

Vähähiilisten betonien säilyvyysmitoitus, kloridiosuus

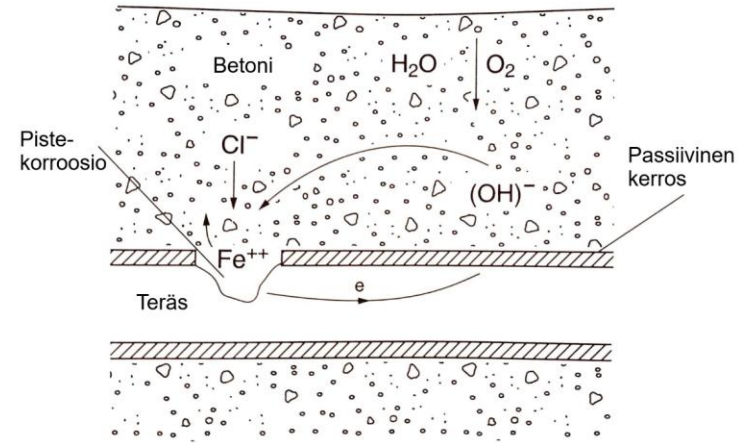
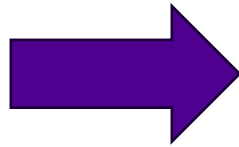
Siltatekniikan päivät 10.-11.2.2026

Samuli Myöhänen

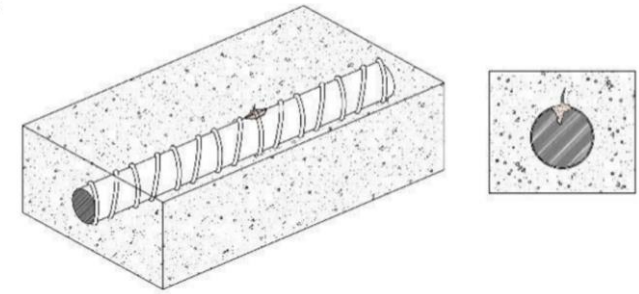
Esityksen sisältö

1. Kloridien vaikutukset teräsbetonirakenteeseen
2. Muutokset minimibetonipeitepaksuuden $c_{min,dur}$ määrittämiseen
3. Vähähiilisten betonien säilyvyysmitoitus –projekti
4. Kokeellinen osuus
5. Betonien XRDS-luokitus
6. Minimibetonipeitepaksuuksien mallinnus XRDS-luokille
7. Yhteenveto ja johtopäätökset
8. Lähteet

1. Kloridien vaikutukset teräsbetonirakenteeseen



B) Paikallinen pistekorroosio (kloridien tunkeutuminen)

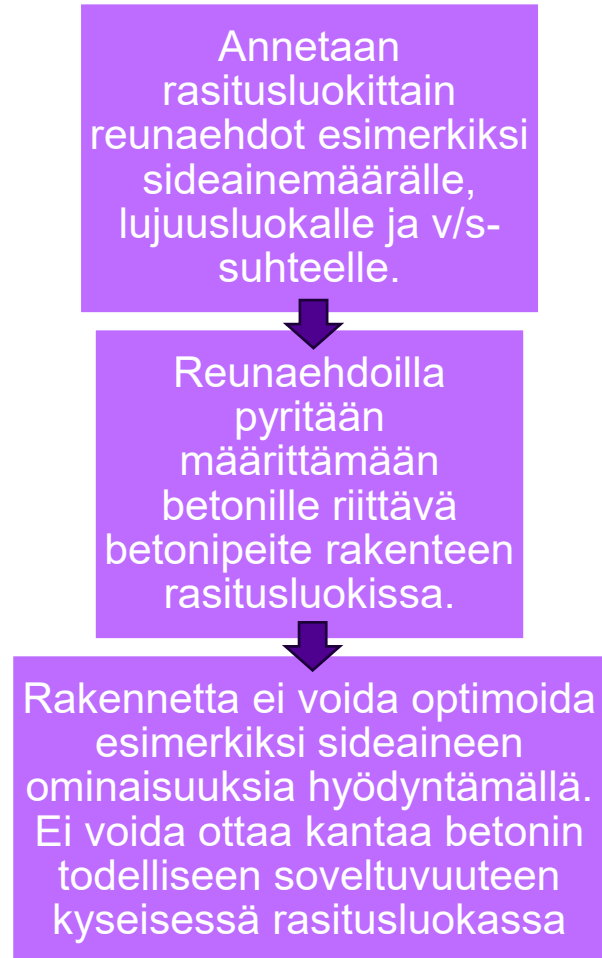


2. Muutokset minimibetonipeitepaksuuden $c_{\min, \text{dur}}$ määrittämiseen

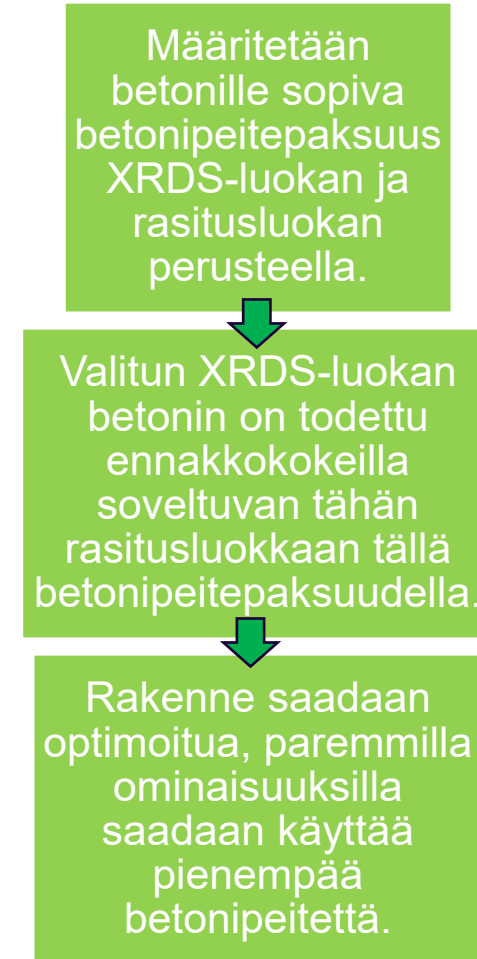
ERC-luokitus:

- Uudessa Eurokoodi 2:ssa käyttöön otettava tapa määrittää minimibetonipeitepaksuudet, peitepaksuustaulukko voidaan määrittää kansallisesti
- Exposure resistance class, kuvaa kuinka hyvin betoni vastustaa tiettyä räsitusta
- ERC-luokat on määritetty erikseen esimerkiksi klorideille (XRDS) ja karbonatisoitumiselle (XRC)
- Betonin XRDS-luokka kuvaa kloridien tunkeutumismnopeutta betoniin 50 vuoden iässä

Nykyinen tapa (by 65)



Uusi tapa (XRDS-luokitus)



HUOM:
Samankaltainen ennakkotestaus kuin P-lukujen tapauksessa. On kuitenkin tulossa todennäköisesti myös konservatiiviset taulukkoarvot betoniresepteille.

3. Vähähiilisen betonin säilyvyysmitoitus –projekti (1/2): yleistiedot

Tampereen yliopiston vetämä tutkimusprojekti

Ensimmäisiä tutkimuksia laatuaan Suomessa, siltojen osalta aiheen käyttöä selvitetään pala kerrallaan

Tutkimusprojektin osiot:

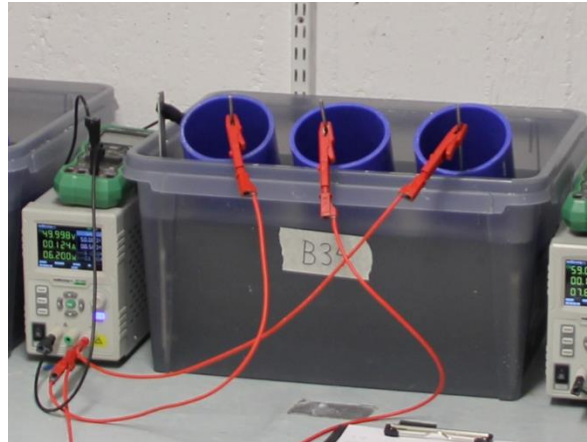
Aihe	Julkaisut
Karbonatisoitumisen tunkeutuminen vähähiilisiin betoneihin	Diplomityö (2025), fib-konferenssiartikkeli (2026), data-artikkeli ja datan julkaisu (2026)
Kloridien tunkeutuminen vähähiilisiin betoneihin	Diplomityö (2025), fib-konferenssiartikkeli (2026), data-artikkeli ja datan julkaisu (2026)
Kloridien ja karbonatisoitumisen tunkeutuminen halkeilleeseen betoniin	Journal-artikkeli
Jatkoprojekti: halkeamakokeen jatko + pitkäaikaiskokeet (kenttäkokeet ja ikäkertoimien määrittäminen)	

3. Vähähiilisen betonin säilyvyysmitoitus –projekti (2/2): kloridiosuus

Kokeellinen osuus

48 eri betonilaadun suorituskykyvyn testaus kloridirasituksessa klorididiffuusiokokeella ja kloridimigraatiokokeella

Suurimmassa osassa betoneista oli seostettuna masuunikuonaa, joten betonit olivat vähähiilisiä



Laskennallinen osuus

Betonien jako XRDS-luokkiin sen perusteella, kuinka hyvin ne vastustivat kloridien tunkeutumista

XRDS-luokille 0.5 - 10 betonipeitepaksuuksien mallintaminen suomalaisissa ympäristöolosuhteissa



4. Kokeellinen osuus (1/2): klorididiffuusiokokeet

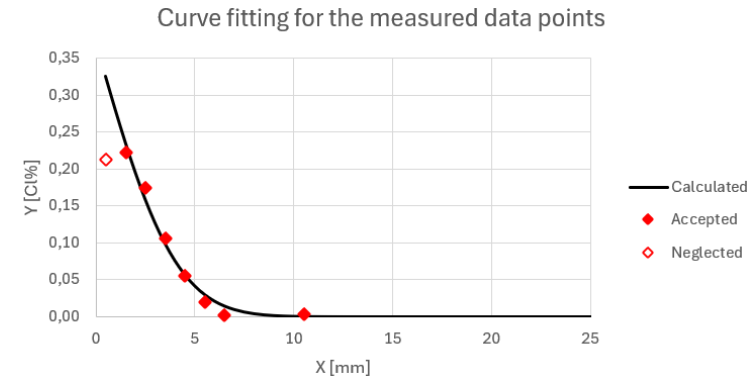
Testauksessa sovellettiin standardia 12390-11

Jälkihoitoaika 28 vrk vesiupotus + sideaineille CEM III/A ja CEM III/B lisäksi 91 vrk vesiupotetut kappaleet

3 koekappaletta / betonityyppi

Kloridirasitus 3% NaCl-liuokseen upotettuna 90 vrk

Tulosten käyräsovitus, lopputuloksena diffuusiokerroin $D_{app}(t_0)$, joka kuvaa kloridien tunkeutumismoitetta betoniin testaushetkellä



4. Kokeellinen osuus (2/2): kloridimigraatiokokeet

Testauksessa sovellettiin standardia EN 12390-18

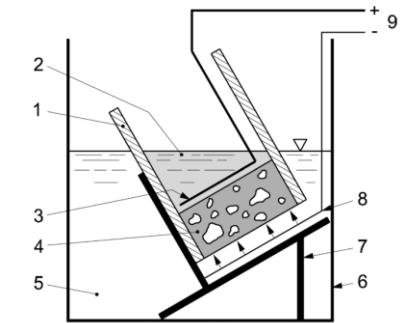
Jälkihoito: kaikista betoneista 28 vrk & 91 vrk vesiupotetut kappaleet

Kloridirasituksen aiheuttaminen sähkökemiallisen parin avulla 5% NaCl-liuoksella

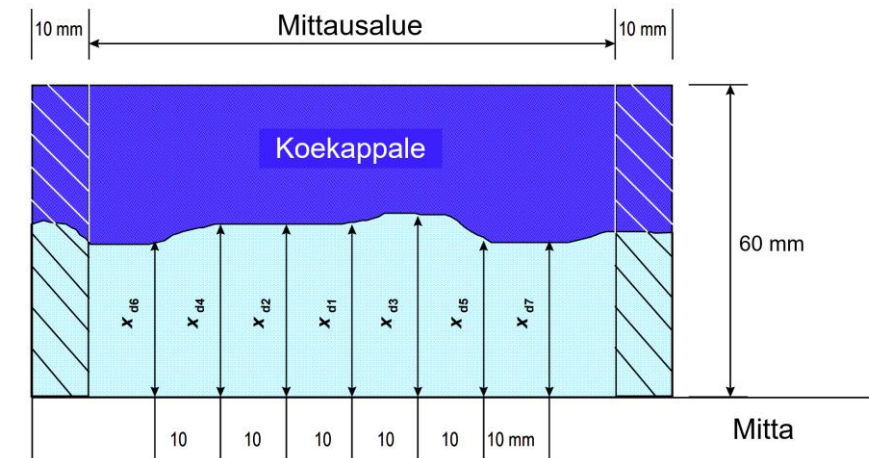
Koekappaleiden halkaisu, hopeanitraattikäsittely ja tunkeumasyydyden mittaus 9 kohdasta / betoninäyte

3 koekappaletta jokaisesta betonista

Migraatiokertoimen M_{nss} määrittäminen tunkeumasyydyden ja lähtötietojen avulla



Migraatiokokeen osien selitykset
 1 kumiputki 6 katolyttin säiliö
 2 anolytti 7 migraatiokammion teline
 3 anodi 8 katodi
 4 koekappale 9 virtalähde
 5 katolytti



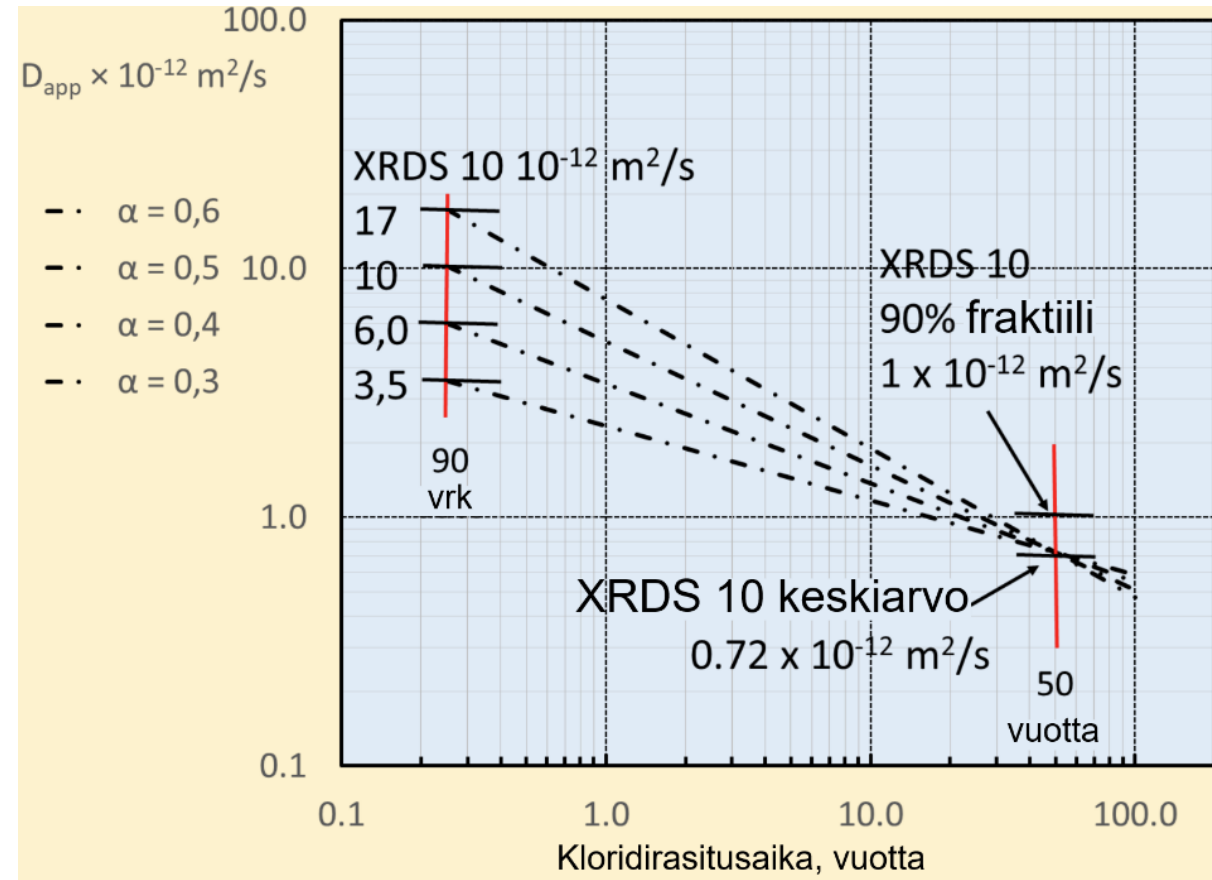
5. Betonien XRDS-luokitus (1/2)

Klorididiffuusiokokeesta saatiin betonin $D_{app}(t_0)$ eli kloridien tunkeutumisnopeus betoniin rasitushetkellä

Laskettiin $D_{app}(t)$ eli kloridien tunkeutumisnopeus betoniin ajanhetkellä $t = 50$ vuotta kaavalla

$$D_{app}(50v) = D_{app}(t_0) * \left(\frac{t_0}{50v}\right)^{\alpha}$$

Betonille määritettiin $D_{app}(50v)$:n 90% fraktiili olettaen 30% variaatiokerroin. Tätä fraktiilia pidettiin betonin XRDS-luokkaa kuvaavana arvona.



5. Betonien XRDS-luokitus (2/2)

Betonien jakautuminen XRDS-luokkiin [$\cdot 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$]						
Sideaineen nimi	Sideaineen määrä [kg/m^3] (AE = suojahuokostus)	Vesi-sideainesuhde				
		0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
CEM I (0% GGBS)	310	-	-	33	33	36
	310 AE	-	-	45	36	46
	460	17	25	25	-	-
	460 AE	20	27	33	-	-
CEM II/B (16% GGBS)	310	-	-	5	5	6
	310 AE	-	-	4	5	5
	460	3	3	4	-	-
	460 AE	3	4	4	-	-
CEM III/A (39% GGBS)	310	-	-	2	2	3
	310 AE	-	-	2	3	3
	460	1	2	2	-	-
	460 AE	1	2	2	-	-
CEM III/B (72% GGBS)	310	-	-	1	1	1
	310 AE	-	-	1	2	1
	460	1	1	1	-	-
	460 AE	1	1	1	-	-

Betonien XRDS-luokat

- GGBS = masuunikuona

6. Minimibetonipeitepaksuuksien mallinnus XRDS-luokille (1/3)

Minimibetonipeitepaksuus tietyllä rasitusluokassa tietyn XRDS-luokan betonilla laskettiin alla olevan kaavan avulla:

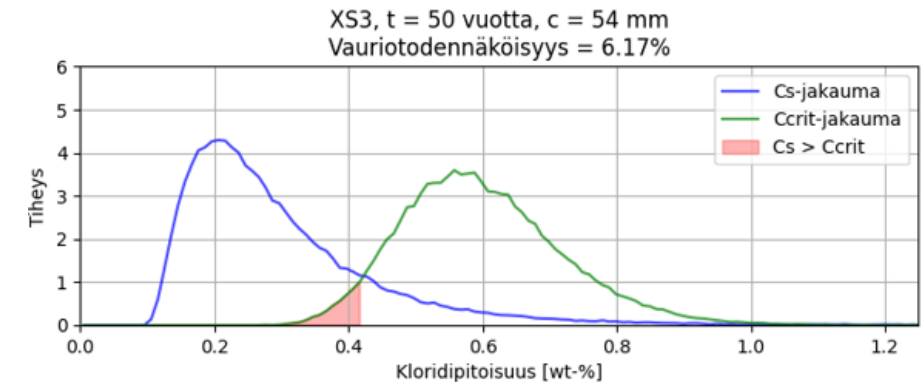
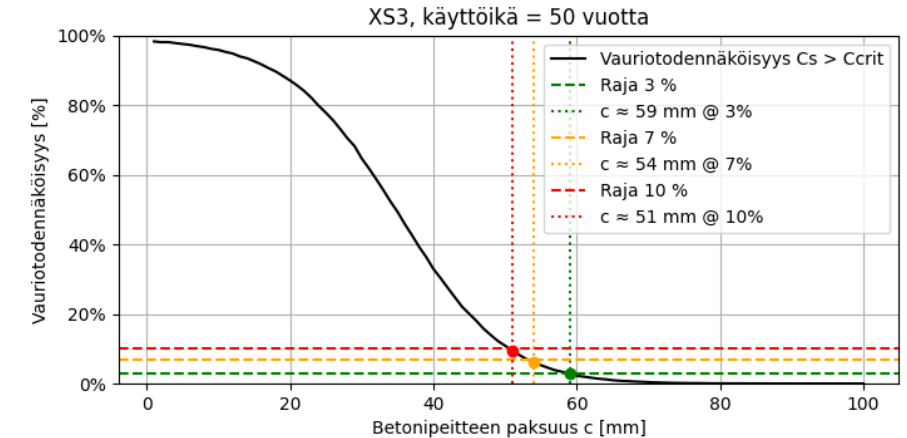
Kriittinen
kloridipitoisuus

Betonin kloridipitoisuus
raudoituksen syvyydellä

$c_{min,dur}$

$$C_{crit} = C_s = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) * (1 - \text{erf}\left(\frac{c - \Delta x}{2 * \sqrt{D_{app,C} * t_{ini}}}\right))$$

Laskenta suoritettiin kasvattamalla $c_{min,dur}$ -arvoa askelittain, kunnes betonin kloridipitoisuus kyseisellä syvyydellä alitti kriittisen kloridipitoisuuden riittävällä todennäköisyydellä. Saatu betonipeitepaksuus määritettiin arvoksi $c_{min,dur}$.



6. Minimibetonipeitepaksuuksien mallinnus XRDS-luokille (2/3)

Tärkeä ja haastava osa projektia oli suomalaisten ympäristöolosuhteiden mallintaminen, mikä tehtiin arvioimalla sopivat laskentaparametrit aiemmassa diassa esitettyyn kaavaan

Koska suomalaista dataa oli rajoitetusti saatavilla, tehtiin kaksi peitepaksuustaulukkoa, joiden väliin lopulliset arvot mahdollisesti asettuvat

Samasta syystä sovellettiin dataa muualta Euroopasta, mutta maksimikloridipitoisuuteen käytettiin myös suomalaista dataa

Laskentaparametreille tehtiin herkkyystarkastelu.

	Kriittinen kloridipitoisuus	Alkukloridipitoisuus	Konvektioalueen syvyys	Maksimikloridipitoisuus	Korroosionopeus	Sallittu korroosiosyvyys
Parametri	C_{crit} [p-%/sem]	C_0 [p-%/sem]	Δx [mm]	$C_{s,\Delta x}$ [p-%/sem]	V_{corr} [μm/vuosi]	P_{corr} [μm]
Jakauman tyyppi	LN	D	LN	LN	LN	D
XS1	$\mu = 0.60$ CV = 20%	$\mu = 0.10$	-	$\mu = 0.5/1.0$ CV = 45%	$\mu = 30$ CV = 110%	$\mu = 50$
XS2	$\mu = 0.60$ CV = 20%	$\mu = 0.10$	-	$\mu = 1.0/1.5$ CV = 25%	$\mu = 4.0$ CV = 40%	$\mu = 50$
XS3	$\mu = 0.60$ CV = 20%	$\mu = 0.10$	$\mu = 10$ CV = 50%	$\mu = 1.5/2.0$ CV = 45%	$\mu = 70$ CV = 90%	$\mu = 50$
XD1	$\mu = 0.60$ CV = 20%	$\mu = 0.10$	-	$\mu = 1.0/2.0$ CV = 75%	$\mu = 4.0$ CV = 30%	$\mu = 50$
XD2	$\mu = 0.60$ CV = 20%	$\mu = 0.10$	-	$\mu = 1.5/2.5$ CV = 75%	$\mu = 20$ CV = 120%	$\mu = 50$
XD3	$\mu = 0.60$ CV = 20%	$\mu = 0.10$	$\mu = 10$ CV = 50%	$\mu = 2.5/3.0$ CV = 75%	$\mu = 30$ CV = 110%	$\mu = 50$

Notes: LN = log-normaali, D = deterministinen eli vakioarvo.
Vihreitä parametrejä käytettiin alaraja-arvion mukaisessa mallinnuksessa ja punaisia parametrejä käytettiin yläraja-arvion mukaisessa mallinnuksessa.

6. Minimipeitepaksuuksien mallinnus XRDS-luokille (3/3)

Mallinnettuja peitepaksuuksia verrattiin tässä by 65:n mukaisiin peitepaksuuksiin

Mallinnetut peitepaksuudet on esitetty ilman sulkua ja nykyisten normien mukaiset peitepaksuudet ovat suluissa.

CEM III/B
CEM III/A
CEM II/B
CEM I

Raudoitusterästen minimipeitepaksuudet $c_{min,dur}$ kloridirasituksessa [mm] (alaraja-arvio)												
ERC	Rasitusluokka (kloridit)											
	XS1				XS2				XS3			
	Suunnittelukäyttöikä (vuosina)				Suunnittelukäyttöikä (vuosina)				Suunnittelukäyttöikä (vuosina)			
	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
XRDS 0,5	6 (30)	8 (35)	10 (35)	15 (40)	29 (40)	34 (45)	12 (30)	18 (35)	15 (35)	22 (40)	32 (40)	39 (45)
XRDS 1	8 (30)	12 (35)	13 (35)	20 (40)	34 (40)	42 (45)	16 (30)	25 (35)	22 (35)	31 (40)	39 (40)	50 (45)
XRDS 1,5	10 (30)	14 (35)	16 (35)	25 (40)	38 (40)	48 (45)	20 (30)	30 (35)	26 (35)	38 (40)	44 (40)	58 (45)
XRDS 2	11 (30)	16 (35)	19 (35)	29 (40)	42 (40)	54 (45)	23 (30)	35 (35)	30 (35)	44 (40)	49 (40)	64 (45)
XRDS 3	14 (30)	20 (35)	23 (35)	35 (40)	48 (40)	63 (45)	28 (30)	42 (35)	37 (35)	54 (40)	57 (40)	76 (45)
XRDS 4	16 (30)	23 (35)	26 (35)	40 (40)	54 (40)	71 (45)	32 (30)	49 (35)	43 (35)	62 (40)	64 (40)	86 (45)
XRDS 5	18 (30)	25 (35)	29 (35)	45 (40)	58 (40)	77 (45)	36 (30)	55 (35)	48 (35)	69 (40)	70 (40)	94 (45)
XRDS 6	19 (30)	28 (35)	32 (35)	49 (40)	63 (40)	84 (45)	39 (30)	60 (35)	52 (35)	76 (40)	75 (40)	102 (45)
XRDS 8	22 (30)	32 (35)	37 (35)	57 (40)	70 (40)	95 (45)	45 (30)	69 (35)	60 (35)	87 (40)	85 (40)	116 (45)
XRDS 10	25 (30)	35 (35)	41 (35)	63 (40)	77 (40)	104 (45)	50 (30)	77 (35)	67 (35)	97 (40)	93 (40)	129 (45)
Väriskaala												
-90 -55 -40 -25 0 5 10 15 25												
Väriskaala ilmaisee eroa laskettujen ja nykyisten normien mukaisten peitepaksuuksien välillä: punainen tarkoittaa, että laskettu peitepaksaus on suurempi, ja vihreä tarkoittaa, että nykyisten normien mukainen arvo on suurempi.												

Raudoitusterästen minimipeitepaksuudet $c_{min,dur}$ kloridirasituksessa [mm] (yläraja-arvio)												
ERC	Rasitusluokka (kloridit)											
	XS1				XS2				XS3			
	Suunnittelukäyttöikä (vuosina)				Suunnittelukäyttöikä (vuosina)				Suunnittelukäyttöikä (vuosina)			
	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
XRDS 0,5	12 (30)	17 (35)	12 (35)	19 (40)	31 (40)	37 (45)	16 (30)	24 (35)	18 (35)	26 (40)	33 (40)	41 (45)
XRDS 1	17 (30)	24 (35)	17 (35)	26 (40)	37 (40)	46 (45)	22 (30)	33 (35)	26 (35)	37 (40)	40 (40)	52 (45)
XRDS 1,5	20 (30)	29 (35)	21 (35)	32 (40)	42 (40)	53 (45)	27 (30)	41 (35)	31 (35)	45 (40)	46 (40)	60 (45)
XRDS 2	23 (30)	33 (35)	24 (35)	37 (40)	46 (40)	59 (45)	31 (30)	47 (35)	36 (35)	53 (40)	51 (40)	67 (45)
XRDS 3	28 (30)	41 (35)	30 (35)	45 (40)	53 (40)	70 (45)	37 (30)	57 (35)	44 (35)	64 (40)	59 (40)	80 (45)
XRDS 4	33 (30)	47 (35)	34 (35)	52 (40)	59 (40)	78 (45)	43 (30)	66 (35)	51 (35)	74 (40)	67 (40)	90 (45)
XRDS 5	37 (30)	52 (35)	38 (35)	58 (40)	64 (40)	86 (45)	48 (30)	74 (35)	57 (35)	83 (40)	73 (40)	99 (45)
XRDS 6	40 (30)	57 (35)	42 (35)	64 (40)	69 (40)	93 (45)	53 (30)	81 (35)	63 (35)	91 (40)	79 (40)	107 (45)
XRDS 8	46 (30)	66 (35)	48 (35)	74 (40)	78 (40)	106 (45)	61 (30)	93 (35)	72 (35)	104 (40)	89 (40)	122 (45)
XRDS 10	51 (30)	74 (35)	54 (35)	82 (40)	86 (40)	117 (45)	68 (30)	104 (35)	81 (35)	117 (40)	98 (40)	135 (45)
Väriskaala												
-90 -65 -45 -30 0 5 10 15 25												
Väriskaala ilmaisee eroa laskettujen ja nykyisten normien mukaisten peitepaksuuksien välillä: punainen tarkoittaa, että laskettu peitepaksaus on suurempi, ja vihreä tarkoittaa, että nykyisten normien mukainen arvo on suurempi.												

7. Yhteenveto ja johtopäätökset

Kokeelliset tulokset

Seuraavat betonin ominaisuudet parantavat betonin suorituskykyä kloridien tunkeutumista vastaan:

Masuunikuonan määrän kasvattaminen

Sideainemäärän kasvattaminen

Vesi-sideainesuhteen pienentäminen

Ilmamäärän pienentäminen.

Migraatiokoe on kokeista nopeampi, mutta diffuusiokoe on tarkempi.

Betonien XRDS-luokitus

XRDS-luokat saattavat vielä muuttua, sillä etenkin ikäkertoimessa on tarkennettavaa.

Uudessa eurokoodissa on 10 eri XRDS-luokkaa; kansallisesti saatetaan valita vain esim. 3.

Betonin XRDS-luokka voidaan määrittää betonitoimittajan ennakkokokeiden perusteella tai käyttämällä konservatiivista koostumustaulukkoa.

Betonipeitepaksuuksien mallinnus

CEM I on käytännössä käyttökelvoton kloridirasituksessa.

Mallinnetut peitepaksuudet ovat johdonmukaisia ja samaa kokoluokkaa muiden tutkimusten tulosten kanssa.

Suomalaista kloriditutkimusdataa liian vähän peitepaksuuksien tarkkaan mallintamiseen → jatkotutkimustarve

8. Lähteet

Standardit:

SFS-EN 12390-11 (klorididiffuusiokoe)

SFS-EN 12390-18 (kloridimigraatiokoe)

SFS-EN 14629 (kloridipitoisuuden määrittäminen)

Lähteet XRDS-luokituksessa ja peitepaksuuksien mallintamisessa käytettyihin arvoihin:

fib Bulletin 34, 76 & 112 ja näiden lähteet

Eurokoodin taustadokumentit CEN/TC 104 N241, N396 ja N434 ja näiden lähteet

VTT:n kenttädata

Linkki tutkimusryhmän sivulle, täältä löytyy myös julkaisut:

<https://research.tuni.fi/betonirakenteet/tutkimus/tutkimuskokonaisuudet/vahahiilisten-betonien-sailyvyysmitoitus/>

KIITOS, KYSYTTÄVÄÄ?