
V14	6,78	6,83	10,11	10,29	13,93	14,14
	6,44	6,36	10,11	10,19	14,10	13,84
V15	5,41	5,39	8,22	8,27	11,36	11,19
	5,35	5,35	8,26	8,28	11,23	11,12
V16	6,76	6,92	9,61	9,58	12,54	12,49
	6,78	6,77	9,44	9,49	12,50	12,63
V17	7,29	6,94	10,23	10,33	13,98	14,13
	7,10	6,93	10,27	10,41	14,29	14,01
V18	5,90	5,99	8,63	8,69	11,61	11,66
	5,87	5,98	8,58	8,67	11,58	11,57
V19	6,76	6,73	9,27	9,39	12,43	12,36
	6,79	6,66	9,41	9,41	12,36	12,41
V20	6,86	7,29	9,58	10,08	14,01	14,19
	6,90	7,28	9,86	10,13	14,21	14,29
V21	5,93	5,90	8,31	8,39	11,71	11,69
	5,86	5,84	8,27	8,34	11,76	11,65
V22	7,14	7,16	10,16	10,00	12,88	12,99
	7,08	7,08	10,06	9,93	12,95	12,89
V23	6,84	7,37	10,36	10,50	14,29	14,02
	6,94	7,42	10,31	10,45	14,51	14,09
V24	5,73	5,81	8,73	8,60	11,91	11,80
	5,71	5,78	8,69	8,59	11,69	11,70
V25	6,66	6,83	9,58	9,69	12,89	12,84
	6,64	6,79	9,48	9,54	12,88	12,78
V26	7,32	6,86	10,21	10,16	14,24	13,69
	7,33	6,98	10,20	10,27	14,38	14,36
V27	5,64	5,69	8,23	8,25	11,45	11,58
	5,64	5,71	8,22	8,31	11,37	11,63

Liite 3. Taivutus- ja puristuslujuustulokset virherajoiheen

TAULUKKO 12. Taivutuslujuuden tulokset virherajoiheen

1(2)

Versio	2,5 h (MPa)	5 h (MPa)	24 h (MPa)
Referenssi	1,36 ± 0,03	2,08 ± 0,03	3,01 ± 0,08
V1	1,99 ± 0,02	2,65 ± 0,06	3,20 ± 0,2
V2	2,78 ± 0,09	3,65 ± 0,10	4,54 ± 0,05
V3	1,65 ± 0,02	2,27 ± 0,08	2,88 ± 0,03
V4	1,77 ± 0,03	2,49 ± 0,01	2,97 ± 0,07
V5	2,50 ± 0,08	3,29 ± 0,04	4,13 ± 0,2
V6	1,60 ± 0,08	2,16 ± 0,01	2,72 ± 0,01
V7	1,58 ± 0,03	2,28 ± 0,01	3,09 ± 0,03
V8	1,55 ± 0,05	3,07 ± 0,11	4,80 ± 0,01
V9	1,26 ± 0,03	2,01 ± 0,04	3,03 ± 0,04
V10	2,09 ± 0,01	2,68 ± 0,13	3,42 ± 0,04
V11	2,75 ± 0,03	3,68 ± 0,13	4,93 ± 0,13
V12	1,70 ± 0,03	2,34 ± 0,12	2,94 ± 0,06
V13	1,90 ± 0,04	2,56 ± 0,08	3,20 ± 0,03
V14	2,60 ± 0,01	3,55 ± 0,02	4,58 ± 0,11
V15	1,55 ± 0,02	2,30 ± 0,03	2,85 ± 0,10
V16	1,89 ± 0,10	2,58 ± 0,04	3,29 ± 0,01
V17	2,55 ± 0,16	3,44 ± 0,01	4,56 ± 0,2
V18	1,64 ± 0,01	2,33 ± 0,06	2,97 ± 0,12
V19	1,82 ± 0,13	2,51 ± 0,10	3,25 ± 0,06
V20	2,55 ± 0,02	3,38 ± 0,15	4,62 ± 0,2
V21	1,66 ± 0,06	2,20 ± 0,09	3,07 ± 0,02
V22	1,97 ± 0,03	2,70 ± 0,07	3,41 ± 0,07
V23	2,41 ± 0,03	3,45 ± 0,03	4,55 ± 0,05
V24	1,51 ± 0,03	2,33 ± 0,02	3,13 ± 0,03
V25	1,90 ± 0,01	2,43 ± 0,2	3,37 ± 0,04
V26	2,83 ± 0,01	3,37 ± 0,03	4,65 ± 0,05
V27	1,56 ± 0,03	2,25 ± 0,08	2,96 ± 0,10

TAULUKKO 13. Puristuslujuuden tulokset virherajoiheen

2(2)

Versio	2,5 h (MPa)	5 h (MPa)	24 h (MPa)
Referenssi	4,25 ± 0,12	7,06 ± 0,06	11,32 ± 0,08
V1	7,21 ± 0,06	10,11 ± 0,06	12,77 ± 0,05
V2	7,50 ± 0,07	10,55 ± 0,14	14,29 ± 0,12
V3	5,92 ± 0,05	8,54 ± 0,03	11,55 ± 0,06
V4	6,07 ± 0,11	8,82 ± 0,03	11,58 ± 0,02
V5	6,79 ± 0,05	10,10 ± 0,05	13,79 ± 0,3
V6	5,63 ± 0,07	7,88 ± 0,09	10,47 ± 0,07
V7	5,85 ± 0,06	8,91 ± 0,07	12,63 ± 0,2
V8	4,17 ± 0,14	9,52 ± 0,08	14,49 ± 0,13
V9	4,47 ± 0,05	7,83 ± 0,04	11,90 ± 0,08
V10	7,53 ± 0,09	10,33 ± 0,06	13,49 ± 0,08
V11	8,00 ± 0,13	10,98 ± 0,06	14,96 ± 0,2
V12	6,12 ± 0,02	8,98 ± 0,05	11,94 ± 0,05
V13	6,66 ± 0,09	9,33 ± 0,08	12,24 ± 0,13
V14	6,81 ± 0,04	10,18 ± 0,08	14,00 ± 0,13
V15	5,38 ± 0,03	8,26 ± 0,03	11,23 ± 0,09
V16	6,81 ± 0,07	9,53 ± 0,07	12,54 ± 0,06
V17	7,07 ± 0,15	10,31 ± 0,07	14,10 ± 0,13
V18	5,94 ± 0,06	8,64 ± 0,05	11,61 ± 0,04
V19	6,74 ± 0,05	9,37 ± 0,06	12,39 ± 0,04
V20	7,08 ± 0,3	9,91 ± 0,14	14,18 ± 0,11
V21	5,88 ± 0,04	8,33 ± 0,05	11,70 ± 0,04
V22	7,12 ± 0,04	10,04 ± 0,09	12,93 ± 0,05
V23	7,14 ± 0,03	10,41 ± 0,08	14,23 ± 0,2
V24	5,76 ± 0,04	8,65 ± 0,06	11,78 ± 0,09
V25	6,73 ± 0,09	9,57 ± 0,08	12,85 ± 0,05
V26	7,12 ± 0,3	10,21 ± 0,04	14,33 ± 0,08
V27	5,67 ± 0,04	8,25 ± 0,04	11,51 ± 0,11