

# Vähähiilisen betonin kuivuminen

---

## Aaro Happonen

DI, Asiantuntija  
AFRY Buildings Finland Oy  
aaro.happonen@afry.com

## Pauli Sekki

DI, Asiantuntija  
AFRY Buildings Finland Oy  
pauli.sekki@afry.com

## Jouni Punkki

Professori (POP), Betonitekniikka  
Aalto-yliopisto  
jouni.punkki@aalto.fi

## Taustaa

Masuunikuonaa on käytetty sementin seosaineena tietyvästi jo 1800-luvulta alkaen. Suuri osa kuonabetoneiden ominaisuuksistakin on varsin laajasti tutkittuja ja tunnettuja. Masuunikuonalla on useita vaikutuksia betonin ominaisuuksiin, joista esimerkiksi kuonabetoneiden tiivis huokosrakenne ja sen mahdollistamat korkeat loppulujuudet sekä pienempi vedentarve ovat varsin positiivisia. Toisaalta erityisesti paljon kuonaa sisältävät betonit kärsivät hitaasta lujuudenkehityksestä.

Kuonabetoneiden kuivumisesta on toistaiseksi ollut saatavilla heikosti tutkimustietoa. Hitaampi lujuudenkehitys sekä tiiviimpi huokosrakenne antavat perusteita olettaa, että kuonabetonien kuivuminen eroaa tavanomaisista betoneista. Aaro Happonen diplomityössä "Vähähiilisen betonin kuivuminen" [1] tutkittiin erilaisten masuunikuonabetonien kuivumista ja kosteudensiirto-ominaisuuksia. Diplomityön kokeellinen tutkimus on toteutettu Aalto-yliopiston betonitekniikan laboratorioissa. Työn ohjaajana toimi DI Pauli Sekki AFRY Buildings Finland Oy:ltä ja valvojana professori Jouni Punkki. Diplomityö valmistui heinäkuussa 2023 ja rahoitettiin betonitekniikan tutkimusrahostosta. Työssä käytetyt betonit val-

Kuonabetoneiden kuivumisesta on toistaiseksi ollut saatavilla heikosti tutkimustietoa. Hitaampi lujuudenkehitys sekä tiiviimpi huokosrakenne antavat perusteita olettaa, että kuonabetonien kuivuminen eroaa tavanomaisista betoneista. Tässä tutkimuksessa todettiin, että kuonabetoneita käytettäessä kosteudenhallinnan merkitys kasvaa suuremman kuivumisen hidastumisen vuoksi.

mistettiin Rudus Oy:n Konalan betonitehtaalla ja mittalaitteet olivat lainassa AFRY Buildings Finland Oy:ltä.

## Kokeellinen tutkimus

Työssä tutkittiin kuuden eri kuonabetonin kuivumista. Betoneissa käytettiin kolmea eri sideainetta ja kahta eri vesi-sideainesuhdetta. Kaksi sideaineista oli CEM III-typin masuunikuonasementtejä CEM III/A (Kolmossementti) ja CEM III/B (70 % kuonajauhetta + 30 % Pikasementtiä). Kolmantena vertailusideaineena toimi tavanomaisesti käytetty CEM II/B-M (Oiva). Muilta osin betonien koostumukset pyrittiin vakioimaan. Työssä tutkittujen betonien koostumukset on esitetty taulukossa 1.

Koekappaleina käytettiin yhden litran peltipurkkeja, jotka simuloivat geometrialtaan ja mittaussyvyyksiltään 125 mm paksua yhteen suuntaan kuivuvaa laattaa. Mittaukset toteutettiin RT 103333-kortin mukaisesti näytepalamittauksilla, jossa betonin huokosten tilavuuden suhteellista kosteutta mitataan betonista irrotetuista näytepalloista. Suhteellisen kosteuden mittauksia tehtiin yhteen suuntaan vakioolosuhteissa kuivuvista kappaleista 5 mm, 20 mm sekä 50 mm syvyyksiltä. Samoilta syvyyksiltä

1 Aaro Happonen diplomityössä tutkittiin vähähiilisen betonin kuivumista kuuden eri kuonabetonin kuivumisen kautta. Betoneissa käytettiin kolmea eri sideainetta ja kahta eri vesi-sideainesuhdetta. Koekappaleina käytettiin yhden litran peltipurkkeja, jotka simuloivat geometrialtaan ja mittaussyvyyksiltään 125 mm paksua yhteen suuntaan kuivuvaa laattaa.



Taulukko 1

## Tutkittujen betonien koostumukset

		v/s 0,60			v/s 0,45		
		CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B
<b>Oiva</b>	kg/m <sup>3</sup>	315			430		
<b>Kolmossementti</b>	kg/m <sup>3</sup>		310			425	
<b>Pikasementti</b>	kg/m <sup>3</sup>			94			130
<b>Kuonajauhe</b>	kg/m <sup>3</sup>			220			304
Tehollinen vesi	kg/m <sup>3</sup>	188	185	188	192	190	195
v/s-suhde		0,60	0,60	0,60	0,45	0,45	0,45
<b>Notkistin</b>	%	0,6	0,9	0,6	0,64	0,62	0,70
Painumaluokka (tavoite)		S3	S3	S3	S3	S3	S3
Painuma (mitattu)	mm	140	150	150	140	120	170
Ilma	%	1,50	1,20	1,40	1,40	1,80	1,60
Tiheys	kg/m <sup>3</sup>	2427	2441	2431	2435	2433	2413

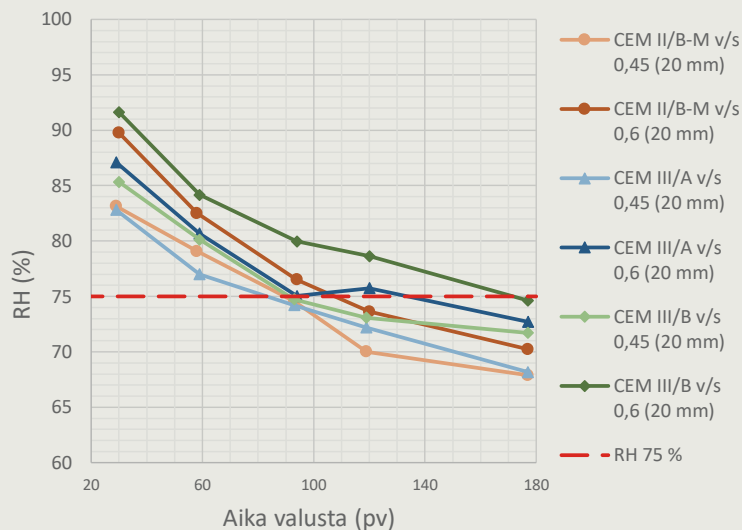


Aaro Happonen

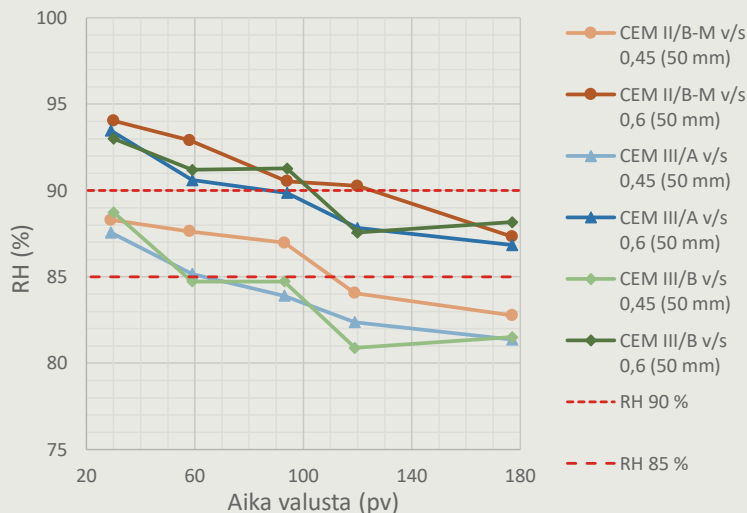
2 Mittaukset toteutettiin RT 103333-kortin mukaisesti näytepalamittauksilla, jossa betonin huokosten ilmatilan suhteellista kosteutta mitataan betonista irrotetuista näytepaloista.

**Kuva 1**

Vakio-olosuhteessa kuivuvien kappaleiden suhteellinen kosteus 20 mm syvyydessä.

**Kuva 2**

Vakio-olosuhteessa kuivuvien kappaleiden suhteellinen kosteus 50 mm syvyydessä.



mitattiin 60–90 päivän iässä kastumisjaksolle altistettujen kappaleiden kosteutta. Lisäksi suhteellista kosteutta mitattiin tiiviisti säilytetyistä ainoastaan kemiallisesti kuivuvista koekappaleista. Suhteellisen kosteuden mittausten lisäksi betoneista arvioitiin kosteudensiirto-ominaisuuksia Nilssonin ja Bergströmin esittelemää "the tin can method" -menetelmää [2] soveltaen. Menetelmä perustuu haihtuvan massan mittaamiseen, minkä perusteella voidaan arvioida laskennallisesti materiaalin kosteudensiirto-ominaisuuksia. Koekappaleita säilytettiin Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksen vakio-olosuhdehuoneessa, jossa lämpötila oli noin 20 °C ja ilman suhteellinen kosteus noin 45 %.

**Koetulokset****Kuivuminen vakio-olosuhteissa**

20 mm syvyydessä erot betoneiden kuivumisessa olivat varsin pieniä (kuva 1). Vesi-sideainesuhteeltaan vastaavien CEM II/B-M ja CEM III/A betoneiden kuivuminen oli hyvin samankaltaista. CEM III/B betoneiden kuivuminen oli kuitenkin selkeästi hitaampaa 20 mm syvyydessä. 50 mm syvyydessä korostuu ero vesi-sideainesuhteiden välillä (kuva 2). V/s-suhteen 0,60 betoneiden välillä erot ovat varsin pieniä, kun taas v/s-suhteen 0,45 betoneiden osalta CEM III-tyyppin betonit ovat mittausaikavälillä keskimäärin noin 2 %-yksikköä kuivempia kuin CEM II/B-M betoni.



Afry

3



Afry

4

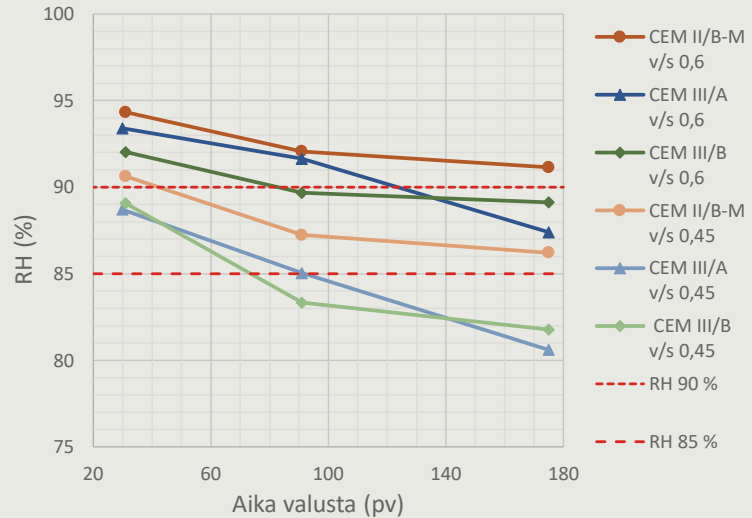


Aaro Happonen

5

Kuva 3

Kemiallisesti kuivuvien kappaleiden suhteellinen kosteus.



Taulukko 2

Päällystettävyyden raja-arvojen saavuttamiseen kulunut aika päivinä.

Syvyys (mm) / RH (%)	v/s 0,60			v/s 0,45		
	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B
20 mm / 75 %	105	100	170	90	85	90
50 mm / 90 %	125	90	105	<30	<30	<30
50 mm / 85 %	>180	>180	>180	110	60	60
Kem. / 90 %	>180	125	90	40	<30	<30
Kem. / 85 %	>180	>180	>180	>180	90	75

### Kemiallinen kuivuminen

Mittaus tulosten perusteella ainoastaan kemiallisesti kuivuvien koekappaleiden suhteellinen kosteus vaihteli sekä sideaineen, että vesi-sideainesuhteen mukaan (kuva 2.). Tuloksista voidaan havaita, että molemmilla tutkituilla CEM III -tyypin sideaineilla kuivuminen on nopeampaa kuin vastaavan v/s-suhteen CEM II/B-M sideaineella. Mittausvälillä 30–90 päivää kuivuminen on nopeinta CEM III/B betoneilla, ja mittausvälillä 90–180 päivää vastaavasti CEM III/A betoneilla. Tulosten perusteella CEM III/A sideaineella on tutkituista sideaineista korkein kuivumispotentiali, kun kuivuminen tapahtuu ainoastaan kemiallisen sitoutumisen kautta.

### Kuivumisajat päällystettävyyden raja-arvoihin

Betonin kuivumista tarkasteltaessa kiinnostusta herättää erityisesti päällystämisen kan-

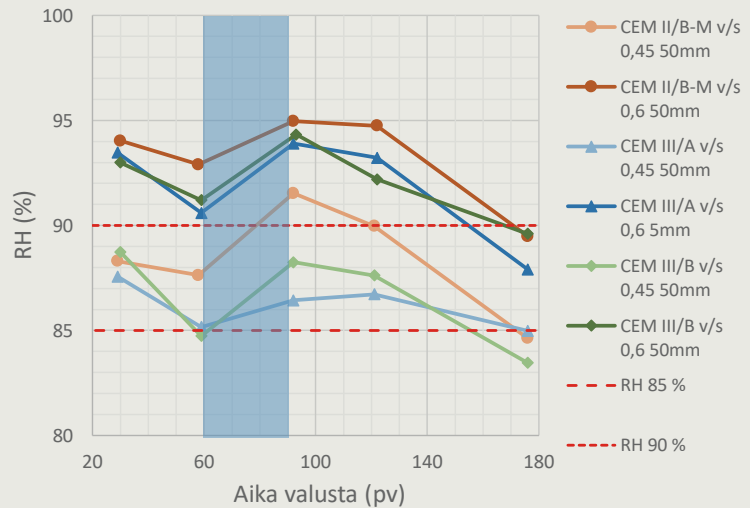
nalta riittävän matalan kosteuden saavuttamiseen kuluva aika. Taulukossa 2 on esitetty työssä mitattuja arvioita kuivumisajoista päällystettävyydelle esitettyihin raja-arvoihin. Tulokset eivät ole yleispäteviä, vaan soveltuvat ainoastaan keskinäiseen vertailuun. Tulosten perusteella CEM III betoneilla saavutettiin raja-arvot pääsääntöisesti nopeammin kuin saman v/s-suhteen CEM II/B-M betoneilla. Poikkeuksen tekee v/s 0,60 CEM III/B, jolla pintaosan raja-arvon saavuttamisessa kuluu huomattavasti muita betonilaatua enemmän aikaa. Työssä arvioidut kuivumisajat olivat CEM III betoneilla jopa viikkoja nopeampia kuin vastaavan v/s-suhteen CEM II/B-M betonilla. Tavanomaisesta poikkeavasti CEM III betoneiden kuivumisajojen havaittiin olevan suuremmat pintaosassa kuin syvemällä betonissa.

3,4 Betonin kuivumista tarkasteltaessa kiinnostusta herättää erityisesti päällystämisen kannalta riittävän matalan kosteuden saavuttamiseen kuluva aika.

5 Kosteusmittauksia eri kohteista.

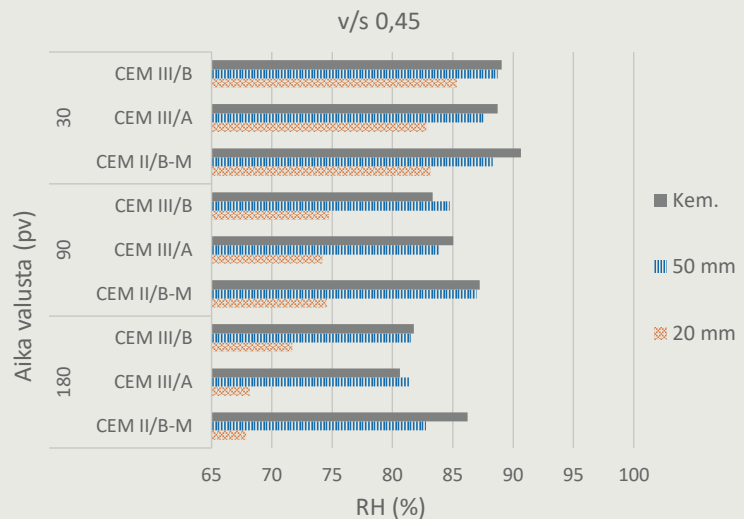
Kuva 4

Suhteellinen kosteus 50 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta kastelujaksolle altistetuissa kappaleissa. Kastelujakso esitetty sinisellä.



Kuva 5

Kemiallisen kuivumisen vertailu vakio-olosuhteessa kuivumiseen vesi-sideainesuhteen 0,45 betoneilla.



#### Kuivuminen kastumisjakson jälkeen

Kastumisjaksolle altistettujen kappaleiden suhteellista kosteutta mitattiin kastumisjakson loputtua 90 päivän iässä. Kuvassa 4 on esitetty kastumisjaksolle altistettujen betonien suhteellinen kosteus 50 mm syvyydessä. Tuloksien perusteella kastumisjakso hidasti CEM III betoneiden kuivumista enemmän kuin vastaavan vesi-sideainesuhteen CEM II/B-M betonin. Erityisen haitallista kastuminen vaikuttaa tulosten perusteella olevan matalan v/s-suhteen kuonabetoneille.

#### Kosteuden haihtuminen ja kosteudensiirto-ominaisuudet

Kosteudensiirto-ominaisuuksilla kuvataan kuinka hyvin kosteus liikkuu materiaalisuhteena tai höyrynä. Työssä saatujen tulosten

perusteella CEM III betonien kosteudensiirto-ominaisuudet ovat heikkomat kuin CEM II/B-M betoneilla riippumatta vesi-sideainesuhteesta. Myös v/s-suhteen vaikutuksen kosteudensiirto-ominaisuuksiin havaittiin olevan pienempi CEM III-tyyppin sideaineilla. CEM III/A ja CEM III/B sideaineiden väliset kosteudensiirto-ominaisuuksien erot olivat hyvin pieniä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kuonabetoneilla syvällä betonirakenteessa oleva vesi liikkuu hitaammin kohti pintaa, ja täten haihtuminen on hitaampaa.

#### Tulosten vertailu

Kuvassa 5 on verrattu kemiallisesti kuivuvien kappaleiden kuivumista yhteen suuntaan kuivuvien kappaleiden kuivumiseen vesi-sideainesuhteen 0,45 betoneilla. Kuvasta havaitaan,

että kemiallisen kuivumisen ja yhteen suuntaan kuivuvan kappaleen 20 mm syvyyden välinen ero on pienempi CEM III betoneilla kuin CEM II/B-M betonilla. Havainnon perusteella voidaan arvioida, että masuunikuonabetoneilla kemiallisen kuivumisen osuus kuivumisesta on suurempi, ja vastaavasti haihtumisen osuus pienempi kuin tavanomaisilla betoneilla. Havainto tukee esitettyä tuloksia masuunikuonabetonien heikommasta kyvystä siirtää kosteutta.

#### Johtopäätökset

Tutkimuksen tulokset ovat rohkaisevia masuunikuonabetonien käytettävyyden suhteen rakenteissa, joissa kuivumiselle on asetettu vaatimuksia. Matalan v/s-suhteen kuonabetonien kuivuminen on ensimmäiset puoli vuotta



6

6 Tulosten perusteella CEM III/A sideaineella on tutkituista sideaineista korkein kuivumispotentialiaali, kun kuivuminen tapahtuu ainoastaan kemiallisen sitoutumisen kautta.

valusta jopa nopeampaa kuin tavanomaisen betonin. Toisaalta korkean v/s-suhteen ja korkean kuonamäärän betonit voivat tulosten mukaan kuivua hitaammin kuin tavanomaiset betonit. Kuonabetoneita käytettäessä kosteudenhallinnan merkitys kasvaa suuremman kuivumisen hidastumisen vuoksi. Lisäksi erilaisten kuivumismekanismien osuuksien myötä myös olosuhteen muutosten vaikutuksen kuivumiseen voidaan olettaa eroavan tavanomaisista betoneista.

#### Kirjallisuus

- [1] A. Happonen, "Vähähiilisen betonin kuivuminen", Diplomityö. Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Espoo 2023.
- [2] L.-O. Nilsson & K. Bergström, The tin can method for determining moisture transport properties of concrete. 2020. E3S Web of Conferences, 172, 14005.

#### Abstract

*Increasing use of blast furnace slag concretes creates a need to be more aware of their properties. Aaro Happonen investigated drying of six different concretes containing blast furnace slag in his master's thesis: "Drying of low-carbon concrete". In the research relative humidity measurements were conducted in a period of 180 days for one-sided drying samples, sealed samples and samples that were wetted for a 30-day period starting 60 days after cast. Moisture transport properties of concretes were estimated using mass change measurements and computational methods.*

*Based on results of research, drying mechanisms of slag concretes seem to differ from ordinary concretes. Slag concretes dried faster due to chemical reaction than ordinary concretes. Moisture transport properties of slag concretes were measured to be significantly lower than those of ordinary concretes. Slag concretes with low water to binder ratio seem to suit well to structures that require fast drying. On the other hand, drying properties of high w/b slag concretes seem to be limited. Moisture control of worksites is increasingly important with slag concrete casts as delays for drying are even longer than with ordinary concretes.*