

Nopeasti lujittuva betonimassa isoihin korjausvaluihin

Tapio Vehmas

23.1.2019 VTT – beyond the obvious

Johdanto

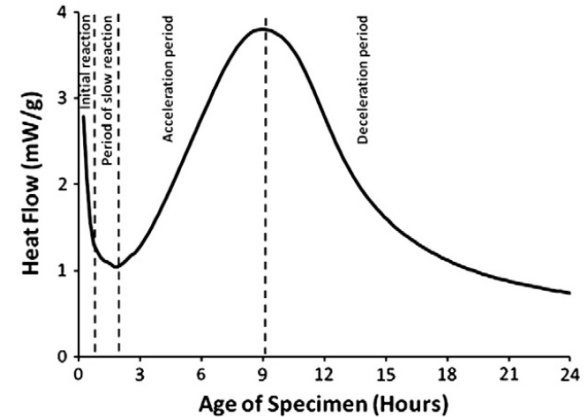
Lähtökohta

- Nopeasti lujittuvaa betonimassaa tarvitaan siltojen korjausvaluissa joissa liikenteen katkaiseminen on haastavaa, esimerkiksi rautatiesillat.
- Kaupallisesti on saatavissa nopeasti kovettuvia korjauslaasteja, mutta niiden käyttö on taloudellisesti kannattamatonta.
- Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää betoni, joka kovettumisominaisuuksiltaan ja kustannuksiltaan sijoittuisi korjauslaastien ja tavanomaisen betonin välimaastoon.
- Tutkimuksen perusteella voidaan määrittää materiaalitekniset rajoitukset korjaukselle.

Johdanto

Betonin kovettuminen

- Betonin kovettuminen on kemiallinen ja fysikaalinen prosessi.
- *Kemiallisesti* kyseessä liukenemis/kiteytymis –prosessi.
- *Fysikaalisesti* kyseessä on vapaan vesitilavuuden täyttäminen ja tiivistäminen reaktiotuotteilla.

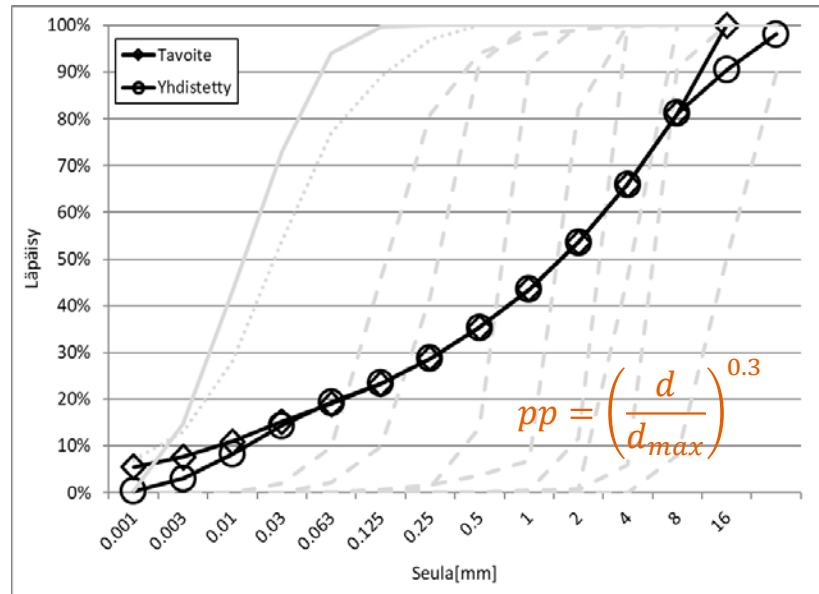


Kuvaaja 1. Tyypillinen sementin lämmönkehitys.

Nopeasti kovettuva betoni

Fysikaalinen optimointi

- Betonin suhteitus
 - Alhaisen vesimäärän rakeisuuskäyrä.
 - Massan oltava kuitenkin helposti työstettävä, ei liian viskoottinen.
 - Pikasementti 400 kg/m³
 - Dispergointi tehonotkistimella.
 - Minimiannostus, jotta ei vaikuta liikaa hydrataatioon.
 - Elementtiteollisuuden tehonotkistin.

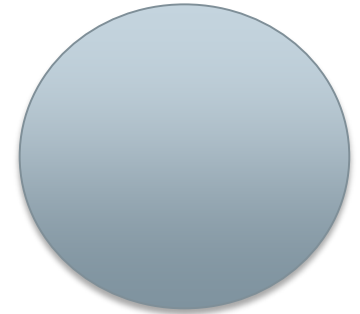


Kuvaaja 2. Käytetty kokonaisrakeisuuskäyrä.

Nopeasti kovettuva betoni

Kemiallinen optimointi

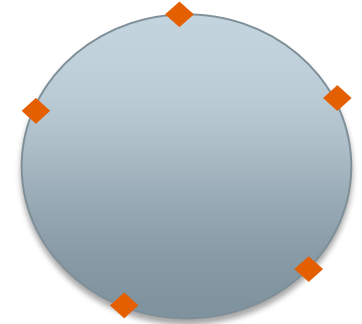
- Betonin kovettuessa, reaktion nopeutta rajoittaa alkuvaiheessa kiteytyminen.
- Reaktionopeus on tällöin riippuvainen:
 - Kiteytymisen nopeudesta
 - Kiteytymiskeskusten lukumäärästä.



Nopeasti kovettuva betoni

Kemiallinen optimointi

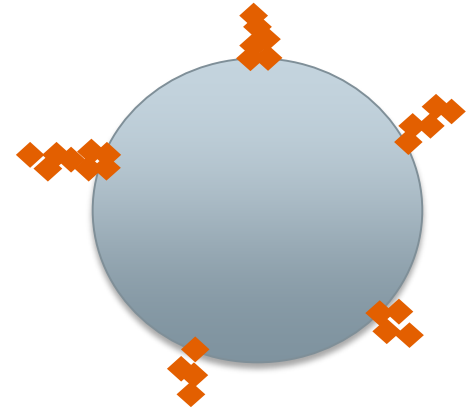
- Betonin kovettuessa, reaktion nopeutta rajoittaa alkuvaiheessa kiteytyminen.
- Reaktionopeus on tällöin riippuvainen:
 - Kiteytymisen nopeudesta
 - Kiteytymiskeskusten lukumäärästä.



Nopeasti kovettuva betoni

Kemiallinen optimointi

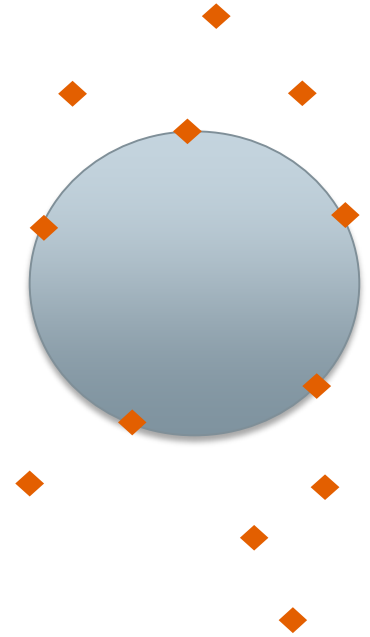
- Betonin kovettuessa, reaktion nopeutta rajoittaa alkuvaiheessa kiteytyminen.
- Reaktionopeus on tällöin riippuvainen:
 - Kiteytymisen nopeudesta
 - Kiteytymiskeskusten lukumäärästä.



Nopeasti kovettuva betoni

Kemiallinen optimointi

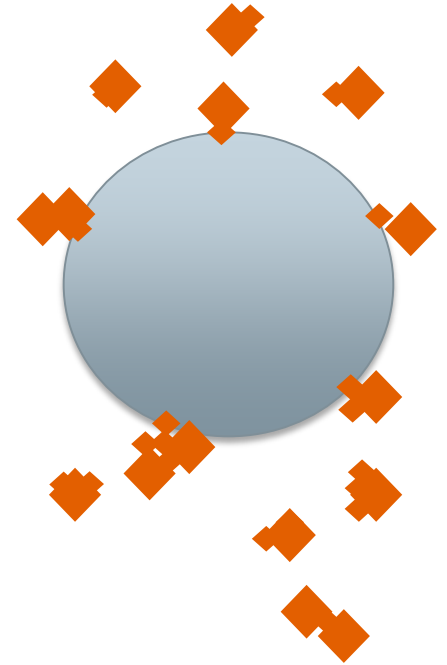
- Betonin kovettuessa, reaktion nopeutta rajoittaa alkuvaiheessa kiteytyminen.
- Reaktionopeus on tällöin riippuvainen:
 - Kiteytymisen nopeudesta
 - Kiteytymiskeskusten lukumäärästä.
- Molempiin pystytään tällä hetkellä vaikuttamaan.
 - Kiteytymisen nopeus (suolat esim. CaNO_3)
 - Kiteytymiskeskusten lukumäärä (nanomateriaalit esim. CSH)



Nopeasti kovettuva betoni

Kemiallinen optimointi

- Betonin kovettuessa, reaktion nopeutta rajoittaa alkuvaiheessa kiteytyminen.
- Reaktionopeus on tällöin riippuvainen:
 - Kiteytymisen nopeudesta
 - Kiteytymiskeskusten lukumäärästä.
- Molempiin pystytään tällä hetkellä vaikuttamaan.
 - Kiteytymisen nopeus (suolat esim. CaNO_3)
 - Kiteytymiskeskusten lukumäärä (nanomateriaalit esim. CSH)



Nopeasi kovettuva betoni

Betonien suhteitukset

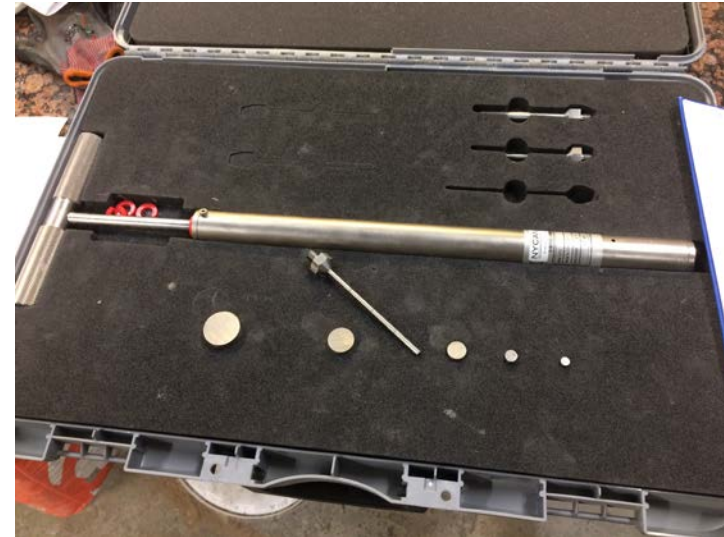
	referenssi	2% kiihdyttimet	2% kiihdyttimet (lisänotkistettu)	4% kiihdyttimet (lisänotkistettu)
Sementti	400 kg/m ³	400 kg/m ³	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Kalkkikivifilleri	75 kg/m ³	75 kg/m ³	75 kg/m ³	75 kg/m ³
Fillerihiekka	110 kg/m ³	110 kg/m ³	110 kg/m ³	110 kg/m ³
0-8mm	1175 kg/m ³	1175 kg/m ³	1175 kg/m ³	1175 kg/m ³
8-16mm	405 kg/m ³	405 kg/m ³	405 kg/m ³	405 kg/m ³
Vesi	186 kg/m ³	170 kg/m ³	170 kg/m ³	150 kg/m ³
SP	2.0 kg/m ³	2.0 kg/m ³	3.28 kg/m ³	4.00 kg/m ³
CSH	-	8.0 kg/m ³	8.0 kg/m ³	16.0 kg/m ³
CN	-	8.0 kg/m ³	8.0 kg/m ³	16.0 kg/m ³

SP = tehonotkistin, CSH = kiteytymisperustainen kiihdytin, CN = suolapohjainen kiihdytin (kalsiumnitraatti).

Nopeasti kovettuva betoni

Koemenetelmät

- Työstettävyys painumakokeella.
- Sitoutuminen ASTM C403M mukaisesti.
 - Sitoutuminen alkaa (500 PSI / 3,5MPa)
 - Sitoutuminen valmis (4000 PSI / 27,6MPa)
- Puristuslujuus sitoutumiskokeiden perusteella.
- Betonin puristuslujuuden arviointi lämmönkehityksen perusteella.
- Lämpötilan vaikutus aktivaatioenergian avulla.

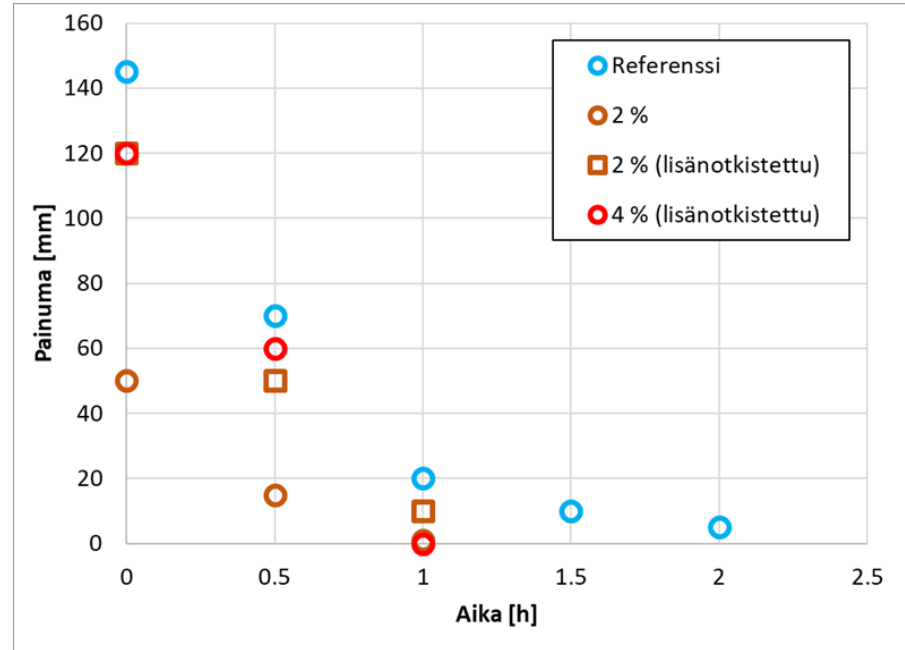


Kuvaaja 3. ASTM –standardin mukainen sitoutuminen.

Tulokset

Työstettävyys

- Tutkitun betonin painumaksi valittiin 150mm.
- Kiihdyttävien lisäaineiden annostelu laskee painumaa → Notkistimen lisäys vakionotkeuteen.

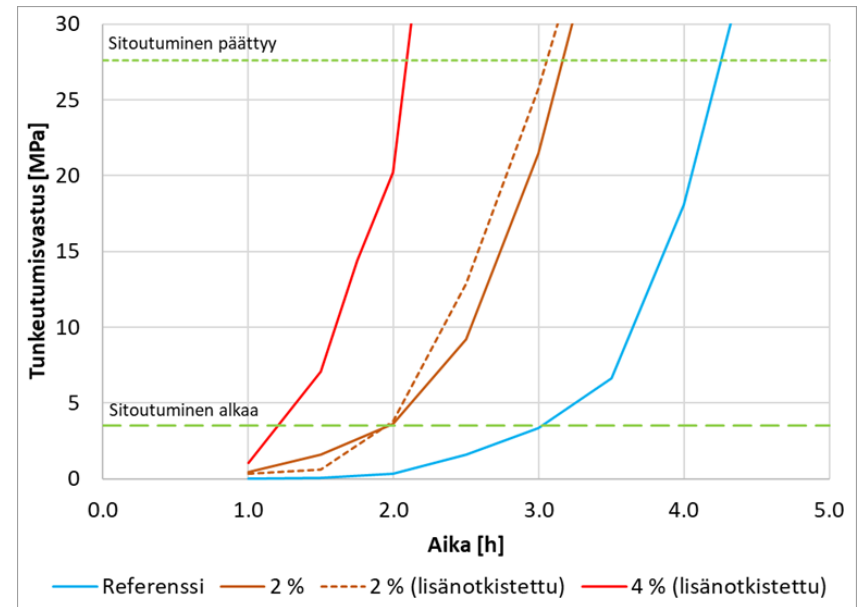


Kuvaaja 4. Tutkittujen betonien painumat ajan funktiona.

Tulokset

Sitoutuminen

- Perusmassan sitoutuminen tapahtui aikavälillä 180 – 260min.
- 2% kiihdytinannostelulla 110– 200 min.
- 4% kiihdytinannostelulla 80 – 125 min.
- Notkistinannostuksen vähäinen muutos ei vaikuttanut sitoutumiseen.



Kuvaaja 5. Tutkittujen betonien sitoutuminen

Tulokset

Puristuslujuus

- Betonin puristuslujuus määritettiin sitoutumisen päättyessä, 6h, 8h ja 24h sekoituksen päättymisestä.
- Massan lämmönkehitys mitattiin vastaavissa olosuhteissa.

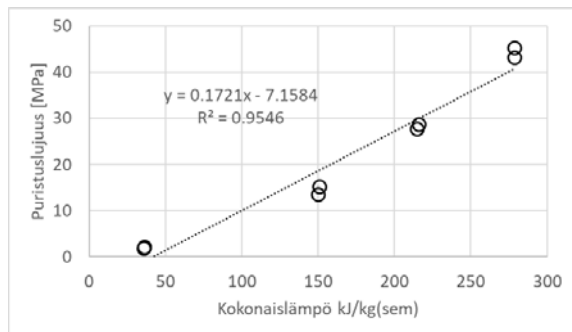
Taulukko 1. Mitatut puristuslujuudet 2% kiihdytinannostuksella.

Puristusaika	Tiheys	Kuutiolujuus
205 min	2390 kg/m ³	1,8 MPa
208 min	2410 kg/m ³	2,0 MPa
6 h 3 min	2410 kg/m ³	13,4 MPa
6 h 5 min	2390 kg/m ³	15,1 MPa
7 h 56 min	2400 kg/m ³	27,6 MPa
7 h 58 min	2410 kg/m ³	28,7 MPa
24 h 16 min	2420 kg/m ³	45,3 MPa
24 h 18 min	2410 kg/m ³	43,2 MPa

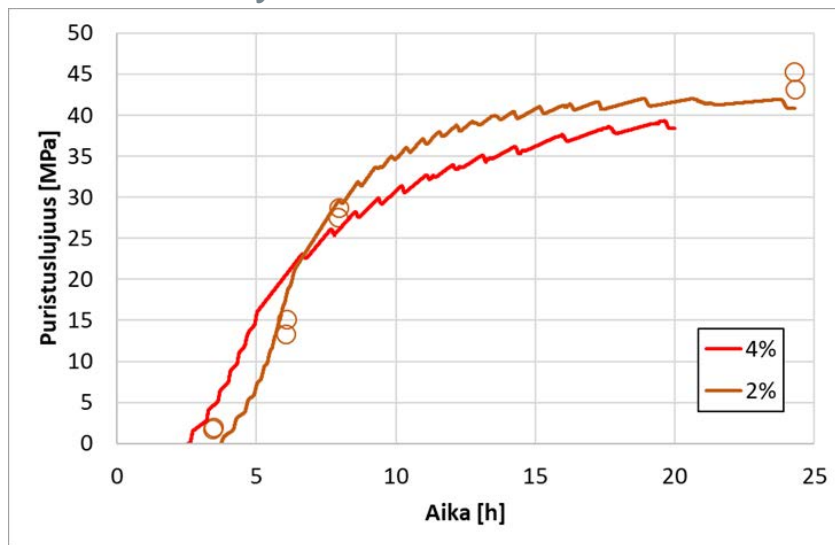
Tulokset

Lujuudenkehityksen arvointi lämmöntuoton perusteella.

- Lujuudenkehitys arvioitiin hydrataatiolämmön perusteella.
- Yli 20 MPa tavoitelujuuksissa, 2% kiihdytinannostus toimii paremmin.



Kuvaaja 6. Kokonaislämmön ja puristuslujuuden välinen korrelaatio.

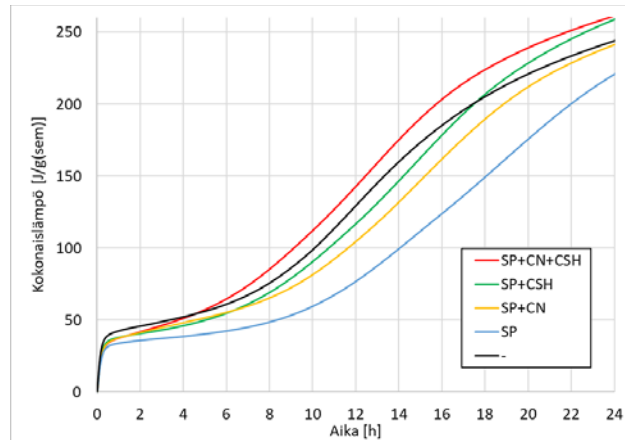


Kuvaaja 7. Kokonaislämmön perusteella arvioitu puristuslujuudenkehitys eri kiihdytinannostuksilla.

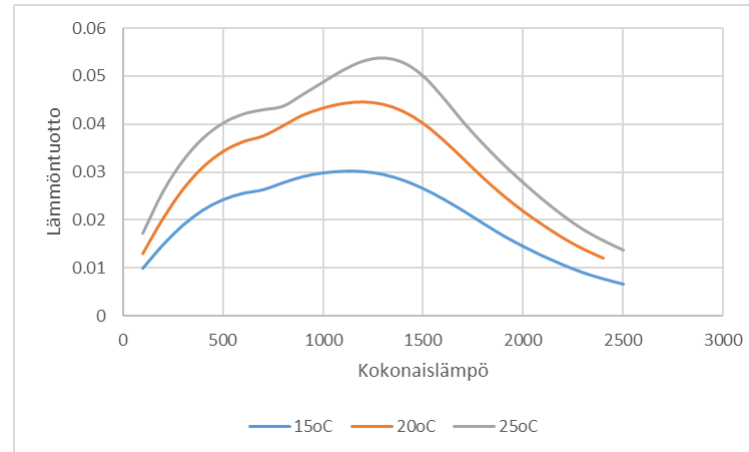
Tulokset

Betonin lämpötilan vaikutus

- Kiihdyttimien vaikutus betonin lämpötilariippuvuuteen määritettiin aktivaatioenergian avulla.



Kuvaaja 8. Sementin kokonaislämpö ajan funktiona isotermisessä 20°C lämpötilassa, lisäaineiden kanssa ja ilman. Käytetyt lyhenteet: SP = tehonostikin, CSH = kiteytymispohjainen kiihdytin, CN = kalsiumnitratipohjainen kiihdytin.



Kuvaaja 9. Sementin lämmöntuotto kokonaislämmön funktiona eri lämpötiloissa.

Tulokset

Betonin lämpötilan vaikutus

- Kiihdyttimien vaikutus betonin lämpötilariippuvuuteen arvioitiin aktivaatioenergian avulla. → ei muutosta normaalitilanteeseen.

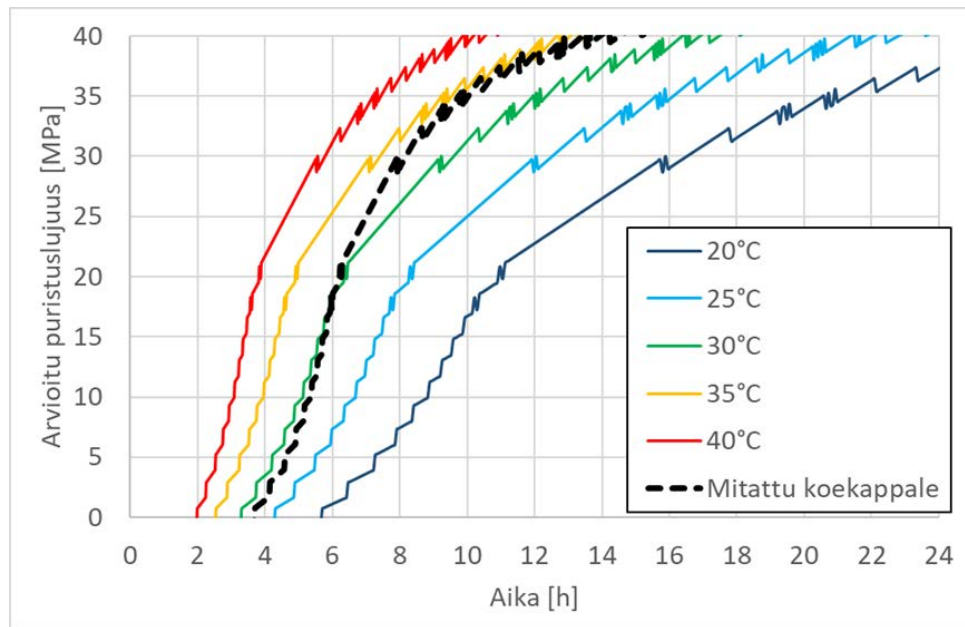
Taulukko 1. Mitatut aktivaatioenergiat.

Näyte	Aktivaatioenergia eri lämpötiloissa [kJ/mol]		
	15-20°C	20-25°C	15-25°C
Pikaseementti	53	-	-
Pikaseementti + SP	-	-	44
Pikaseementti + SP +CSH +CN	58	39	48
Pikaseementti +SP+CN	54	-	-
Pikaseementti +SP+CSH	54	30	42

Lopputulokset

Puristuslujuudenkehitys vakioämpötiloissa

- Betonimassan lopullinen kovettumisnopeus riippuu lämpötilasta.
- Nopeasti kovettuvalla betonilla lähtölämpötila määrittää lopullisen kovettumisen nopeuden.

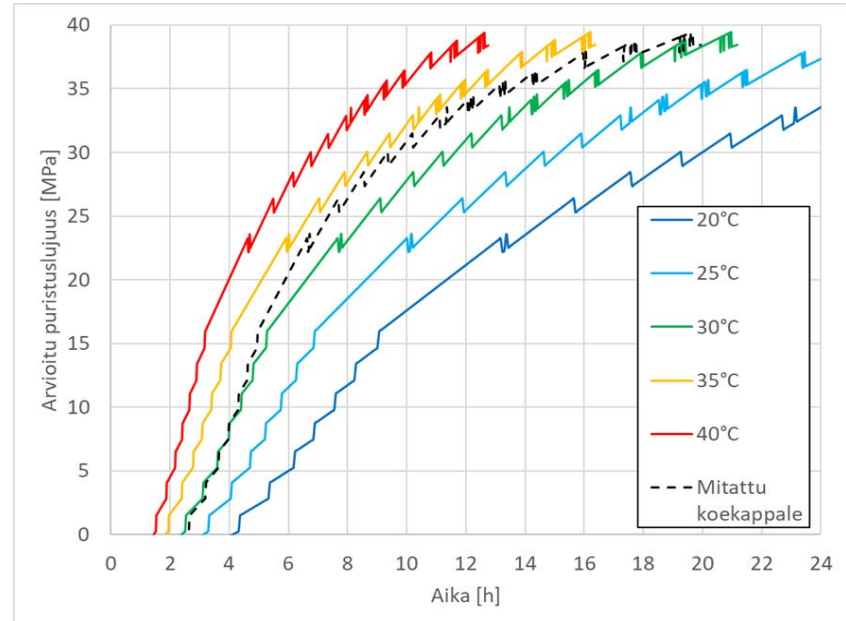


Kuvaaja 10. Betonin lujuudenkehitys 2% kiihdytinannostuksella isotermissä olosuhteissa

Lopputulokset

Puristuslujuudenkehitys vakiolämpötiloissa

- Betonimassan lopullinen kovettumisnopeus riippuu lämpötilasta.
- Nopeasti kovettuvalla betonilla lähtölämpötila määrittää lopullisen kovettumisen nopeuden.

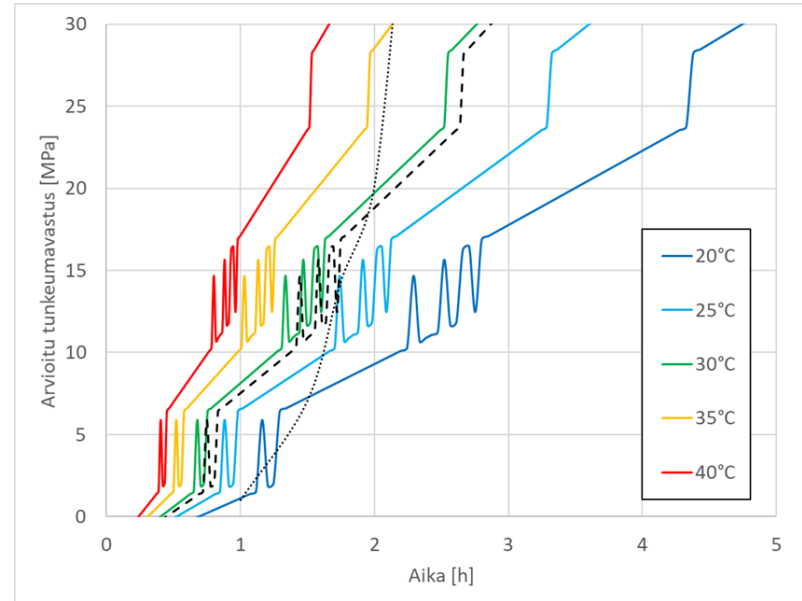


Kuvaaja 11. Betonin lujuudenkehitys 4% kiihdytinannostuksella isotermissä olosuhteissa

Lopputulokset

Sitoutuminen vakiolämpötilassa

- Kokeellisesti betony sitoutui noin kahdessa tunnissa.
- Lämmönkehityksen perusteella ennustettu sitoutumisaika on noin 2.5h.



Kuvaaja 12. Betonin tunkeutumismvastuksen kehittyminen 4% kiihdytinannostuksella isotermissä olosuhteissa

Nopeasti lujittuva betonimassa

Materiaalitekkinen lähtökohta

- Esitetyt tulokset voivat toimia suunnittelun lähtökohtana.
- Esikokeilla tulee varmistaa tapauskohtainen toimivuus.
- Massan lähtölämpötilan määrittäminen, rajat ympäristön lämpötilalle.
- Valutapahtumaan kiinnitettävä huomiota.
 - Lisänotkistus työmaalla
- Tartuntaan kiinnitettävä huomiota.

KIITOS !!

Tutkimus on toteutettu osana Betoniteknisiä Taitorakennetutkimuksia, jonka rahoittajina toimivat Väylävirasto, STUK, Helsingin kaupunki, Espoon kaupunki, Tampereen kaupunki, Vantaan kaupunki, Turun kaupunki ja Oulun kaupunki.