

**Betonin pakkasenkestävyyden osoittaminen  
pätevyitysmiskurssi  
31.1.2024  
Kim Johansson**

*Kim Johansson  
Erityisasiantuntija , DI  
Suomen Betoniyhdistys ry*



# Pakkasenkestävyyden osoittaminen

- Pakkasenkestävyyden laadunvalvonta ja vaatimustenmukaisuuden toteaminen rasitusluokissa XF1...XF4 jakautuu kolmeen osaan:
  - Ennakkokokeet
  - Jatkuva laadunvalvonta
  - Tasokokeet
- Betonilaadut jaetaan testausta varten osa-aineiden perusteella arvostelueriin (betoniperheisiin)
- Ennakkokokeissa, jatkuvassa laadunvalvonnassa ja tasokokeissa arvosteluerää edustaa arvosteluerään kuuluva betonilaatu

# Arvosteluerien muodostaminen

- Arvosteluerät muodostetaan siten että samantapaiset betonit sijoitetaan samaan arvosteluerään
  - Saman tyyppinen sementti
    - Sementin lujuus sama (esim. 42,5)
    - Sementin tyyppi sama (esim. CEM II A-S)
    - Sementin lujuudenkehittymisten nopeus sama (esim. N)
  - Lisä- ja seosaineet samanlaiset
  - Lujuusluokka-alue sama (esim.  $\leq 50$  MPa ja  $> 50$  MPa)
  - Rasitus joko suolan kanssa tai ilman
  - Sama suunnittelukäyttöikä
    - Eri suunnittelukäyttöiän betonit voidaan sijoittaa samaan arvosteluerään. Silloin noudatetaan 100 vuoden käyttöiän pakkasenkestävyysvaatimuksia myös 50 vuoden käyttöiän betoneille.

# Arvosteluerien muodostaminen

Taulukko L4.1. Esimerkki 1: Arvosteluerän muodostaminen.

Ominaisuus	Erän määrittelevä betoni	Vaatus	Erän vaihteluvälit
lisäaine	huokostin + notkistin	samat tuotteet, annostus voi vaihdella	huokostin + notkistin
sementti	75 % CEM II/A-LL 42,5 R + 25 % CEM II/B-M(S-LL) 42,5 N	seossuhde $\pm 25 \%$	(100-50 %) CEM II/B-LL 42,5 R +(0-50 %) CEM II/B-M(S-LL) 42,5N
lujuusluokka	C35/45	$\pm 10 \text{ MN/m}^2$	C30/37 – C45/55
seosaine	ei seosainetta	määräävä sementtilaatu CEM I	seosainetta 0...5 %
kiviaineksen ylänimellisraja	12 mm	$\leq 12 \text{ mm}$ ja $> 12 \text{ mm}$	$\leq 12 \text{ mm}$
pigmentti	2,5 % mustaa	$\pm 1,5$ prosenttiyksikköä	1,0 % – 4,0 % kaikki värit
notkeus	S3 (painuma 100–150 mm)	$\pm 1$ notkeusluokka	S2-S4 (painuma 50–210 mm)
kiviaines	kaikki kiviainekset	toiminta varmistettava	kaikki kiviainekset

# Betonin koostumusvaatimukset kun käyttöikä 50 vuotta

Taulukko 2.9. Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun suunnitellukäyttöikä on 50 vuotta.

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosion tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio				Kloridien aiheuttama korrosio						Jäätymis-sulamisrasitus <sup>P</sup>				Aggressiivinen kemiallinen rasitus		
						Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä									
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1 <sup>P</sup>	XF2	XF3 <sup>P</sup>	XF4	XA1	XA2
Tehollinen vesi-sideainesuhte enintään		0,90	0,80	0,60	0,60	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,60	0,50	0,50	0,45	0,50	0,45	0,40
Lujuusluokka vähintään	C12/15	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C40/50
Tehollinen sideainemäärä (kg/m <sup>3</sup> ) vähintään		160	160	250	250	300	320	320	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330
Ilmamäärä (%) <sup>H</sup>												4,0 <sup>P</sup>	5,0 <sup>P</sup>	4,0 <sup>P</sup>	5,0 <sup>P</sup>			
Seosainekertoimet																		
Silika $w/s_{ak} \leq 0,45$	2,00			2,00		2,00			2,00			2,00	2,00	2,00	2,00			2,00
$w/s_{ak} \geq 0,45$	1,00			1,00		2,00			2,00			1,00	1,00	1,00	1,00			2,00
Lentotuhkan <sup>P</sup>	1,00			0,40		0,40			0,40			1,00	0,40	1,00	0,40			0,40
Masuurikuona	1,00			1,00		1,00			1,00			1,00	1,00	1,00	1,00			1,00

<sup>H</sup> Lisäksi pakka senkestävyyden vaatimukset taulukon 5.5 mukaan.

<sup>P</sup> Betonin tehollisen vesi-sideainesuhteen ja ilmamäärän yhdistelmä voidaan määrittää vaihtoehtoisesti F-lukumenetelmällä (liite 3). Tällöin tämän taulukon sarakkeissa XF1 ja XF3 esitettyjen tehollisen vesi-sideainesuhte- tai ilmamäärävaatimusten ei tarvitse täyttyä, mutta betonin F-lukuvaatimuksen tulee täyttyä. 50 vuoden suunnitellukäyttöikästä F-lukuvaatimus rasitusluokassa XF1 on 1,0 ja rasitusluokassa XF3 1,5. F-luvun arvoja tehollisen vesi-sideainesuhteen, ilmamäärän ja kivaineksen ylärajojen funktiona on esitetty taulukossa L3.4.

<sup>H</sup> Ilmamäärävaatimus koskee betonia, jossa kivaineksen ylärajojen on vähintään 16 mm. Ylärajojen ollessa 12 mm ilmamäärävaatimusta nostetaan 0,5 prosenttiyksikköä ja ylärajojen ollessa 8 mm 1,0 prosenttiyksikköä.

<sup>P</sup> Yli 7% taveteilmamäärä ei ole suositeltava.

<sup>P</sup> Lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvona pidetään 0 siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde ylittää arvon 0,33 rasitusluokissa X0, XC1, XF1 ja XF3 lukuun ottamatta. Käytettäessä lujuusluokan 32,5 sementtiä lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvo on 0,20 rasitusluokissa XC2, XC3, XC4, XF2, XF4; XS- ja XD- ja XA-luokissa siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde alittaa arvon 0,33; tämän ylittävältä osalta aktiivisuuskertoimen arvo on 0.

# Betonin koostumusvaatimukset kun käyttöikä 100 vuotta

Taulukko 2.10. Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun suunnittelukäyttöikä on 100 vuotta.

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosion tai rasituksen vaara	Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio				Kloridien aiheuttama korrosio						Jäätymis-sulamisrasitus <sup>1)</sup>				Aggressiivinen kemiallinen rasitus		
						Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä									
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF2 <sup>2)</sup>	XF3 <sup>3)</sup>	XF4	XA1	XA2	XA3		
Tehollinen vesi/sideaine -suhde enintään		0,90	0,80	0,60	0,60	0,45	0,40	0,40	0,50	0,50	0,40	0,55	0,45	0,50	0,40	0,50	0,45	0,40
Lujusluokka vähintään	C12/15	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C40/50	C30/37	C35/45	C40/50
Tehollinen sideainemäärä (kg/m <sup>3</sup> ) vähintään		360	360	250	250	300	320	340	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330
Ilmämäärä (%) <sup>6)</sup>												5,5 <sup>6)</sup>	5,0 <sup>6)</sup>	5,5 <sup>6)</sup>	5,0 <sup>6)</sup>			
Seosainekertoimet																		
Silika $w/s_{\text{akt}} \leq 0,45$	2,00			2,00		2,00			2,00		2,00	2,00	2,00	2,00			2,00	
$w/s_{\text{akt}} \geq 0,45$	1,00			1,00		1,00			1,00		1,00	1,00	1,00	1,00			1,00	
Lentotuhka <sup>4)</sup>	1,00			0,40		0,40			0,40		0,40	0,40	0,40	0,40			0,40	
Masaumikuona	1,00			1,00		1,00			1,00		1,00	1,00	1,00	1,00			1,00	

<sup>1)</sup> Lisäksi pakkankestävyyden vaatimukset taulukon 5.5 mukaan.

<sup>2)</sup> Betonin tehollisen vesi-sideainesuhteen ja ilmämäärin yhdistelmä voidaan määrittää vaihtoehtoisesti F-lukumenetetyllä (liite 3). Tällöin tämän taulukon sarakkeissa XF1 ja XF3 esitettyjen tehollisen vesi-sideainesuhte- tai ilmämäärivaatimusten ei tarvitse täyttyä, mutta betonin F-lukuvaatimukseen tulee täyttyä. 100 vuoden suunnittelukäyttöikästä F-lukuvaatimus rasitusluokassa XF1 on 2,0 ja rasitusluokassa XF3 3,0.

F-luvun arvoja tehollisen vesi-sideainesuhteen, ilmämäärän ja kiviaineksen ylänimellisarjan funktiona on esitetty taulukossa L3.4

<sup>3)</sup> Ilmämäärävaatimus koskee betonia, jossa kiviaineksen ylänimellisarja on vähintään 16 mm. Ylänimellisarjan ollessa 12 mm ilmämäärivaatimusta nostetaan 0,5 prosenttikokkoo ja ylänimellisarjan ollessa 8 mm 1,0 prosenttikokkoo.

<sup>4)</sup> Lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvona pidetään 0 siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde ylittää arvon 0,33 rasitusluokissa X0, XC1, XF1 ja XF3 lukuun ottamatta. Käytettäessä lujusluokan 32,5 sementtiä lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvo on 0,20 rasitusluokissa XC2, XC3, XC4, XF2, XF4, XS- ja XD- ja XA-luokissa siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde ylittää arvon 0,33; tämän ylittävältä osalta aktiivisuuskertoimen arvo on 0.

<sup>5)</sup> Yli 7 %:n tavoitelilmämäärä ei ole suositeltava.

# Pakkasenkestävyyden vaatimukset (jatkuu)

- Betonin huokosjaon määrittämistä, jäädytys-sulatuskoetta ja laattakoetta pidetään vaihtoehtoisina betonin pakkasenkestävyyden (XF1 ja XF3) toteamismenetelminä.
- Betonin valmistaja valitsee käytettävän menetelmän. By 65 taulukon 5.5 sarakkeen 2 mukaisista vaatimuksista toisen tulee täyttyä.
- Sarakkeen 3 mukaisten vaatimusten tulee täyttyä rasitusluokissa XF1 ja XF3 sekä rapauman, että kimmokertoimen osalta.
- Kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden tulee rasitusluokissa XF1 ja XF3 täyttää joko sarakkeessa 1, 2 tai 3 esitetty, rakenteen suunnitellun käyttöiän ja rakenteen rasitusluokan mukainen vaatimus. Rasitusluokissa XF2 ja XF4 kovettuneen betonin tulee täyttää joko sarakkeen 1 tai 3 vaatimukset.

# Pakkasenkestävyyden vaatimukset (jatkuu)

- Jäädytys-sulatuskokeessa kelpoisuus voidaan osoittaa joko betonin vetolujuuksien suhteen tai dynaamisten kimmokertoimien suhteen perusteella
- Laattakokeessa kelpoisuus osoitetaan rasitusluokissa XF1 ja XF3 betonin pinnan rapautumisen ja dynaamisten kimmokertoimien suhteen perusteella, joista kummankin vaatimuksen on täytyttävä
- Laattakokeessa kelpoisuus osoitetaan rasitusluokissa XF2 ja XF4 betonin pinnan rapautumisen perusteella.



# Betonin ilmamäärä ja vesi- sementtisuhde

- ▶ Betonin vähimmäisilmamäärä ( $I_{\min}$ ) määräytyy XF-rasitusluokan, suunnitellun käyttöiän sekä kiviaineksen ylänimellisrajan perusteella. Vähimmäisilmamäärä annetaan taulukoissa 3-FI ja 4-FI, mutta voidaan rasitusluokissa XF1 tai XF3 määritellä vaihtoehtoisesti F-lukulaskennan avulla (Kohta L3.2.2).
- ▶ Betonin valmistaja valitsee reseptikohtaisesti tuotannon tavoiteilmamäärän ( $I_{\text{tavoite}}$ ), joka on riippuvainen käytetyistä raaka-aineista sekä tuotantomenetelmistä. Sen on oltava vähintään vähimmäisilmamäärän suuruinen.
- ▶ Betonin valmistaja voi kuitenkin halutessaan kohottaa tavoiteilmamäärää esimerkiksi varmistaakseen betonin riittävän huokosjaon. Tavoiteilmamäärä tulee olla tiedossa kaikille huokostetuille betoneille.
- ▶ Käytettäessä F-lukulaskentaa taulukkojen 3-FI ja 4-FI rasitusluokkien XF1 ja XF3 vesi-sementtisuhde- tai ilmamäärävaatimusten ei tarvitse täyttyä, mutta betonin F-luvun tulee täyttyä. 50 vuoden suunnitellulla käyttöiällä F-luku-vaatimus rasitusluokassa XF1 on 1,0 ja rasitusluokassa XF3 1,5. 100 vuoden suunnitellulla käyttöiällä F-lukuvaatimus rasitusluokassa XF1 on 2,0 ja rasitusluokassa XF3 3,0.

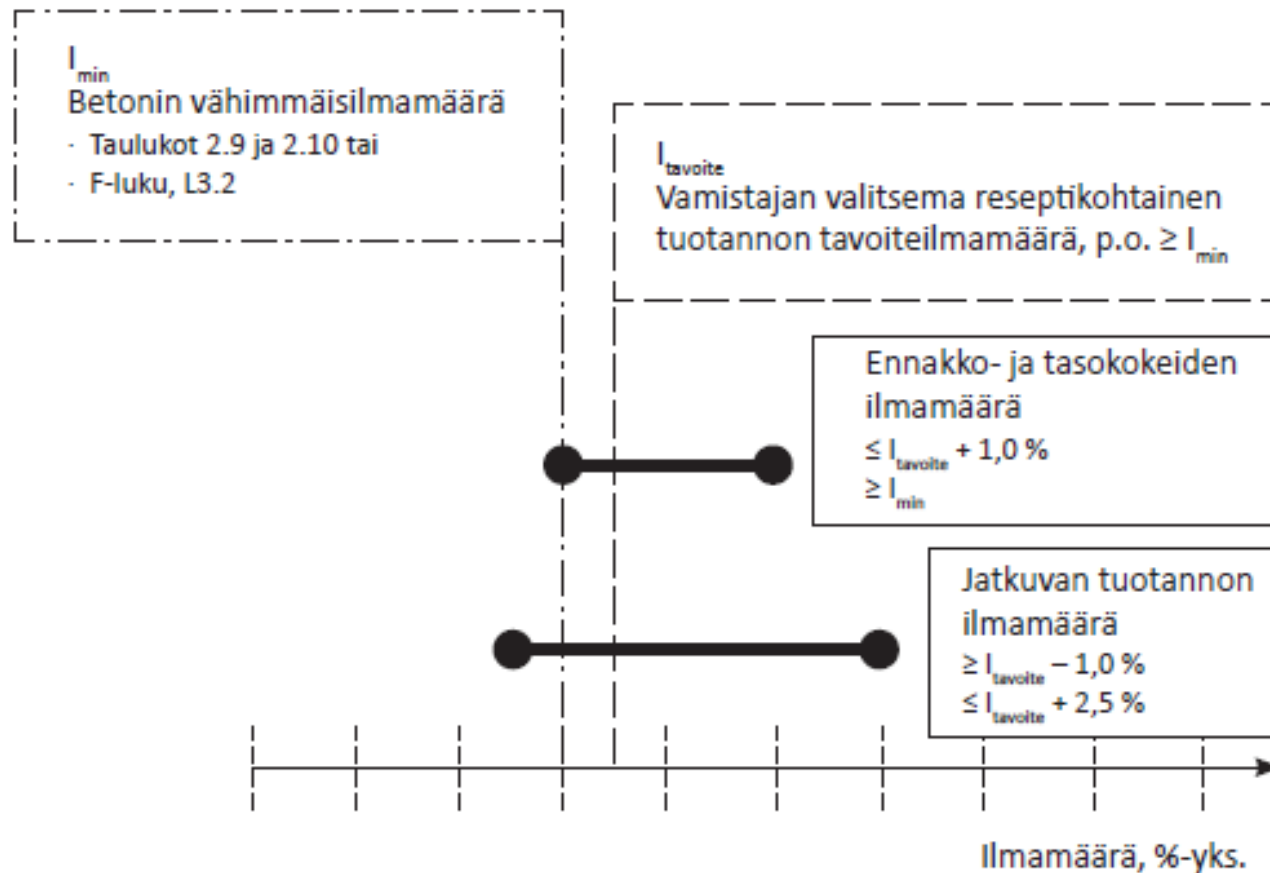
# Betonin ilmamäärä ja vesi- sementtisuhde

- ▶ Vähimmäisilmamäärävaatimusta ( $I_{\min}$ ) ei tarvitse noudattaa, mikäli betonointimenetelmä edellyttää betonimassalta sellaisia ominaisuuksia tai käytetään sen tyyppistä pakkasenkestävyyttä parantavaa lisäainetta ("mikrohuokostin"), että ilmamäärää ei standardin SFS-EN 12350-7 mukaisesti pystytä määrittämään.
- ▶ Tällöin pakkasenkestävyys todetaan SFS 7022 Liitteen A taulukon A.1-FI sarakkeen 2 tai 3 mukaisella pakkaskokeella. Mikäli testikoekappaleen valmistuksessa ei ole mahdollista käyttää vastaavaa betonin tiivistysmenetelmää kuin rakenneosaa tai betonielementtiä valettaessa, testikoekappaleet irrotetaan kovettuneesta rakenneosasta tai betonielementistä ja näytteet otetaan jokaisesta arvosteluerästä, jotka on valmistettu yhdenmukaisina pidettävissä olosuhteissa.

# Pakkasenkestävyyden alkutestaus

- Ennakkokokeilla varmistetaan että suunniteltu betonikoostumus ja valmistusprosessi täyttää betonille asetetut vaatimukset pakkasenkestävyyden suhteen. Lisäksi myös vaatimukset lujuuden, notkeuden ja vesi-sementtisuhteen osalta tulee täyttyä.
- Betonin valmistaja valitsee tuotannon vähimmäisilmamäärän ja testaa ennakkokokeilla valitun betoni-koostumuksen toimivuuden
- Ennakkokoe katsotaan pakkasenkestävyyden osalta hyväksytyksi kun betonin ilmamäärävaatimus täyttyy ja kovettuneen betonin ennakkokokeen tulos täyttyy (vaatimukset by 65 taulukko 5.5).

# Betonin ilmamäärän jatkuvan laadunvalvonnan termistöä ja jatkuvan betonituotannon sallittu ilmamäärän vaihtelu tavoiteilmamäärän perusteella



Kuva 5.5. Betonin ilmamäärän jatkuvan laadunvalvonnan termistöä ja jatkuvan betonituotannon sallittu ilmamäärän vaihtelu tavoiteilmamäärän perusteella.

# Kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden vaatimukset

Taulukko 5.5. Kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden vaatimukset, kun suunnittelukäyttöikä on 50 tai 100 vuotta.

		1	2			3	
Suunnittelukäyttöikä [a]	Rasitusluokka	Huokosjako <i>by 72 Betonin laadunvarmistus Osa 1 - Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohut- tai pintahieistä tai SFS-EN 480–11:2005 mukaan<sup>a)</sup></i>	Jäädytys-sulatuskoe, SFS 5447 <sup>b)</sup>			Laattakoe CEN/TR 15177 luokissa XF1 ja XF3 <sup>c)</sup> , CEN/TS 12390-9 luokissa XF2 ja XF4 <sup>d)</sup> , jälkimmäisessä väliaine 3 % NaCl-liuos	
		Enimmäisarvo [mm]	Syklien lukumäärä	Taivutus- tai halkaisuveto-lujuuksien suhde [%]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin $\gamma$ [%]	Rapauma $m$ [g/m <sup>2</sup> ]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin $\gamma$ [%]
50	XF1	0,27	100	$\geq 67$	$\geq 75$	$m_{56} \leq 500$	$\gamma_{56} \geq 67$
	XF2	-	-	-	-	$m_{56} \leq 650$	-
	XF3	0,23	300	$\geq 67$	$\geq 75$	$m_{56} \leq 200$	$\gamma_{56} \geq 75$
	XF4	-	-	-	-	$m_{56} \leq 350$	-
100	XF1	0,25	300	$\geq 67$	$\geq 75$	$m_{56} \leq 200$	$\gamma_{56} \geq 75$
	XF2	-	-	-	-	$m_{56} \leq 500$	-
	XF3	0,22	-	-	-	$m_{56} \leq 100$	$\gamma_{56} \geq 85$
	XF4	-	-	-	-	$m_{56} \leq 250$	-

Lukuarvon puuttuminen ruudusta merkitsee, ettei kyseinen koemenetelmä sovellu rivin osoittamaan rasitusluokkaan.

- <sup>a)</sup> Referenssimenetelmänä käytetään *by 72 Betonin laadunvarmistus Osa 1 - Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohut- tai pintahieistä*. Huokosjako voidaan selvittää ohut- tai pintahieistä myös muulla soveltuvalla menetelmällä, jonka korrelaatio suhteessa referenssimenetelmään on todettu testauslaitosten välisellä tasokokeella.
- <sup>b)</sup> Vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa joko betonin vetolujuuksien tai dynaamisten kimmokertoimien perusteella, joista toisen vaatimuksen tulee täytyä.
- <sup>c)</sup> Rasitusluokissa XF1 ja XF3 vaatimuksenmukaisuus on osoitettava sekä kimmokertoimen että pinnan rapauman osalta, joista kummankin on täyttyävä.
- <sup>d)</sup> Rasitusluokissa XF2 ja XF4 vaatimuksenmukaisuus osoitetaan pinnan rapauman perusteella.

# Pakkasenkestävyyden alkutestit

- Käytettäessä taulukkomitoitusta tulee betonin ilmamäärän ja vesi-sementtisuhteen täyttää standardin SFS 7022 taulukoiden 3-FI tai 4-FI vähimmäisvaatimukset
- Betonin valmistaja määrittää kuitenkin reseptikohtaisesti tuotannon vähimmäisilmamäärän, joka on riippuvainen käytetyistä raaka-aineista sekä tuotantomenetelmistä
- Vaaditun huokosjaon saavuttaminen voi edellyttää suurempaa ilmamäärää kuin taulukkojen 3-FI ja 4-FI vähimmäisvaatimukset
- Ennakkokokeissa tuoreen betonin ilmamäärä saa ylittää tuotannon vähittäisilmamäärän korkeintaan 1%-yksiköllä

# Ennakkokokeet jatkuu

- ▶ Ennakkokokeet on uusittava, mikäli materiaaleissa tai valmistustavoissa tapahtuu merkittäviä muutoksia.
- ▶ Tällöin riittää kahden arvosteluerän ennakkokokeiden uusiminen.
- ▶ Muut arvosteluerät käydään läpi mahdollisimman nopeasti muutoksen jälkeen tasokokeilla
- ▶ Pieni muutos ei automaattisesti edellytä ennakkokokeiden uusintaa, ellei muutoksen ole todettu vaikuttavan merkittävästi betonin vedentarpeeseen tai tarvittavaan huokostimen annostukseen

# Ennakkokokeet jatkuu

- ▶ Muutoksen merkitys tulee kuitenkin osoittaa kokeellisesti.
- ▶ Osoittaminen voidaan tehdä esimerkiksi tuoreen betonin ilmahuokosten kokojakautumaa mittaavalla laitteistolla (AVA-mittarilla)



# Tasokokeet

- ▶ Tasokokeilla varmistetaan betonin pakkasenkestävyysominaisuuksien säilyminen ennakkokokeissa todetulla tasolla ja havaitaan mahdolliset hitaat vaihtelut materiaaleissa ja valmistuslaitteistossa.
- ▶ Tasokokeiden tulee täyttää taulukossa SFS 7022 A.1-FI esitetyt vaatimukset.
- ▶ Tasokokeet jaetaan tuotantolaitoksittain tasaisesti pitkin vuotta.
- ▶ Enintään puolet tasokokeista voidaan tehdä myös tuoreen betonin huokosjakoa mittaavalla menetelmällä.
- ▶ Vaikka pääsääntöisesti käytettäisiinkin huokosanalyysia, on syytä tehdä myös suoria pakkaskokeita.

# Tasokokeet

- ▶ Jatkuvassa tuotannossa tulee tasokokeet tehdä by 65 taulukon 5.7 mukaisesti.

**Taulukko 5.7.** Tasokokeiden mittaustaajuus kaikissa XF-luokissa, kun suunnittelukäyttöikä on korkeintaan 100 vuotta.

Arvostelueräkohtainen vähimmäistestaustaajuus	Kukin arvosteluerä testataan vähintään 1 kerta / 12 kuukauden aikajakso.
Tasokokeiden vähimmäistaajuus (ei arvostelueräkohtainen)	Edellinen tasokoe saa olla korkeintaan 4 kk vanha, kun aika lasketaan koebetoninäytteen valmistuspäivästä.

- ▶ Mikäli tehtaalla on enintään 2 arvosteluerää, edellinen tasokoe saa kuitenkin olla korkeintaan 6 kk vanha.

# Kovettuneen betonin pakkasen-kestävyyden vaatimukset

Taulukko 5.5. Kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden vaatimukset, kun suunnittelukäyttöikä on 50 tai 100 vuotta.

Suunnittelukäyttöikä [a]	Rasitusluokka	1		2			3	
		Huokosjako <i>by 72 Betonin laadunvarmistus Osa 1 - Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohut- tai pintahieestä tai SFS-EN 480-11:2005 mukaan<sup>a</sup></i>		Jäädytys-sulatuskoe, SFS 5447 <sup>b</sup>			Laattakoe CEN/TR 15177 luokissa XF1 ja XF3 <sup>c</sup> , CEN/TS 12390-9 luokissa XF2 ja XF4 <sup>d</sup> , jälkimmäisessä väliaine 3 % NaCl-liuos	
		Enimmäisarvo [mm]		Sykliä lukumäärä	Taivutus- tai halkaisu- vetolujuuksien suhde [%]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin $\gamma$ [%]	Rapauma $m$ [g/m <sup>2</sup> ]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin $\gamma$ [%]
$v/s_{teh} > 0,40$	$v/s_{teh} \leq 0,40$							
50	XF1	0,27	0,27	100	$\geq 67$	$\geq 75$	$m_{36} \leq 500$	$\gamma_{36} \geq 67$
	XF2	-	-	-	-	-	$m_{36} \leq 650$	-
	XF3	0,23	0,23	300	$\geq 67$	$\geq 75$	$m_{36} \leq 200$	$\gamma_{36} \geq 75$
	XF4	-	-	-	-	-	$m_{36} \leq 350$	-
100	XF1	0,25	0,25	300	$\geq 67$	$\geq 75$	$m_{36} \leq 200$	$\gamma_{36} \geq 75$
	XF2	-	-	-	-	-	$m_{36} \leq 500$	-
	XF3	0,22	0,22	-	-	-	$m_{36} \leq 100$	$\gamma_{36} \geq 85$
	XF4	-	-	-	-	-	$m_{36} \leq 250$	-

Lukuarvon puuttuminen ruudusta merkitsee, ettei kyseinen koemenetelmä sovellu rivin osoittamaan rasitusluokkaan.

<sup>a</sup>) Referenssimenetelmänä käytetään *by 72 Betonin laadunvarmistus Osa 1 - Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohut- tai pintahieestä*. Huokosjako voidaan selvittää ohut- tai pintahieestä myös muulla soveltuvalle menetelmälle, jonka korrelaatio suhteessa referenssimenetelmään on todettu testauslaitosten välisellä tasokokeella.

<sup>b</sup>) Vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa joko betonin vetolujuuksien tai dynaamisten kimmokertoimien perusteella, joista toisen vaatimuksen tulee täytyä.

<sup>c</sup>) Rasitusluokissa XF1 ja XF3 vaatimuksenmukaisuus on osoitettava sekä kimmokertoimen että pinnan rapauman osalta, joista kummankin on täyttyvä.

<sup>d</sup>) Rasitusluokissa XF2 ja XF4 vaatimuksenmukaisuus osoitetaan pinnan rapauman perusteella.

# Tasokokeet

- ▶ Tasokokeet tehdään vaihtelevasti arvosteluerään kuuluvista eri betonilaaduista, jos niitä kuuluu tuotantoon. Tasokokeet painotetaan eniten valmistettaviin betonilaatuihin.
- ▶ Tasokokeessa tuoreen betonin ilmamäärä saa ylittää tuotannon vähimmäisilmamäärän korkeintaan 1 %-yksiköllä.
- ▶ Jatkuvässä tuotannossa tulee tehdä pakkasenkestävyyden tasokokeet SFS 7022 taulukon A.5-FI mukaisesti.
- ▶ Tasokokeena hyväksytään myös kohdekohtaiset tai muut vastaavat testaustulokset.

# Jatkuva laadunvalvonta

- ▶ Jatkuvalla laadunvalvonnalla varmistetaan, että valmistusprosessi tuottaa jatkuvasti vaatimukset täyttävää betonia. Tarkoituksena on havaita ne materiaaleissa tai valmistuksessa tapahtuvat muutokset, jotka vaikuttavat valmistettavan betonin ilmamäärään.
- ▶ Betonimassan vaaditut ominaisuudet selvitetään betonin valmistuksen aikana mittaamalla tuoreen betonin ilmamäärä. SFS 7022 Liitteen D kohdassa D.2 on esitetty betonin ilmamäärän jatkuvan laadunvalvonnan termistöä sekä jatkuvan tuotannon sallittu ilmamäärän vaihtelualue tavoiteilmamäärän perusteella.
- ▶ Jatkuvässä laadunvalvonnassa yksittäiset mittaustulokset saavat alittaa tavoiteilmamäärän 1 %-yksiköllä ja vastaavasti ylittää tavoiteilmamäärän 2,5 %-yksiköllä. Mikäli tavoiteilmamäärän ylitys on suurempi kuin 2,5 %-yksikköä, kyseisestä betoniannoksesta määritetään puristuslujuus kahdella ylimääräisellä laadunvalvonnan koekappaleella tai muussa tapauksessa ko. betoniannos tulee hylätä.

$$I_{\text{tavoite}} - 1,0 \% \leq I_{\text{jatkuva laadunvalvonta}} \leq I_{\text{tavoite}} + 2,5 \%$$

# Ilmamäärän mittaustaajuus

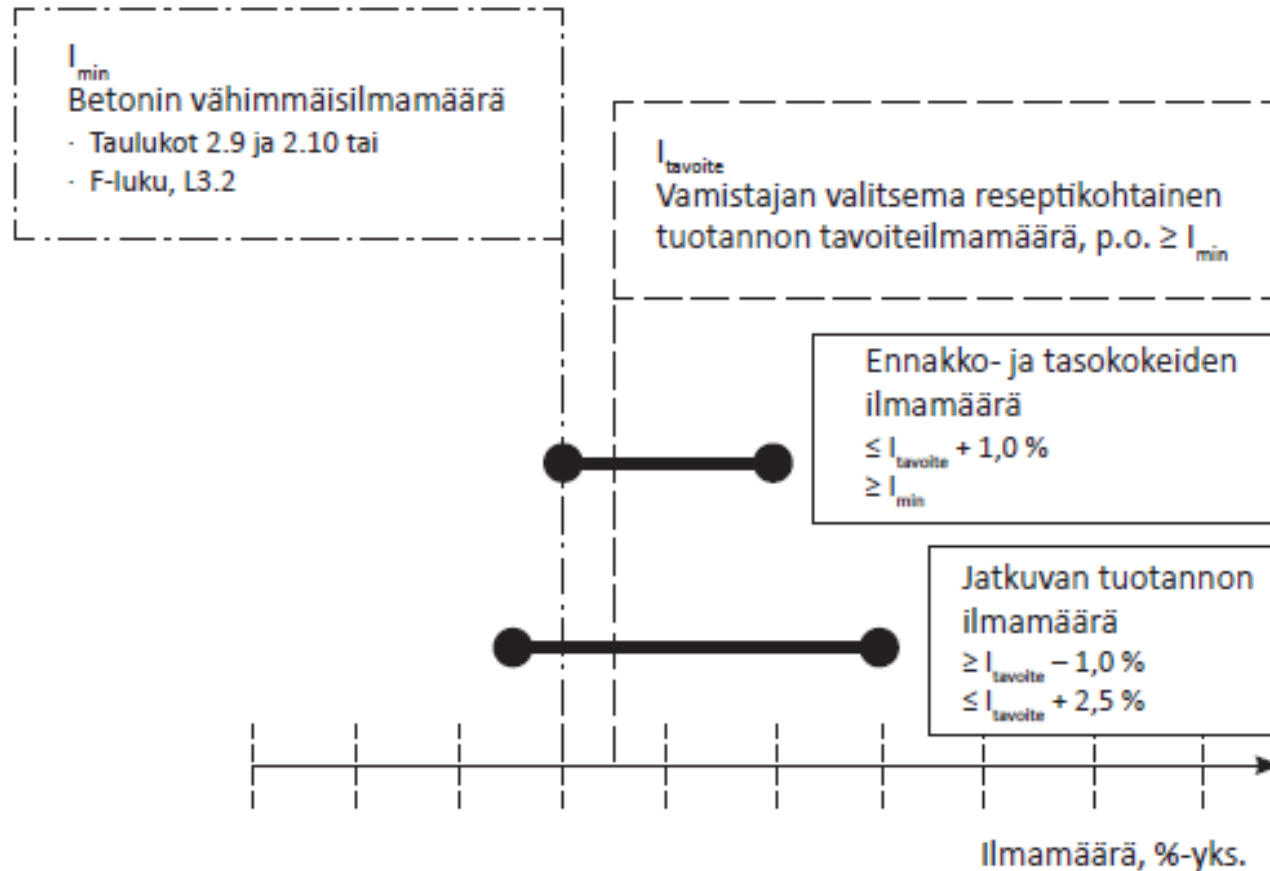
**Taulukko 5.6.** Tuoreen betonin ilmamäärämittausten määrä kaikissa XF-rasitusluokissa, kun suunnittelukäyttöikä on korkeintaan 100 vuotta.

Arvostelueräkohtaiset mittaukset päivittäin	Ensimmäinen mittaus päivän 1. kuormasta tai annoksesta
Vähimmäismittaustaajuus (ei arvostelueräkohtainen)	Ilmamäärän mittaus vähintään 3 tunnin välein.
Näytteenotto valmisbetonituotannossa	Valmistuspaikalla edellyttäen, että tunnetaan kuljetuksen ja mahdollisen pumppauksen vaikutus betonimassan ilmamäärään. Muussa tapauksessa valupaikalla.

# Jatkuva laadunvalvonta

- ▶ Tavoiteilmamäärän ylitys  $> 5$  %-yksikköä johtaa aina kyseisen betoniannoksen hylkäämiseen. Mikäli tavoiteilmamäärän ylitys on suurempi kuin  $2,5$  %-yksikköä, tulee myös tätä seuraavasta lisähuokostetusta betoniannoksesta mitata ilmapitoisuus.
- ▶ Ilmamäärän mittaukset tehdään arvosteluerittäin SFS 7022 taulukon A.4–F1 mukaisesti. Jos materiaaleissa tai tuotantomenetelmissä tapahtuu muutoksia, mitataan betonin ilmamäärä ensimmäisestä muutoksen jälkeisestä betonista.
- ▶ Ilmamäärän mittaukset jaetaan arvosteluerän sisällä satunnaisesti kaikille betonikoostumuksille valmistusmäärien suhteessa.

# Betonin ilmamäärän jatkuvan laadunvalvonnan termistöä ja jatkuvan betonituotannon sallittu ilmamäärän vaihtelu tavoiteilmamäärän perusteella



Kuva 5.5. Betonin ilmamäärän jatkuvan laadunvalvonnan termistöä ja jatkuvan betonituotannon sallittu ilmamäärän vaihtelu tavoiteilmamäärän perusteella.



# Betonin ilmamäärän jatkuvan laadunvalvonnan termistöä ja jatkuvan betonituotannon sallittu ilmamäärän vaihtelu tavoiteilmamäärän perusteella

Jatkuvassa laadunvalvonnassa betoni täyttää ilmamäärän osalta vaatimuksen, jos tuoreen betonin ilmamäärä alittaa valmistajan asettaman tavoiteilmamäärän korkeintaan 1,0 prosenttiyksiköllä ja ylittää tavoiteilmamäärän korkeintaan 2,5 prosenttiyksiköllä:

$$I_{\text{tavoite}} - 1,0 \% \leq I_{\text{jatkuva laadunvalvonta}} \leq I_{\text{tavoite}} + 2,5 \%$$

Alkutestauksessa tuoreen betonin ilmamäärä saa ylittää tuotannon vähimmäisilmamäärän korkeintaan 1 prosenttiyksiköllä ja ilmamäärän on oltava vähintään vähimmäisilmamäärän suuruinen:

$$I_{\text{min}} \leq I_{\text{alkutestaus}} \leq I_{\text{tavoite}} + 1,0 \%$$

**Taulukko D.2-FI Ennako- ja tasokokeiden sekä jatkuvan tuotannon sallittu ilmamäärän vaihtelualue tavoiteilmamäärän perusteella.**

	Tavoiteilmamäärä, %				
	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
<b>Ennako- ja tasokokeiden ilmamäärä</b>	≤ 5,0 %	≤ 5,5 %	≤ 6,0 %	≤ 6,5 %	≤ 7,0 %
<b>Jatkuvan tuotannon ilmamäärä</b>	3,0 – 6,5 %	3,5 – 7,0 %	4,0 – 7,5 %	4,5 – 8,0 %	5,0 – 8,5 %

# Vaatimuksenmukaisuuden toteaminen

- Rasitusluokassa XF1 lujuusluokaltaan vähintään C50/60 betonien pakkasenkestävyys voidaan osoittaa suoralla pakkaskokeella ilman ilmamäärä- tai F-lukuvaatimusta.
- Tasokokeessa sallitaan yksittäisen huokosjakotestin tuloksessa 0,03 mm ylitys verrattuna huokosjaon enimmäisarvoon, mikäli kyseisen tuotantolaitoksen kahden edellisen huokosjakotestin molemmat testitulokset täyttävät vaatimuksen ja kaikki nämä huokosjakokokeet on suoritettu viimeisen 13 kuukauden aikana.

# Pakkasenkestävyysvaatimuksia

Tapauksissa, joissa kohdekohtaisesti on todettu, etteivät koostumusvaatimukset eikä F-lukuvaatimus täyty, voidaan betonin pakkasenkestävyys osoittaa suoralla pakkaskokeella.

# Ennakkokokeet

- Jos pakkasenkestävyyden käyttöikämitoitus tehdään laskennallisella mitoituksella tulee vesisementtisuhde ja ilmamäärä valita siten että rasitusluokissa XF1 ja XF3 F-luku-vaatimus täyttyy kun:
  - XF1 ja 50 vuotta F-luku  $\geq 1$
  - XF3 ja 50 vuotta F-luku  $\geq 1,5$
  - XF1 ja 100 vuotta F-luku  $\geq 2$
  - XF3 ja 100 vuotta F-luku  $\geq 3$

# Pakkasenkestävyyttä kuvaava F-luku

- XF1 – ja XF3–luokissa betonin pakkasenkestävyys riippuu betonin ilmamäärästä ja vesi–sementtisuhteesta (sekä kiviaineksen maksimiraekoosta).
- Esimerkiksi vesi–sementtisuhdetta pienentämällä voidaan ilmamäärävaatimusta pienentää (F-luku).
- F-luku kuvaa betonin pakkasenkestävyyttä rasitusluokissa XF1 ja XF3

# Pakkasenkestävyyttä kuvaavan F-luvun laskenta

$$F = \frac{1}{\max \left\{ 0,25; 7,2 \frac{(v/s)^{0,45}}{(a-1)^{0,14}} - 4,0 \right\}} \quad (\text{L3.2})$$

- missä  $v/s$  on tehollinen vesi-sementtisuhte (tehollinen vesimäärä / kokonaissementtimäärä)
- $a$  on mitattu ilmamäärä [%] tapauksessa, jossa betonin kiviaineksen ylänimellisraja on 16 mm. Ylänimellisrajan ollessa 12 mm mitatusta ilmamäärästä vähennetään 0,5 prosenttiyksikköä ja ylänimellisrajan ollessa 8 mm 1,0 prosenttiyksikköä.

F-lukua laskettaessa ilmamäärän tulee olla taulukkojen L3.2 ja L3.3 mukainen. Jälkihoitoon edellytetään täyttävän luvussa 3.7.4.5 esitetyt vaatimukset.

# Pakkasenkestävyyttä kuvaavan F-luvun laskenta

BY 65 taulukko 3.8. XF1 ja 50 vuotta: vesi-sementtisuhte 0,6 ja ilmamäärä 4 %, maksimiraekoko 16 mm.

$$F = \frac{1}{\max\left\{0,25; 7,2 \frac{0,6^{0,45}}{4^{0,14}} - 4\right\}} \cong 1,1$$

BY 65 taulukko 3.9. XF1 ja 100 vuotta: vesi-sementtisuhte 0,5 ja ilmamäärä 5,5 %, maksimiraekoko 16mm

$$F = \frac{1}{\max\left\{0,25; 7,2 \frac{0,55^{0,45}}{5,5^{0,14}} - 4\right\}} \cong 2,2$$

Taulukko L3.4. Kertoimen A arvot (F-luku).

Ilmamäärä, %			Kerroin A (F-luku)							
Ylänimellisraja, mm			Tehollinen vesi-sementtisuhte							
8	12	>16	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
3,0	2,5	2,0	2,04	1,30	0,97	0,79	0,67	0,58	0,52	0,47
3,5	3,0	2,5	4,00	1,98	1,33	1,02	0,83	0,71	0,62	0,56
4,0	3,5	3,0	4,00	3,06	1,78	1,28	1,01	0,84	0,72	0,64
4,5	4,0	3,5	4,00	4,00	2,37	1,57	1,19	0,97	0,82	0,72
5,0	4,5	4,0	4,00	4,00	3,23	1,93	1,39	1,10	0,92	0,79
5,5	5,0	4,5	4,00	4,00	4,00	2,37	1,62	1,25	1,02	0,87
6,0	5,5	5,0	4,00	4,00	4,00	2,93	1,88	1,40	1,13	0,95
6,5	6,0	5,5	4,00	4,00	4,00	3,70	2,19	1,57	1,24	1,03
7,0	6,5	6,0	4,00	4,00	4,00	4,00	2,55	1,76	1,36	1,12
7,5	7,0	6,5	4,00	4,00	4,00	4,00	3,00	1,97	1,49	1,20
8,0	7,5	7,0	4,00	4,00	4,00	4,00	3,56	2,21	1,63	1,30
8,5	8,0	7,5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,48	1,77	1,39
9,0	8,5	8,0	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,80	1,94	1,49
9,5	9,0	8,5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,17	2,11	1,60
10	9,5	9,0	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,62	2,31	1,71



# Infrabetonien (P-lukubetoni) alkutestit

- Ennakkokokeet tehdään
  - puristuslujuuden,
  - tiheyden,
  - ilmamäärän,
  - ilmamääräpotentiaalin,
  - notkeuden sekä
  - kiviainesten kosteuspitoisuuden osalta
  - pakkassuolakokeet tehdään vähintään kahdelle erilaiselle P-lukubetonille

Tarkemmat ohjeet löytyvät Väyläviraston ohjeissa. Ohessa esitetty osa ohjeista.

# Infrabetonien (P-lukubetoni) alkutestit

- Kiviaineksen kosteuspitoisuus määritetään ennakkokoemassaan käytetyistä kaikista lajitteista todellisen vesi-sideainesuhteen laskemiseksi.
- Ilmamäärä mitataan 3 eri ajanhetkenä.
- Ilmamääräpotentiaali arvioidaan mittaamalla ilma heti vähimmäissekoitusajan ja 6 minuutin sekoitusajan jälkeen
- Ennakkokokeiden yhteydessä selvitetään mahdollisen hidastimen ja nesteyttimen vaikutusaika betonointiolosuhteissa.
- Tarvittaessa tutkitaan myös lisäaineiden vaikutuksia eri lämpötiloissa ja ilmamäärän pysyvyyttä betonin kuljetuksen ja betonoinnin aikana.

# Ennakkokokeet infrabetoneille

- Pakkassuolakestävyys osoitetaan laattakokeella.
- Kokeet tehdään normaalitilanteessa betonilaaduilla C30/37 P30 ja C35/45 P50 ja tarvittaessa muilla betonilaaduilla.
- Jos maksimiraekoko on pienempi kuin 12 mm tehdään aina ko. laadulle pakkassuolakokeet.
- Jos valmistetaan muita kuin taulukon 1 betonilaatuja tehdään niistä aina ennakkokokeet
- Ennakkokokeen tulos ei saa olla 2 vuotta vanhempi
- Vuosittain on kuitenkin tehtävä 1 laadun P30 tai P50 ennakkokoe

Taulukko 1 Suositeltavat infrabetonilaadut

Infrabetonilaatu
C30/37 P0
C30/37 P30
C35/45 P0
C35/45 P30
C35/45 P50
C45/55 P50

# Ennakkokokeet infrabetoneille

- Ennakkokoe katsotaan hyväksytyksi kun betonin koostumuksen mukainen P-luku täyttyy ja taulukon 3 rapautuma-arvot täyttyvät.
- Ennakkokokeet uusitaan aina 2 vuoden välein

*Taulukko 3. Sallitut rapautumat eri P-luvuilla käytettäessä standardin CEN/TS 12390-9 mukaista laattakoetta.*

P-luku	56 kierroksen CEN/TS 12390-9 -kokeessa sallittu rapautuma [g/m <sup>2</sup> ]				
	CEM I	Sementin kalkkikivipitoisuus %			
		5	10	15	20
P20	900	900	810	700	590
P30	500	500	440	390	330
P50	250	250	210	180	150
P70	150	150	130	110	90

# Sekoitusajan vaikutus

- Ilmamäärä mitataan heti ja 60 minuutin jälkeen
- Tuoreen betoninilmamäärä saa poiketa tavoiteilmamäärästä korkeintaan  $\pm 1$  %-yksikön
- 60 min ikäisenä ilmamäärä saa alittaa betonin tavoiteilmamäärän korkeintaan 1 %-yksikön ja ylittää korkeintaan 2,5 %-yksikköä.
- Sideaineen vaikutus ennakkokokeissa huomioidaan väyläviraston ohjeiden mukaisesti.
- 
- Ennakkokokeiden tulokset dokumentoidaan Väyläviraston lomakkeelle Tehdaskohtaiset ennakkokeet

# Ennakkokokeet infrabetoneille

- ▶ Ennakkokokeet on uusittava, mikäli materiaaleissa tai valmistustavoissa tapahtuu merkittäviä muutoksia.
- ▶ Tällöin riittää kahden arvosteluerän ennakkokokeiden uusiminen.
- ▶ Muut arvosteluerät käydään läpi mahdollisimman nopeasti muutoksen jälkeen tasokokeilla
- ▶ Pieni muutos ei automaattisesti edellytä ennakkokokeiden uusintaa, ellei muutoksen ole todettu vaikuttavan merkittävästi betonin vedentarpeeseen tai tarvittavaan huokostimen annostukseen

# Valutyön aikaiset kokeet tehtaalla

- ▶ Ilmamäärä mitataan tehtaalla betonilaatukohtaisesti päivittäin 5 ensimmäisestä kuormasta ja sen jälkeen joka 10. kuormasta.
- ▶ IT-betonilla ilma mitataan joka 3. kuormasta viiden ensimmäisen kuorman.
- ▶ Elementtiteollisuudessa P-lukubetonien ilmamäärä mitataan kolmesta ensimmäisestä annoksesta ja sen jälkeen vähintään joka kymmenennestä annoksesta.
- ▶ Elementtiteollisuudessa ilmamäärä voidaan mitata betoniasemalla tai valupaikalla.
- ▶ Mitatun ilmamäärän yksittäinen arvo ei saa ylittää tavoiteilmamäärää enempää kuin 2,5 %-yksikköä. Mitatun ilmamäärän yksittäinen arvo ei saa alittaa tavoiteilmamäärää enempää kuin 1,0 %-yksikköä.