Betonin säilyvyysvaatimukset
Rasitusluokat
Vauriomekanismit

Betonilaborantti- ja myllärikurssi,
22.1.2025
Kim Johansson

Kim Johansson
Erityisasiantuntija , DI
Suomen Betoniyhdistys ry

Rasitusluokat

Ympäristön rasitusluokat koostuvat kuudesta pääluokasta:

- Ei korroosion tai rasituksen vaaraa (X0)
- Karbonatisoitumisen aiheuttama betoniterästen korroosio (XC)
- Muun kuin meriveden kloridien aiheuttama korroosio (XD)
- Meriveden kloridien aiheuttama korroosio (XS)
- Jäädytys-sulatusrasitus jäänsulatusaineilla tai ilman niitä (XF)
- Kemiallinen rasitus (XA)

Rasitusluokat

Taulukko 2.1. Betonirakenteen rasitusluokat.

Luokka	Ympäristön kuvaus	Informatiivisia esimerkkejä rasitusluokkien esiintymisestä
1 Ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä		
X0	Raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni: kaikkiin ympäristöihin lukuun ottamatta niitä, joissa esiintyy jäätymis-sulamis- tai kulutusrasitusta tai kemiallista rasitusta. Raudoitettu tai metallia sisältävä betoni: hyvin kuiva	Betoni sisätiloissa, jossa ilman kosteus on hyvin alhainen. Kuivat lämmitetyt sisätilat. Ilman suhteellinen kosteus (RH) on suurimman osan vuotta < 50 %

2 Karbonatisoitumisen vaikutuksesta aiheutuva korroosio		
Jos raudoitusta tai muita metalliosia sisältävä betoni on alttiina ilmalle ja kosteudelle, rasitus luokitellaan seuraavasti:		
XC1	Kuiva tai jatkuvasti märkä	Sisätilat, joissa on alhainen kosteuspitoisuus. Jatkuvasti vedenpinnan alla olevat rakenteet. Kylpyhuoneet, porraskäytävät, vedenpinnan alaiset rakenteet. Kerroksellisen seinärakenteen sisäkuori. Siltojen vedenalaiset osat.
XC2	Kostea, harvoin kuiva	Pitkiä aikoja veden kanssa kosketuksissa olevat rakenteiden osat. Useimmat perustukset. Siltojen perustukset, siirtymälaatat.
XC3	Kohtalaisen kostea	Betoni sisätiloissa, joissa kohtalainen tai korkea ilman kosteus. Ulkona olevat osittain tai kokonaan sateelta suojatut rakenteet. Sateelta suojatut julkisivut, muut pystysuorat ulkona olevat, sateelta suojattujen rakenteiden pinnat. Pysäköintitasojen laatat. Uimahallit, saunat, suurkeittiöt, monet teollisuusrakennukset. Siltojen sateelta suojatut päällysrakenteen osat kuten kansilaatan alapinnat ja palkit, sateelta suojatut pilarit, tukimuurit, maa- ja välituet.
XC4	Jaksollinen kastuminen ja kuivuminen	Betonipinta kosketuksissa veden kanssa eikä kuulu rasitusluokkaan XC2. Parvekelaatat, sateelle alttiit julkisivut, sokkelit. Siltojen sateelle alttiit osat kuten reunapalkit, maatukien sivupinnat, tukimuurit, pilarit.

Rasitusluokat

- Karbonatisoitumisella tarkoitetaan ilman hiilidioksidin reagoimista sementtikiven kalsiumhydroksidin ja kalsiumsilikaatti-hydraattigeelin kanssa
- Karbonatisoituminen on nopeaa kuivissa olosuhteissa
- Teräskorroosiota ei kuitenkaan esiinny kuivissa olosuhteissa (X0)

Rasitusluokat

- Hyvin märissä olosuhteissa karbonatisoituminen on hyvin hidasta koska betonin huokoset ovat täynnä vettä eikä hiilidioksidi pääse tunkeutumaan betoniin joten korroosio on vähäistä (XC1,2)

- Korroosioriski on suurin kun betonin on niin märkää että teräs ruostuu, mutta myös sen verran kuiva että se voi karbonatisoitua.

- Olosuhteet jossa betonin kosteuspitoisuus vaihtelee ovat siten ankarampia kuin sellaiset jossa betoni on jatkuvasti kuiva tai hyvin märkä (XC3,4)

3 Muun kuin meriveden kloridien aiheuttama korroosio		
Jos raudoitusta tai muita metalliosia sisältävä betoni on kosketuksissa veden kanssa, joka sisältää muista lähteistä kuin merivedestä peräisin olevia klorideja (kloridilähde voi olla myös jäänpoistoaine), rasitus luokitellaan seuraavasti:		
XD1	Kohtalaisen kostea	Betonia rasittavat ilmavirran mukana tulevat suolat. Meluseinät tien vieressä. Uimahallien sisätilat.
XD2	Kostea, harvoin kuiva	Betonia rasittavat klorideja sisältävät teollisuus-vedet. Uima-altaat.
XD3	Jaksollinen kastuminen ja kui-vuminen	Suoloja sisältäville roiskeille tai suolaukselle alttiit osat. Pysäköintitasot, lämmitetyt autotallit. Silto-jen tiesuoloille alttiit osat kuten reunapalkit, siirty-mälaatat, betonikaiteet, suolasumulle alttiit silta-pilarit sekä väli- ja maatuet.

4 Meriveden kloridien aiheuttama korroosio

Jos raudoitusta tai muita metalliosia sisältävä betoni on alttiina klorideille, jotka ovat peräisin merivedestä tai ilman kuljettamasta merivedestä peräisin olevasta suolasta, rasitus luokitellaan seuraavasti:

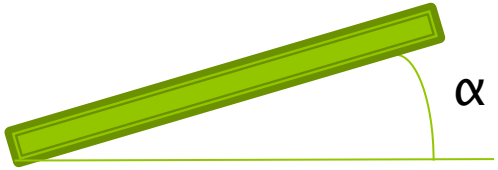
XS1	Kosketuksissa ilman kuljettaman suolan kanssa, mutta ei suorassa kosketuksessa meriveteen	Rakenteet avomeren rannalla.
XS2	Pysyvästi meriveden alla	Merirakenteiden ja siltojen merivedenalaiset osat.
XS3	Meriveden vesirajassa ja roiskevyöhykkeellä	Merirakenteiden ja siltojen meriveden vaihtelu- ja roiskevaikutuksille alttiit osat kuten välituet.

5 Jäätymis-sulamisrasitus jäänsulatusaineilla tai ilman niitä		
Jos betoni on märkä ja siihen kohdistuu kosteuden lisäksi merkittäviä jäätymis-sulamisrasituksia, rasitus luokitellaan seuraavasti:		
XF1	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat. Julkisivut, sokkelit. Suolaamattomien teiden siltojen osat kuten kansilaatta, palkit, maa- ja välituet.
XF2	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat, jotka ovat alttiina jäätymiselle ja ilman kuljettamalle jäänsulatusaineille. Meluseinät ja sokkelit tien vieressä. Suolattavien teiden siltojen osat kuten päällysrakenteen palkit ja kansilaatat, maa- ja välituet.
XF3	Suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat. Parvekkeet, siltapilarit ja muut rakenteet sisävesien vesirajassa, patorakenteet, makean veden altaat. Suolaamattomien teiden siltojen osat kuten reunapalkit, siirtymälaatat, pilarimaiset välituet, rengaskehäsiltojen peruslaatat ja vesistösiltojen suojaamattomat vedenvaihtelualueen rakenteet.
XF4	Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet tai merivesi	Suoralle jäänsulatusaineroiskeelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat ja jäänsulatusaineille alttiit teiden siltojen kannet. Pysäköintitasot, päällysteet, autotallit. Suolattavien teiden siltojen reunapalkit, siirtymälaatat, betonikaiteet, rengaskehän peruslaatat. Välituet, kun sillan alittavaa tietä suolataan. Meressä olevan sillan suojaamattomat rakenteet tasolta NW-1 ylöspäin.

Rasitusluokat

- Vaakarakenteeksi voi luokitella rakenneosan jonka kaltevuuskulma on $< 30\,^{\circ}$ vaakatasoon nähden

- Muut pinnat ovat pystypintoja



$\alpha < 30\,^{\circ}$ = vaakapinta

6 Kemiallinen rasitus		
Jos betoniin kohdistuu luonnon maaperästä ja pohjavedestä aiheutuva kemiallinen rasitus, rasitus luokitellaan seuraavasti:		
XA1	Kemiallisesti heikosti aggressiivinen ympäristö	Betoniin kohdistuu luonnon maaperästä ja pohjavedestä aiheutuva kemiallinen rasitus taulukon 2.2 mukaisesti.
XA2	Kemiallisesti kohtalaisesti aggressiivinen ympäristö	Betoniin kohdistuu luonnon maaperästä ja pohjavedestä aiheutuva kemiallinen rasitus taulukon 2.2 mukaisesti.
XA3	Kemiallisesti voimakkaasti aggressiivinen ympäristö	Betoniin kohdistuu luonnon maaperästä ja pohjavedestä aiheutuva kemiallinen rasitus taulukon 2.2 mukaisesti.

Kemiallisen rasituksen luokitus

Taulukko 2.2. Luonnon maaperän ja pohjaveden aiheuttaman kemiallisen rasituksen rasitusluokkien raja-arvot.

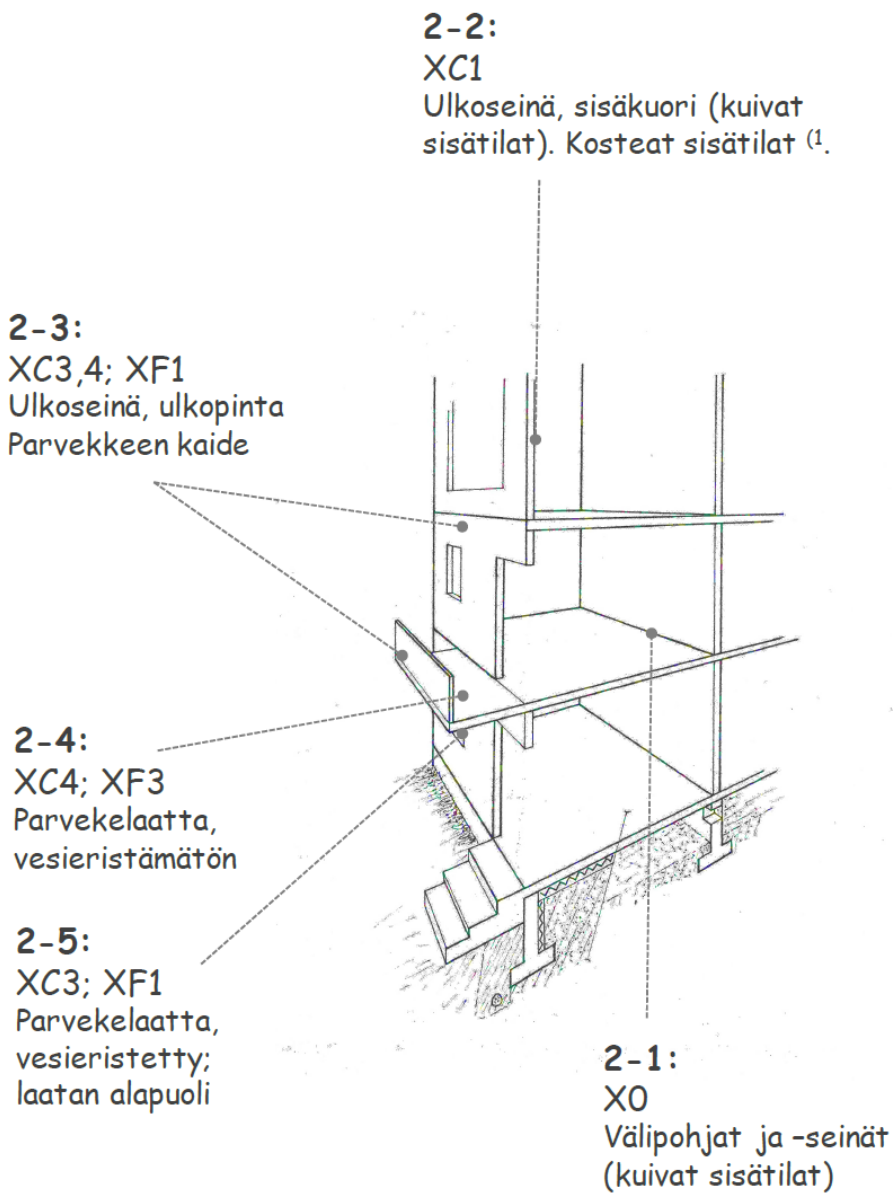
Kemiallinen ominaisuus	Koemenetelmä	XA1	XA2	XA3
Pohjavesi				
SO_4^{2-} mg/l	SFS-EN 196-2	≥ 200 ja ≤ 600	> 600 ja ≤ 3000	> 3000 ja ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 ja ≥ 5,5	< 5,5 ja ≥ 4,5	< 4,5 ja ≥ 4,0
CO_2 mg/l aggressiivinen	SFS-EN 13577	≥ 15 ja ≤ 40	> 40 ja ≤ 100	> 100 kyllästymiseen asti
NH_4^+ mg/l	ISO 7150-1	≥ 15 ja ≤ 30	> 30 ja ≤ 60	> 60 ja ≤ 100
Mg^{2+} mg/l	EN ISO 7980	≥ 300 ja ≤ 1000	> 1000 ja ≤ 3000	> 3000 kyllästymiseen asti
Maaperä				
SO_4^{2-} mg/kg[a] kokonaismäärä	SFS-EN 196-2[b]	≥ 2000 ja ≤ 3000[c]	> 3000[c] ja ≤ 12000	>12000 ja ≤ 24000
Happamuus Baumann Gullyn mukaisesti ml/kg	prEN 16502	> 200	Ei esiinny käytännössä	

a) Savimaat, joiden läpäisevyys on pienempi kuin 10^{-5} m/s, voidaan luokitella alempaan luokkaan.

b) Testausmenetelmän periaate on uuttaa SO_4^{2-} suolahapolla. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää vesiuuttoa, jos betonin käyttöpaikalla on siitä kokemusta.

c) Raja-arvo 3000 mg/kg lasketaan arvoon 2000 mg/kg, jos betonin toistuva kuivuminen ja kastuminen tai kapillaarinen kastuminen saattavat aiheuttaa betoniin sulfaatti-ionien kasaantumisriskin.

Kerrostalon osien sijoittuminen rasitusluokkiin (by68)



1) Kosteat sisätilat: Esim. kosteuseristämättömät pesutilojen rakenteet yms.

Betonipeitevaatimukset

Taulukko 2.3. Betonipeitteen vähimmäisarvo $c_{min,dur}$ (nimellisarvo - sallittu mittapoikkeama) säilyvyyden suhteen eri rasitusluokissa. Vaatimukset eivät koske XC-rasitusluokissa B600KX raudoitusta. Taulukon arvoista voidaan poiketa käytettäessä liitteen 3 mukaista laskennallista mitoitusta.

Rasitusluokka	Betonipeitteen vähimmäisarvo 50 vuoden käyttöiälle [mm]		Betonipeitteen vähimmäisarvo 100 vuoden käyttöiälle [mm]	
	Betoni-teräs	Jänneteräs	Betoni-raudoitus	Jänneteräs
X0	10	10	10	10
XC1	10	20	10	20
XC2	20	30	25	35
XC3, XC4	25	35	30	40
XS1, XD1	30	40	35	45
XS2, XD2	35	45	40	50
XS3, XD3	40	50	45	55

Betonin koostumusvaatimukset kun käyttöikä 50 vuotta (by 65 2021 6. painos 2023)

Taulukko 2.8. Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta.

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosion tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio				Kloridien aiheuttama korroosio						Jäätymis-sulamisrasitus[1]				Aggressiivinen kemiallinen rasitus		
						Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä									
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1[2]	XF2	XF3[2]	XF4	XA1	XA2	XA3
Tehollinen vesi-sideainesuhde (v/s) 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 sideaine-määrä (kg/m³) vähintään		160	160	250	250	300	320	320	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330
Ilmamäärä (%) [4]												4,0[3]	5,0[3]	4,0[3]	5,0[3]			
Seosainekertoimet																		
Silika v/s ≤ 0,45	2,00		2,00			2,00			2,00			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
v/s ≥ 0,45	1,00		1,00			2,00			2,00			1,00	1,00	1,00	1,00	2,00		
Lentotuhka[5]	1,00		0,40			0,40			0,40			1,00	0,40	1,00	0,40	0,40		
Masuunikuona	1,00		1,00			1,00			1,00			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		

1) Lisäksi pakkasenkestävyyden vaatimukset taulukon 5.5 mukaan. HUOM! XF-rasitusluokkien vaatimukset eivät koske ns. pakkasbetonia, paitsi milloin sille on määritetty XF-rasitusluokka.

2) Betonin tehollisen vesi-sideainesuhteen ja ilmamäärän yhdistelmä voidaan määrittää vaihtoehtoisesti F-lukumenettelyllä (liite 3). Tällöin tämän taulukon sarakkeissa XF1 ja XF3 esitettyjen tehollisen vesi-sideainesuhde- tai ilmamäärävaatimusten ei tarvitse täyttyä, mutta betonin F-lukuvaatimuksen tulee täyttyä. 50 vuoden suunnittelukäyttöiällä F-lukuvaatimus rasitusluokassa XF1 on 1,0 ja rasitusluokassa XF3 1,5. F-luvun arvoja tehollisen vesi-sideainesuhteen, ilmamäärän ja kiviaineksen ylänimellisrajan funktiona on esitetty taulukossa L3.4.

3) Ilmamäärävaatimus koskee betonia, jossa kiviaineksen ylänimellisraja on vähintään 16 mm. Ylänimellisrajan ollessa 12 mm ilmamäärävaatimusta nostetaan 0,5 prosenttiyksikköä ja ylänimellisrajan ollessa 8 mm 1,0 prosenttiyksikköä.

4) Yli 7 % tavoiteilmamäärä ei ole suositeltava.

5) Lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvona pidetään 0 siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde ylittää arvon 0,33 rasitusluokkia 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 (by 65 2021 6. painos 2023)

Taulukko 2.9. Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun suunnittelukäyttöikä on 100 vuotta.

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosion tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio				Kloridien aiheuttama korroosio						Jäätymis-sulamisrasitus[1]				Aggressiivinen kemiallinen rasitus		
						Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä									
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1[2]	XF2	XF3[2]	XF4	XA1	XA2	XA3
Tehollinen vesi-sideainesuhde (v/s) 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
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	C35/45	C30/37	C40/50	C30/37	C35/45	C40/50
Tehollinen sideaine-määrä (kg/m³) vähintään		160	160	250	250	300	320	340	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330
Ilmamäärä (%)[5]												5,5[3]	5,0[3]	5,5[3]	5,0[3]			
Seosainekertoimet																		
Silika v/s ≤ 0,45	2,00	2,00				2,00			2,00			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
v/s ≥ 0,45	1,00	1,00				2,00			2,00			1,00	1,00	1,00	1,00	2,00		
Lentotuhka[4]	1,00	0,40				0,40			0,40			1,00	0,40	1,00	0,40	0,40		
Masuunikuona	1,00	1,00				1,00			1,00			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		

1) Lisäksi pakkasenkestävyyden vaatimukset taulukon 5.5 mukaan. HUOM! XF-rasitusluokkien vaatimukset eivät koske ns. pakkasbetonia, paitsi milloin sille on määritetty XF-rasitusluokka.

2) Betonin tehollisen vesi-sideainesuhteen ja ilmamäärän yhdistelmä voidaan määrittää vaihtoehtoisesti F-lukumenettelyllä (liite 3). Tällöin tämän taulukon sarakkeissa XF1 ja XF3 esitettyjen tehollisen vesi-sideainesuhde- tai ilmamäärävaatimusten ei tarvitse täyttyä, mutta betonin F-lukuvaatimuksen tulee täyttyä. 100 vuoden suunnittelukäyttöiällä F-lukuvaatimus rasitusluokassa XF1 on 2,0 ja rasitusluokassa XF3 3,0.
F-luvun arvoja tehollisen vesi-sideainesuhteen, ilmamäärän ja kiviaineksen ylänimellisrajan funktiona on esitetty taulukossa L3.4

3) Ilmamäärävaatimus koskee betonia, jossa kiviaineksen ylänimellisraja on vähintään 16 mm. Ylänimellisrajan ollessa 12 mm ilmamäärävaatimusta nostetaan 0,5 prosenttiyksikköä ja ylänimellisrajan ollessa 8 mm 1,0 prosenttiyksikköä.

4) Lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvona pidetään 0 siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde ylittää arvon 0,33 rasitusluokkia 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.

5) Yli 7 %:n tavoiteilmamäärä ei ole suositeltava.

Betonin karbonatisoituminen ja teräskorroosio

Teräskorroosio

- Raudoituksen korroosio on sähkökemiallinen ilmiö, jossa raudan yhdisteet pyrkivät muuttumaan takaisin niiksi yhdisteiksi, joina sitä luonnossa esiintyy.

- Betonin teräskorroosiota ehkäisevä vaikutus perustuu sen fysikaaliseen ja kemialliseen suojavaikutukseen.

- Betoni antaa fysikaalisen suojan teräksille siten, että korroosion kannalta välttämättömien aineiden, hapen ja veden, ja korroosiota edistävien aineiden kuten kloridien tunkeutuminen terästen läheisyyteen hidastuu. Fysikaalisen suojan tehokkuus riippuu betonipeitteen tiiviydestä ja paksuudesta.

Teräskorroosio

- Kemiallinen suojavaikutus perustuu betonin luontaiseen emäksisyyteen ja teräksen kykyyn muodostaa pinnalleen tiiviskorroosiolta suojaava oksidikalvo emäksisessä ympäristössä.

- Betonin emäksisyys on peräisin pääasiallisesti sementin hydrataatiossa syntyneestä kalsiumhydroksidista.

- Portlandsementistä valmistetun betonin huokosveden pH-arvo on tavallisesti noin 13. Kun betonin emäksisyys laskee arvon 9 alapuolelle, betonin kemiallinen suojavaikutus häviää ja raudoitus menettää passiivisuutensa. Tällöin teräksen korroosio voi alkaa.

- HUOM! Kloridirasitetuissa rakenteissa ruostuminen voi alkaa vaikka ympäristö olisi emäksinen

Karbonatisoituminen

Sementtikiven karbonatisoituminen voidaan yksinkertaisesti esittää reaktioyhtälöllä:

$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

Näin emäksinen kalsiumhydroksidi muuttuu neutraaliksi kalsiumkarbonaatiksi ja betoni pH laskee.

Ilman hiilidioksidipitoisuus on noin 0,3 ‰

Karbonatisoitumisnopeus

- Siihen, kuinka nopeasti karbonatisoitunut kerros etenee betonissa vaikuttaa merkittävästi kaksi seikkaa:
  - Betonin tiiveys
  - Betonin kosteustila
  - Kun betoni on tiivistä ja huokoisuus pieni niin hiilidioksidin tunkeutuminen on hidasta.
  - Samoin jos betoni on märkää eli huokoset täynnä vettä on hiilidioksidin vaikea tunkeutua betoniin

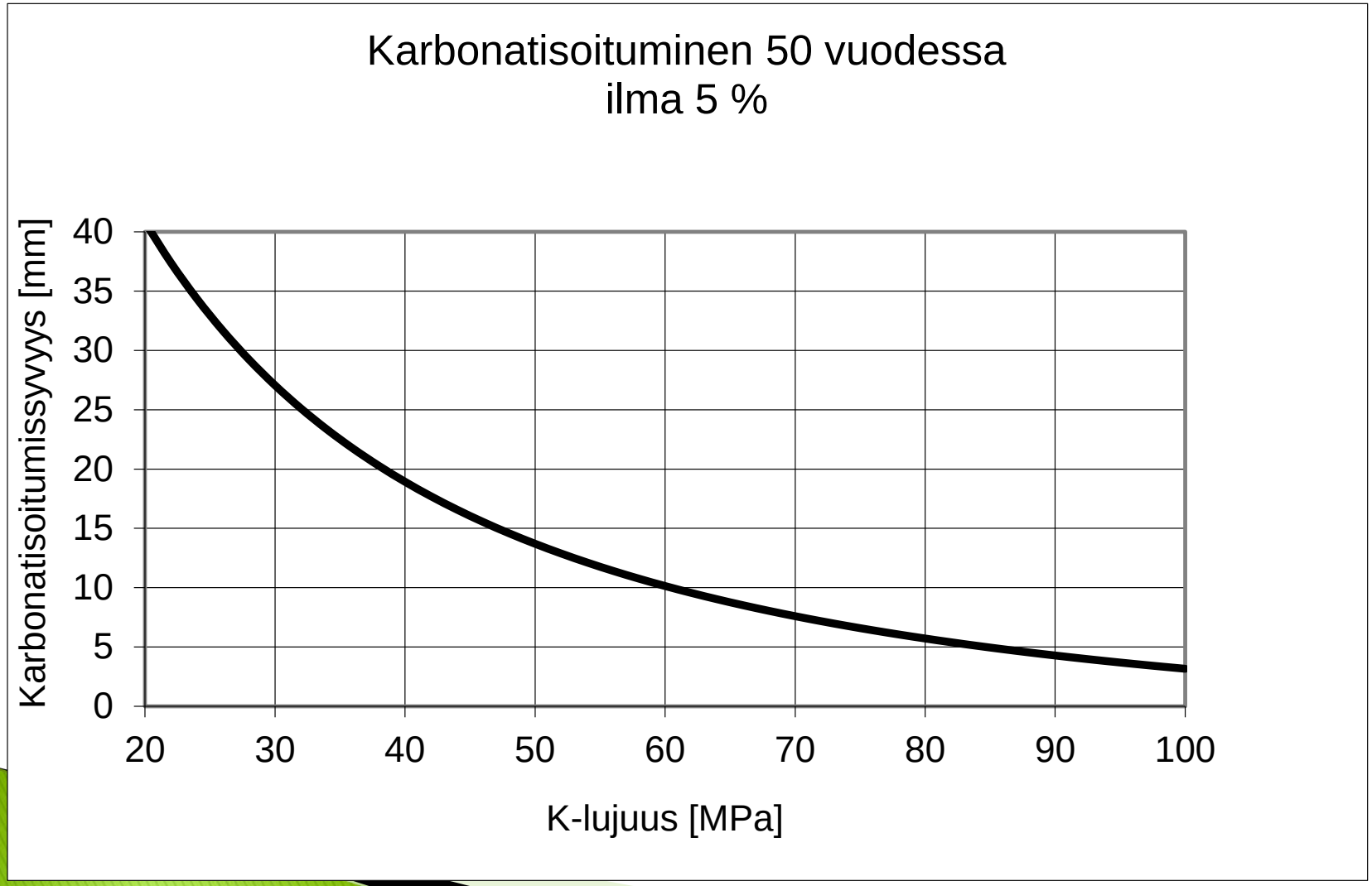
Karbonatisoitumisnopeus

- Betonin tiiveyttä kuvaa parhaiten vesi-sementtisuhde, (käytännöllisistä seikoista johtuen suunnittelu-normeissa käytetään mittarina kuitenkin lujuutta)

- Karbonatisoituminen on nopeaa silloin, kun kapillaarihuokoset ovat ilmatäytteisiä, eli käytännössä sateelta suojassa olevissa sisä-rakenteissa

- Nopeimmillaan karbonatisoituminen on noin 50% suhteellisessa kosteudessa.

Karbonatisoitumisnopeus sateelta suojassa



Karbonatisoitumissyvyys noudattaa kaavaa

$$d = k \cdot \sqrt{t}$$

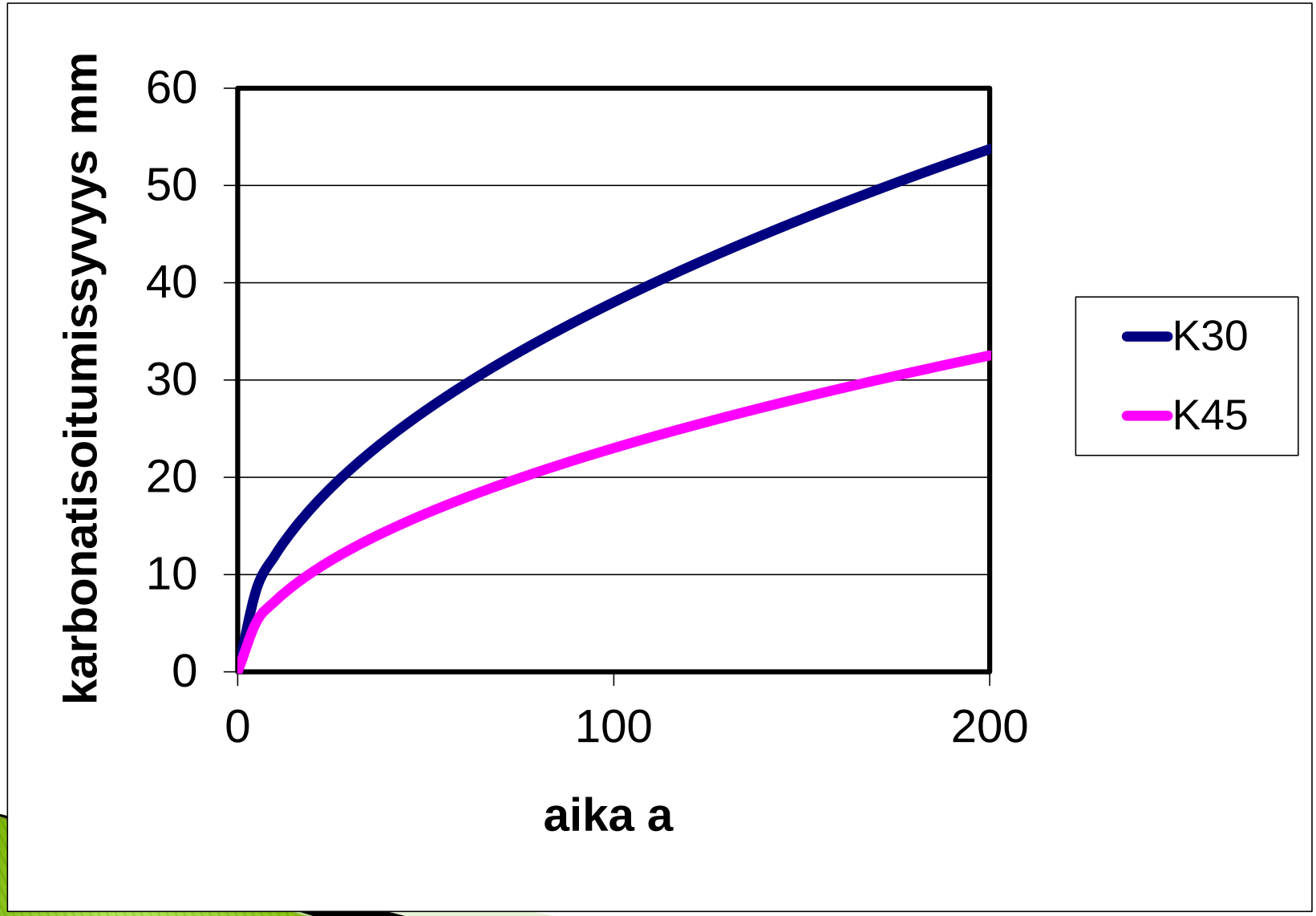
missä d on karbonatisoitumissyvyys

k on kerroin

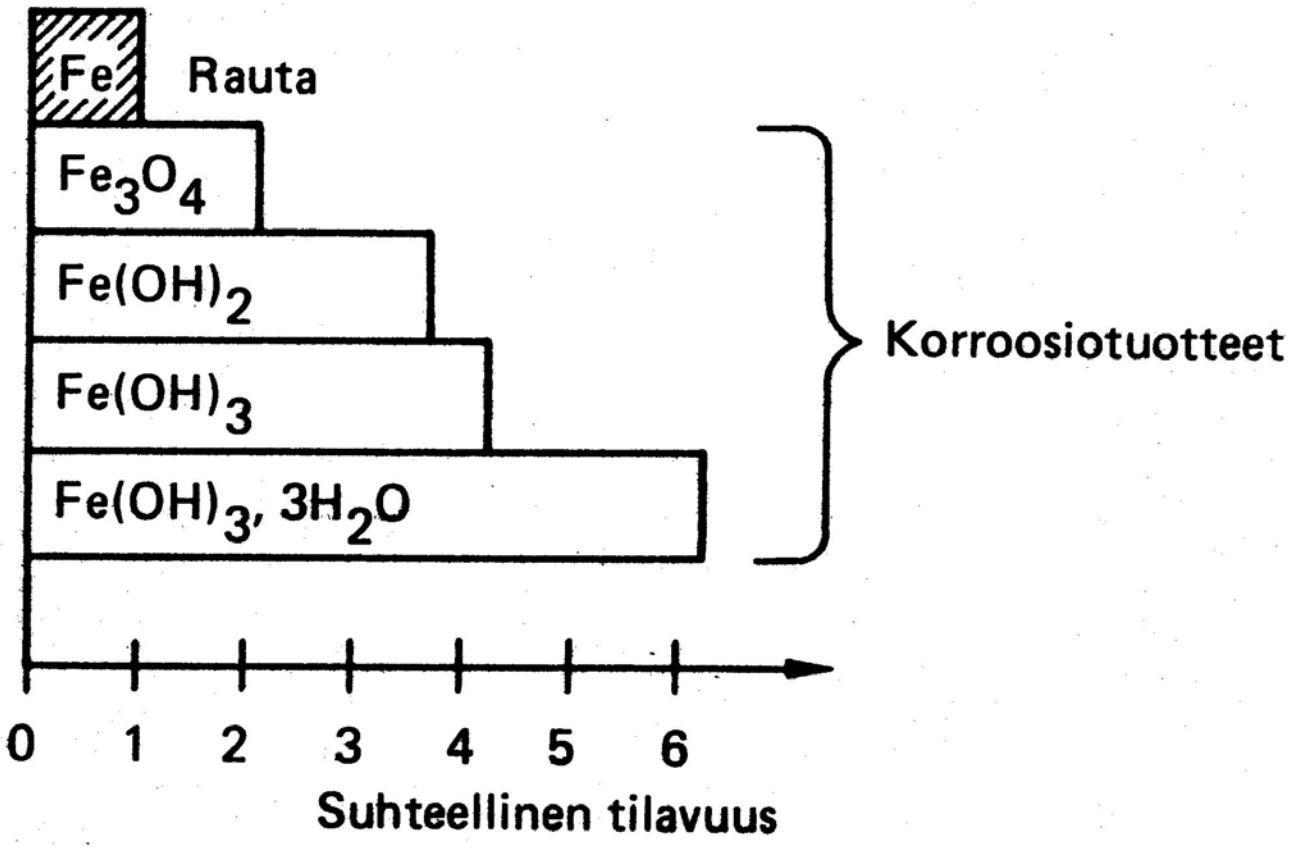
t on aika

Edellisen esimerkkikäyrän avulla saadaan huokostetulle C25/30 betonille k arvoksi 3,8 ja C35/45 betonille 2,3

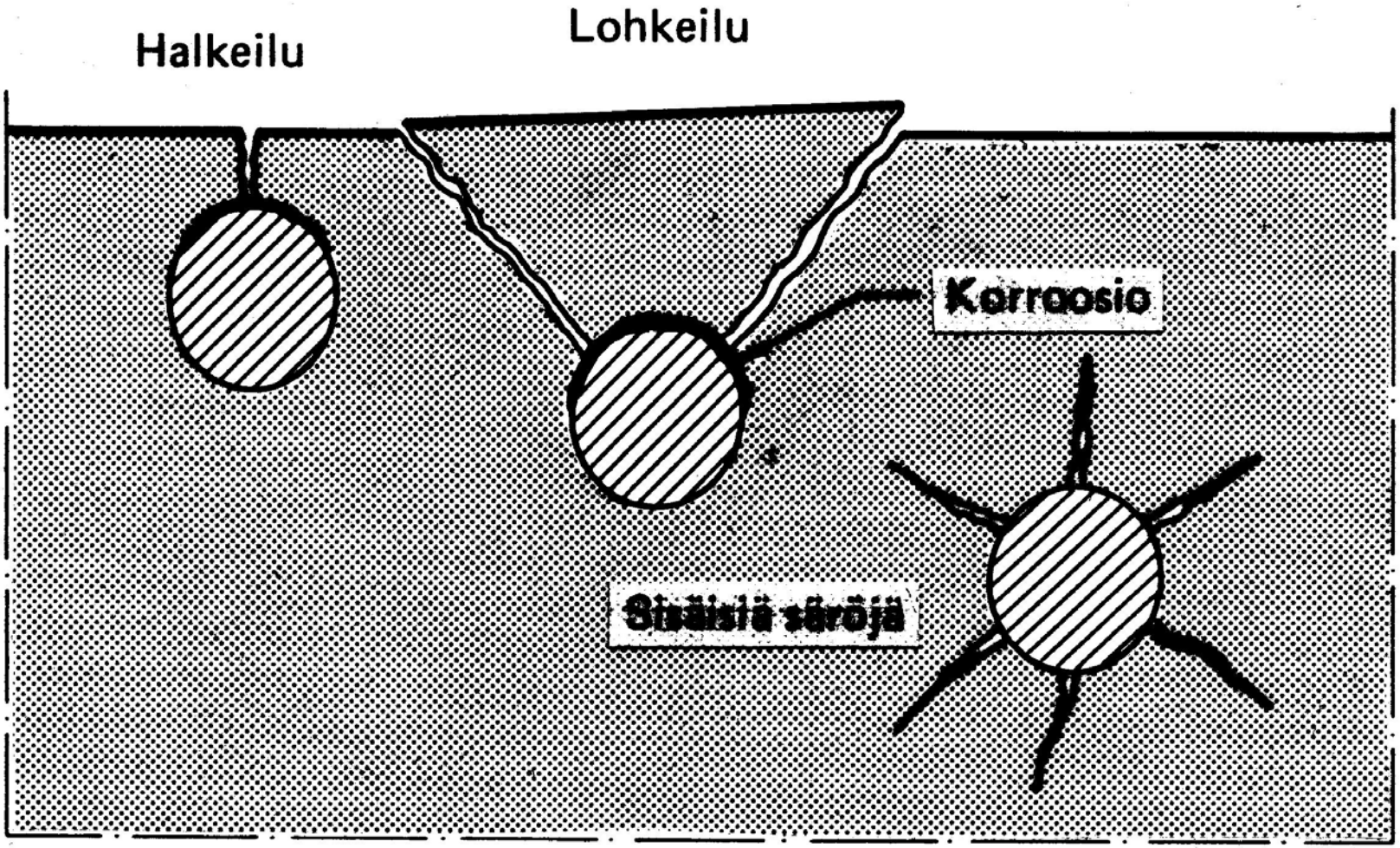
Karbonatisoitumisyvyys vs aika



Korroosiotuotteet



Korroosiotuotteiden suuri tilavuus aiheuttaa terästen paisumista, joka johtaa



30 vuotta vanha ulkona sateelta suojassa ollut rakenne bukarestilaisella metroasemalla (kuva Risto Mannonen)

Kloridien vaikutus korroosioon

- Teräkset saattavat ruostua myös emäksisessä betonissa, mikäli betonin kloridipitoisuus on riittävän suuri.

- Kloridit (suolat) voivat joutua betoniin joko ympäristöstä, eli merivedestä tai jäänsulatusaineista tai betonin kloridipitoisista osa-aineista kuten betonin valmistukseen käytetty merivesi, kiviaines tai lisäaineet.

Kloridin vaikutus korroosioon (jatkuu)

- Maailmanlaajuisesti kloridialtistus on merkittävin betonirakenteiden käyttöikää rajoittava tekijä. Erityisesti merirakenteet ovat tälle alttiina.
- Suomessa merkittävimmät kloridin aiheuttamat vauriot ovat aiheutuneet kloridipohjaisten kiihdyttimien käytöstä. Näistä on jo nykyisin luovuttu kokonaisuudessaan.
- Tänä päivänä teiden suolaus lienee merkittävin kloridikorroosion aiheuttaja.
- Suomen rannikkoalueen meriveden kloridipitoisuus on sen verran alhainen verrattuna valtameriin että kloridirasitus on selvästi pienempi täällä

Kloridin vaikutus korroosioon (jatkuu)

Tavat, joilla kloridikorroosiota vastaan voidaan suojautua ovat mm.

- Seosaineiden (esim. silika) käyttö betonissa hidastaa kloriditunkeutumista tekemällä betonista tiiviimpää. Sulfaatinkestävä (SR) portlandsementti on kaikista sideaineista huonoin kloriditunkeutuman suhteen.

- Betonipeitteen kasvattaminen jolloin kloridien tunkeutuminen teräksiin asti kestää kauemmin

- Muottikankaan käyttö pinnassa jolloin pinnasta tulee tiiviimpi. Väylävirasto edellyttää monesti muottikankaan käyttöä

- Suoja-aineet ja pinnoitteet.

Betonin pakkasenkestävyys

Betonin pakkasenkestävyys

- Betonissa syntyy pakkasvaurioita, kun suurissa huokosissa oleva vesi jäätyy. Koska jään tilavuus on noin 9% vettä suurempi, synnyttää jäätyvä vesi painetta, joka rikkoo ympäröivää betonia.

- Betonin valmistamisessa käytetty vesi on kovettuneessa betonissa kolmessa eri muodossa:
  - Kemiallisesti sitoutuneena sementtiin
  - Geelihuokosissa
  - Kapillaarihuokosissa jotka ylimääräinen vesi muodostaa betoniin. Vain tämä vesi voi jäätyä normipakkasilla

Kemiallisesti sitoutunut vesi

- Sementtiin täydellisesti hydratoituessa siihen sitoutuu kemiallisesti noin 25% vettä sementin painosta. Yksinkertainen yhtälö kuvaa tätä kemiallista reaktiota:
- $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$
- Kalsiumhydroksidia on kovettuneessa betonissa omana mineraalina, portlandiittina sekä muissa hydrataatiotuotteissa, esimerkiksi kalsiumsilikaattihydraattigeelissä (CSH-geeli)

Geelihuokoset

- Geelihuokosia syntyy hydrataation sivutuotteena. Niiden tilavuus koko sementtigeelin tilavuudesta on noin neljännes
- Geelihuokoset ovat kooltaan erittäin pieniä, läpimitaltaan vain noin 0,1...5 nm
- Geelihuokoset ovat normaaliolosuhteissa aina veden täyttämiä. Siitä huolimatta ne ovat pakkasenkestävyyden kannalta ongelmattomia, sillä niissä esiintyvä vesi ei huokoskoon pienuuden vuoksi yleensä jäädy normaaleissa ulko-olosuhteissa.

Kapillaarihuokoset

- Sementti tarvitsee täydelliseen hydrataatioon noin 45% painostaan vettä, eli
- 25% kemiallisesti sitoutuneena
- 20% geelihuokosten täytteeksi

- Loput sekoitusvedestä muodostavat kapillaarihuokosia.

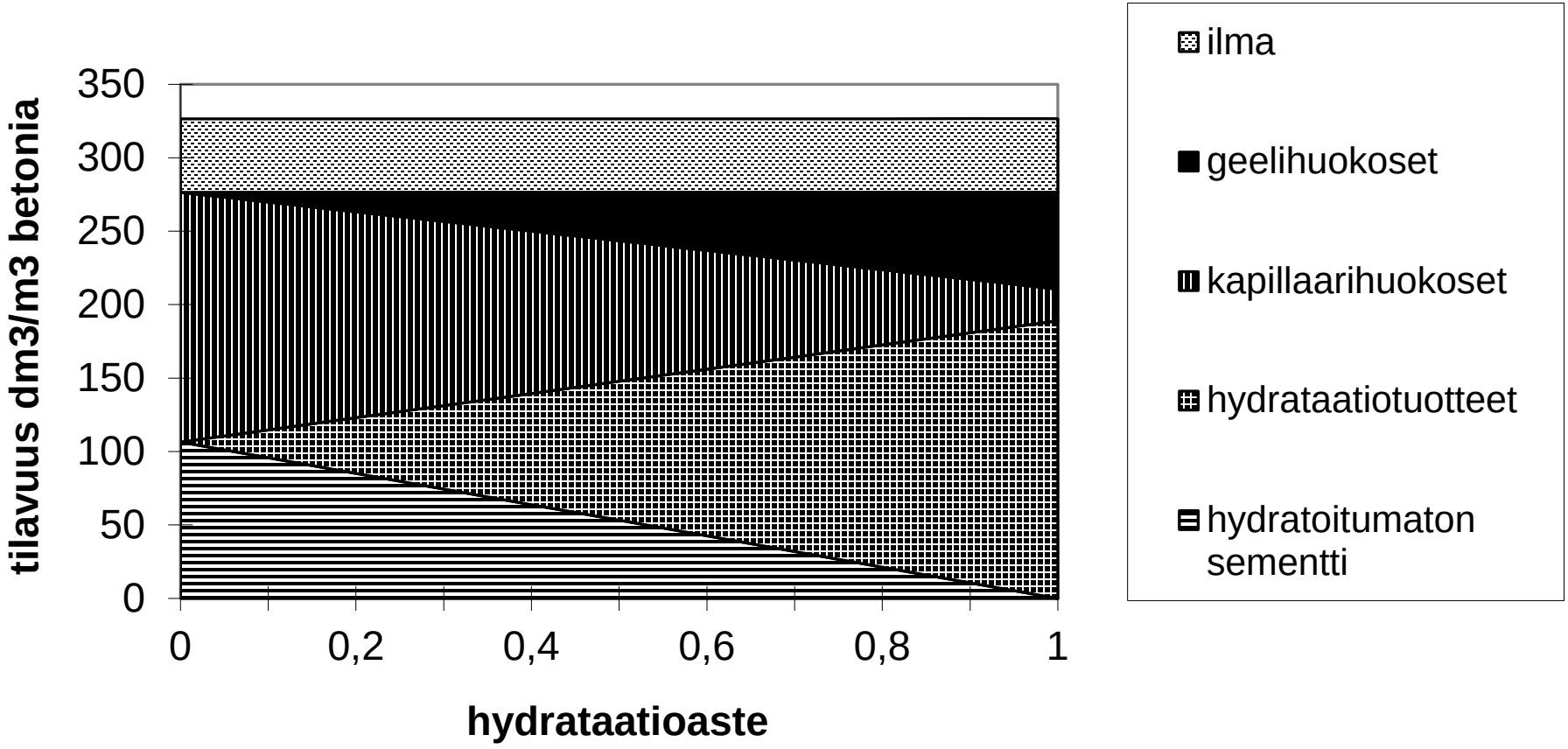
- Korkea vesi-sementtisuhde saa aikaan betonissa suuren kapillaarihuokoisuuden.

Kapillaarihuokoset

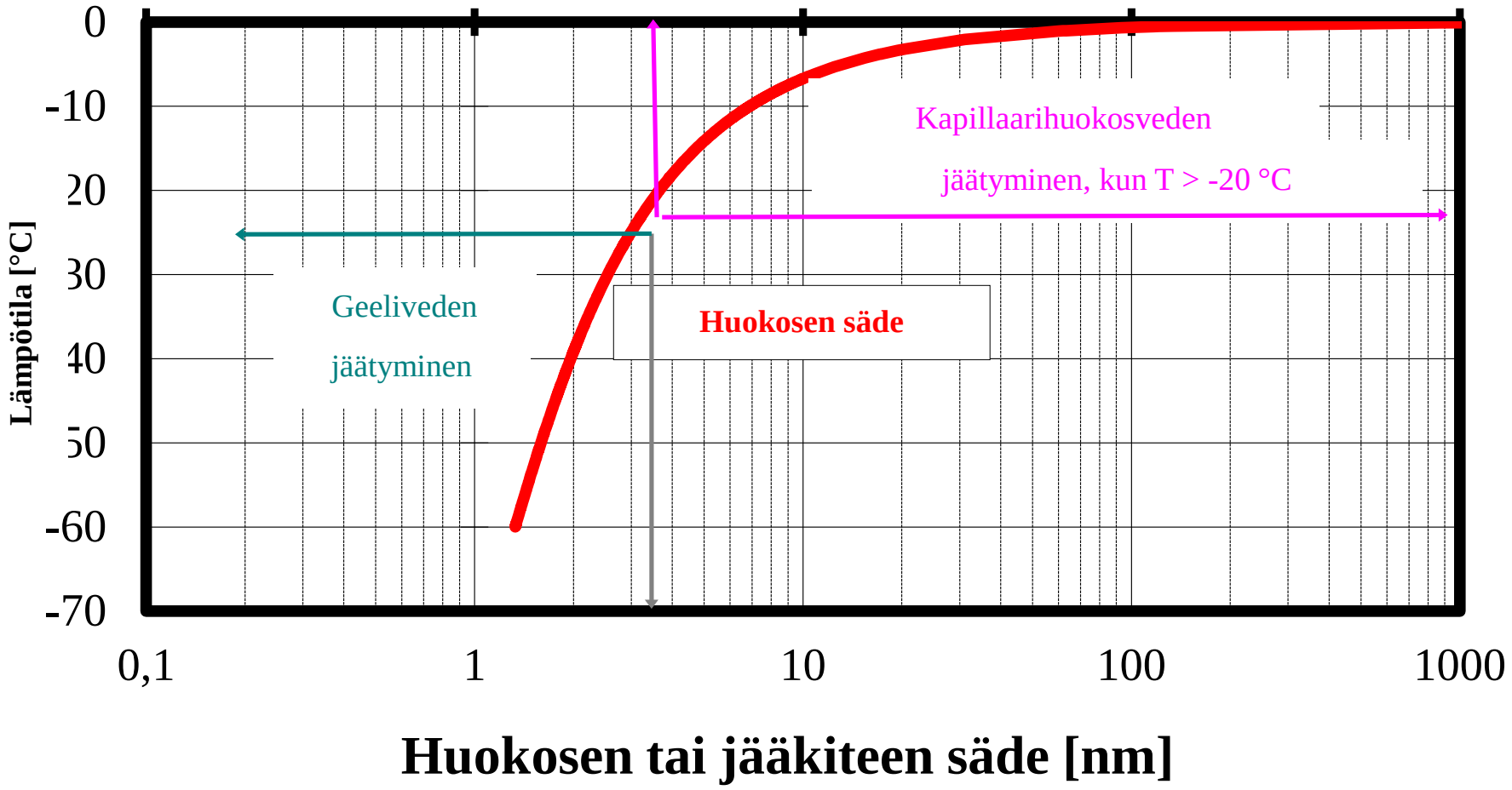
- Kapillaarihuokosissa oleva tai niihin tunkeutuva vesi jäätyy 0 °C:n alapuolella, jos vesi on puhdasta eikä alijäähtymistä tapahdu. Normaali betonin kapillaarihuokosvesi jäätyy noin −3...−4 °C:ssa johtuen veteen betonista liuenneista suoloista, jotka alentavat jäätymispistettä.

- Pyrittäessä hyvään pakkasenkestävyyteen, tulee betoni tehdä käyttäen mahdollisimman pientä vesi-sementtisuhdetta, jotta kapillaarihuokoisuus jäisi mahdollisimman alhaiseksi ja hyvää jälkihoitoa, jotta hydrataatioaste saataisiin mahdollisimman korkeaksi

BETONI K 30; v/s = 0,50; ilmaa 50 dm3/m3



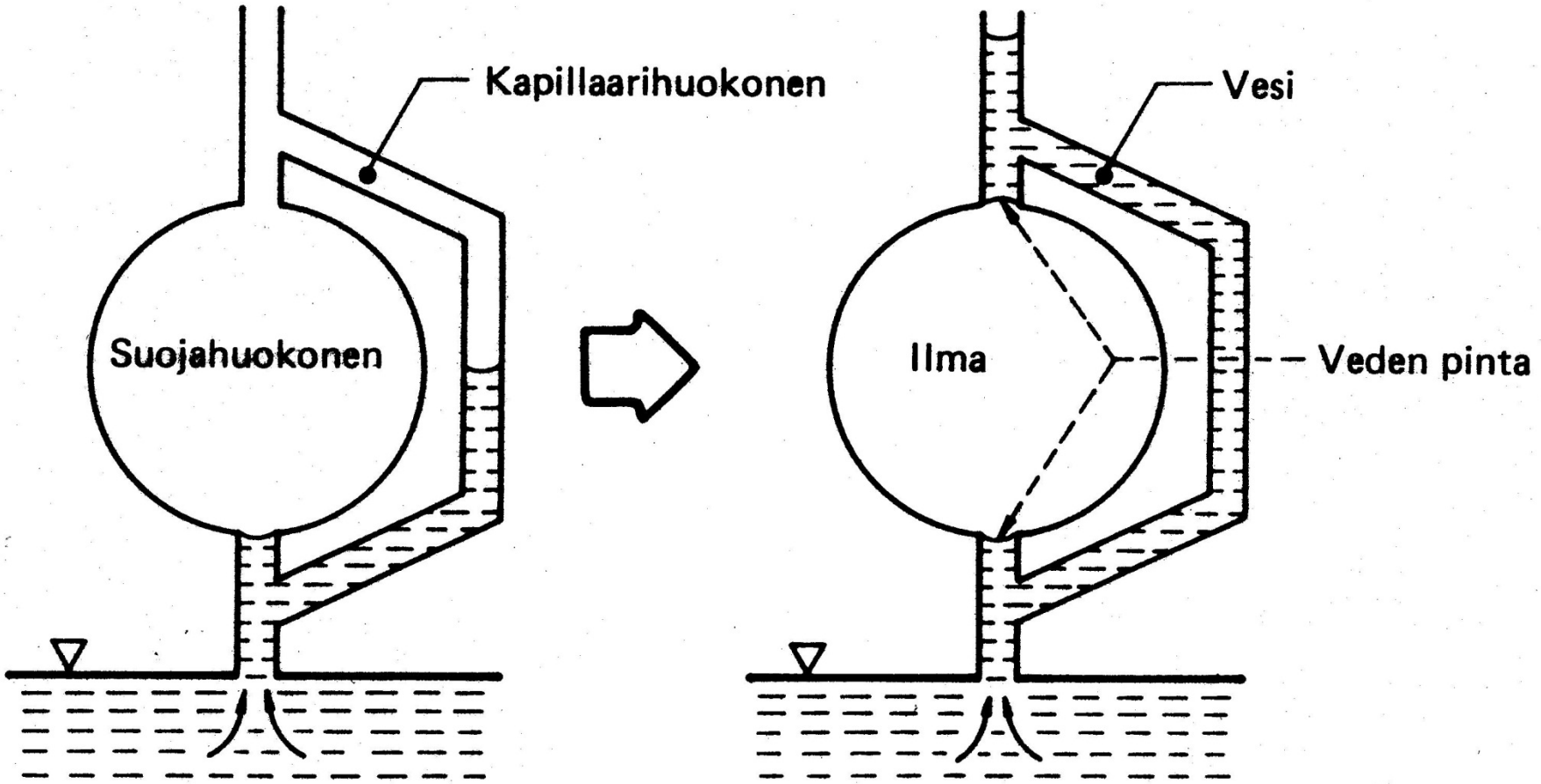
Huokosen koon vaikutus veden jäätymispisteeseen



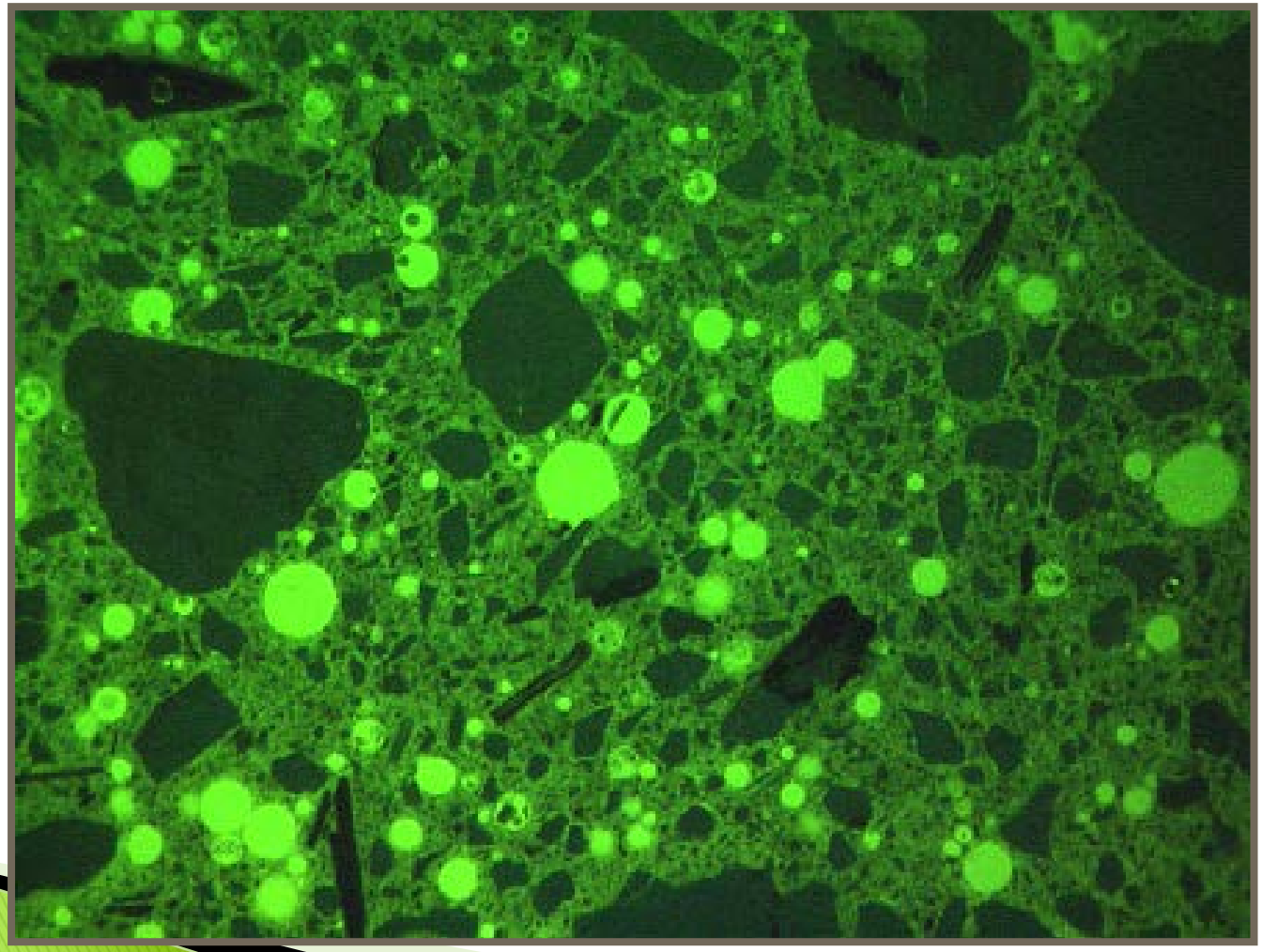
Betonin huokostaminen

- Kolmas tapa vaikuttaa betonin pakkasenkestävyyteen on betonin lisähuokostaminen
- Huokostavia lisäaineita käyttämällä sementtikiveen saadaan syntymään läpimitaltaan noin 0,01...0,5 mm olevia suojahuokosia, jotka eivät kapillaarisen imun vaikutuksesta täyty vedellä.
- Näihin täyttymättömiin ilmahuokostiloihin kapillaarihuokosissa olevan veden jäätyessä syntyneiden jääkiteiden kasvun aiheuttama paine pääsee purkautumaan (hydraulisen paineen teoria) tai jääkiteet voivat kasvaa painetta aiheuttamatta näissä ilmahuokosissa (jääkiteen kasvun teoria)

Suojahuokosten toiminta

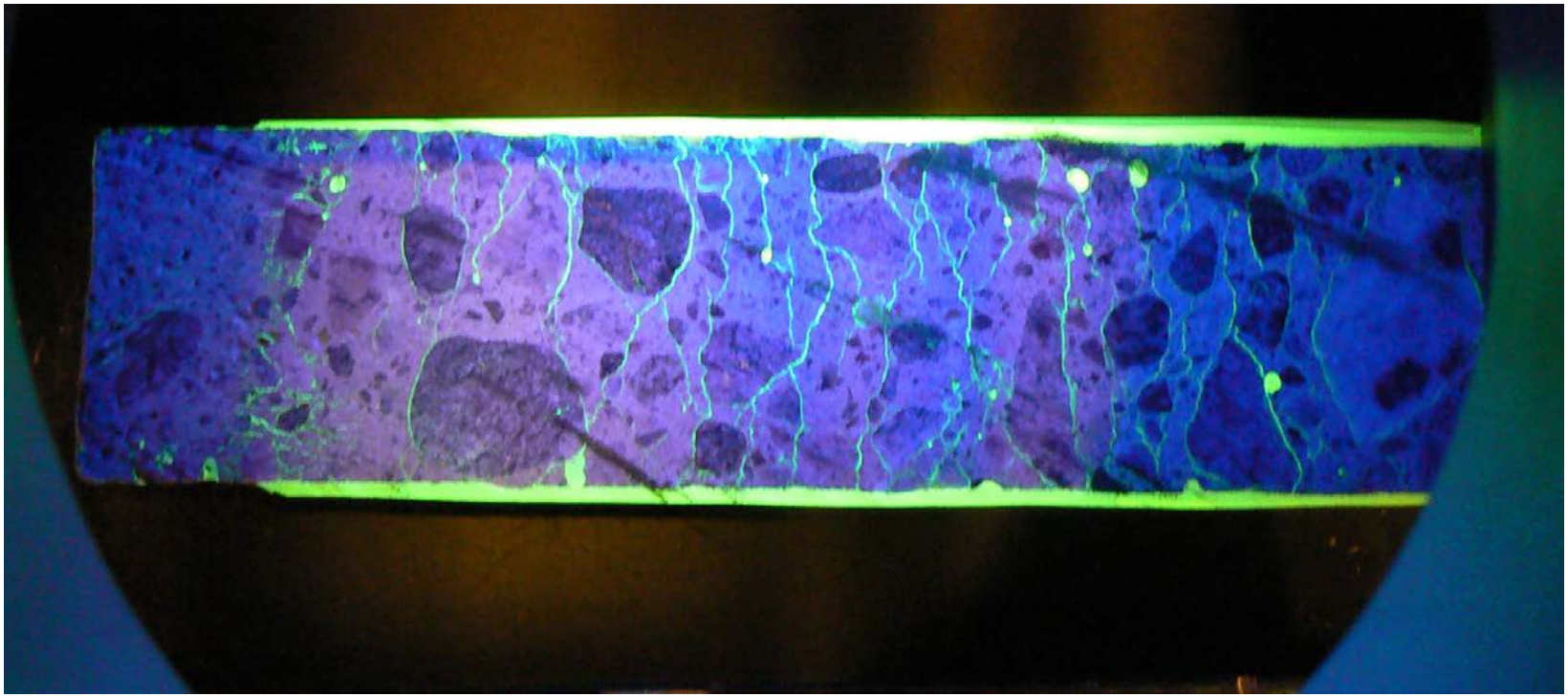


Paitsi ilman määrä myös huokosjako on pakkasenkestävyyden kannalta tärkeä



Pakkasrapauma

Pakkasvaurio



Pakkassuolarapauma

Viisi vuotta vanha törmäyseste

Yläosa on valettu väliseinämassalla

Betonin kemiallinen kestävyys

Betonille aggressiiviset aineet

- Yleisimmät betonia vaurioittavat yhdisteet joko
  - happamina aineina liuottavat sementin hydrataatiotuotteita
  - heikentävät hydrataatiotuotteiden ominaisuuksia ioninvaihdon kautta tai
  - paisuttavat hydrataatiotuotteita ja ja sitä kautta vaurioittavat rakennetta.

- Tyypillisimmät betonille vahingolliset aineet on luokiteltu pitoisuutensa perusteella eri luokkiin.
  - Sulfaatit
  - Hapot
  - Ammoniumyhdisteet
  - Magnesiumyhdisteet

Sulfaattien aiheuttama korroosio

- Sulfaatti reagoi sementin sisältämän trikalsiumaluminaatin (C3A) ja sen hydrataatiotuotteiden kanssa muodostaen ettringiittiä, joka suuren tilavuutensa vuoksi paisuttaa betonia.

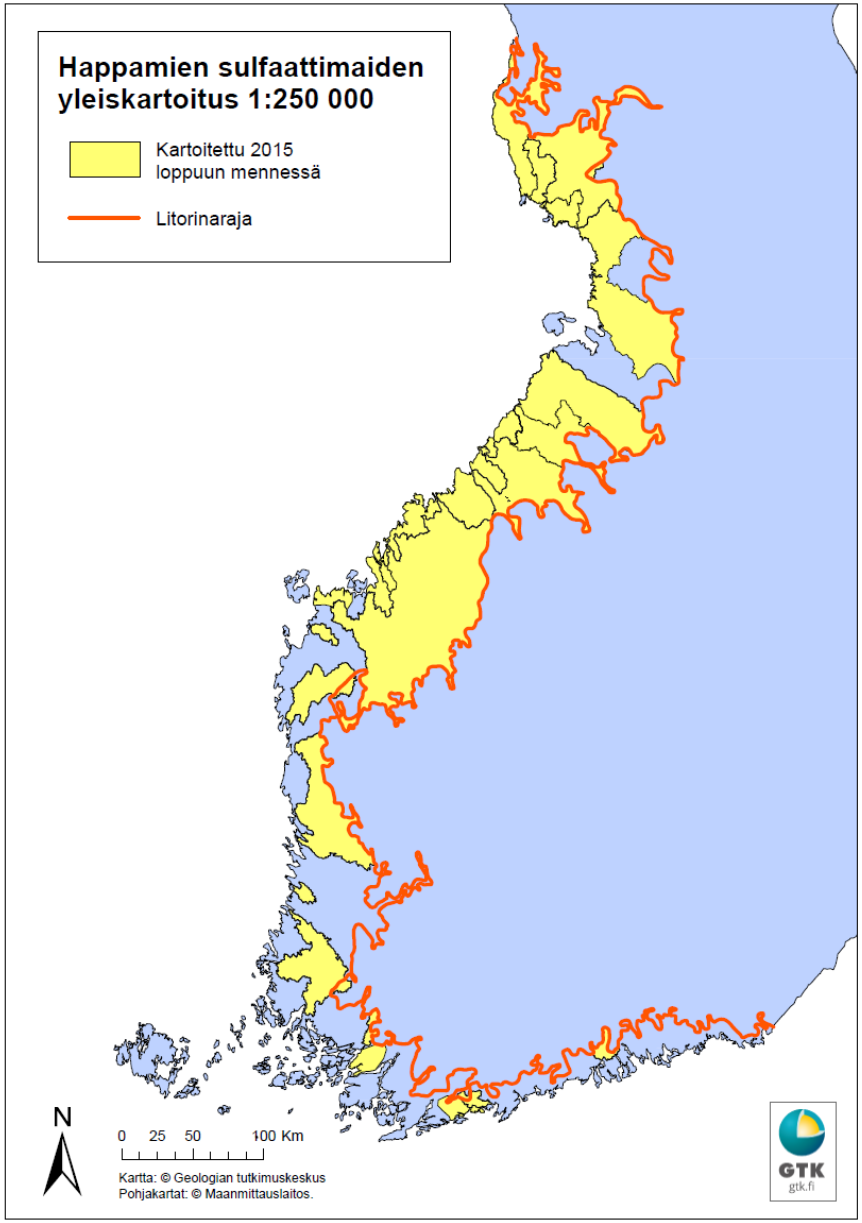
- Kovettunut betoni ei tällaista paisumista kestä, vaan vaurioituu.

- Ensimmäisessä vaiheessa ettringiitti täyttää huokostetun betonin suojahuokosia heikentäen betonin pakkasenkestävyyttä.

Sulfaattien aiheuttama korroosio

- Sulfaatinkestävän betonin käyttö on varmin tapa välttyä vaurioilta.

- Sulfaattia voi esiintyä maaperässä varsinkin alueilla, joilla maannousu on nopeaa ja maaperä sisältää sulfidimineraaleja. Sulfidin hapettuessa syntyy sulfaattia. Samalla myös maaperän happamuus lisääntyy.



Kuva 6. Happamien sulfaattimaiden tyypilliset esiintymisalueet. Geologian tutkimuslaitos, GTK. Happamat sulfaattimaat esiintyy yleensä Litorina-meren rantaviivan alapuolella, Etelä-Suomessa noin 40 m korkeuskäyrän alapuolella ja Pohjois-Suomessa noin 100 m korkeuskäyrän alapuolella.

Happojen vaikutus

- Hapot liuottavat sementtiä sekä sementin hydrataatiossa syntyviä yhdisteitä.
- Kiviaineksena mahdollisesti käytetty kalkkikivi liukenee myös happoihin.
- Luokitus tehdään liuoksen happamuusasteen, eli pH:n mukaan.
- Vesiliuos on sitä happamampaa ja samalla aggressiivisempaa, mitä alhaisempi pH on.

Ammonium-ionin vaikutus

Ammonium-ionin (NH_4^+). vahingollisuus perustuu ammoniumyhdisteiden kykyyn liuottaa sementin kalsiumyhdisteitä, jotka antavat betonille sen lujuuden ja tiiveyden

Magnesium-ionin vaikutus

- Magnesium-ioni (Mg^{2+}) muuttaa kalsiumyhdisteitä ioninvaihdon kautta vastaaviksi magnesiumyhdisteiksi, joilla ei ole enää alkuperäisiä sideaineominaisuuksia. Näin magnesium myös itse saostuu betonin huokosiin $Mg(OH)_2$:na

Luokitusesimerkki

Yhdyskuntajäteveden tyypillisiä fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia.

Ominaisuus	Pitoisuus (mg/l, paitsi
BOD7 (biologinen hapen-	125 - 175
SS (kiintoaine)	150 - 300
VS (hehkutushäviö)	120 - 150
TS (kuiva-aine)	350 - 600
P (fosfori)	6 - 8
N (kokonaistyppi)	25 - 70
NH4 (ammoniumtyppi)	15 - 50
K	10 - 15
Cl	25 - 75
COD (kemiallinen hapen-	300 - 450
pH	6 - 8

Esimerkki kahden tai useamman aggressiivisen rasituksen vaikutuksesta ympäristön rasitusluokan määrittämiseen

.

Kemiallinen ominaisuus	XA1	XA2	XA3
Pohjavesi			
$SO^{2}_{4}{}^{-}$ vedessä mg/l	≥ 200 ja ≤ 600	> 600 ja ≤ 3000	> 3000 ja ≤ 6000
pH	≤ 6,5 ja ≥ 5,5	< 5,5 ja ≥ 4,5	< 4,5 ja ≥4,0
CO_2 aggressiivinen mg/l	≥ 15 ja ≤ 40	> 40 ja ≤ 100	> 100 kyllästymis-pisteeseen asti
NH_4^+ vedessä mg/l	≥ 15 ja ≤ 30	> 30 ja ≤ 60	> 60 ja ≤ 100
Mg^{2+} vedessä mg/l	≥ 300 ja ≤ 1000	> 1000 ja ≤ 3000	> 3000 kyllästymis pisteeseen asti
Maaperä			
$SO^{2}_{4}{}^{-}$ maaperässä[1)] mg/l	≥ 2000 ja ≤ 3000[3)]	> 3000[3)] ja ≤ 12000	> 12000 ja ≤ 24000
Maaperän happamuus	> 20 Baumann Gully	Ei esiinny käytännössä	

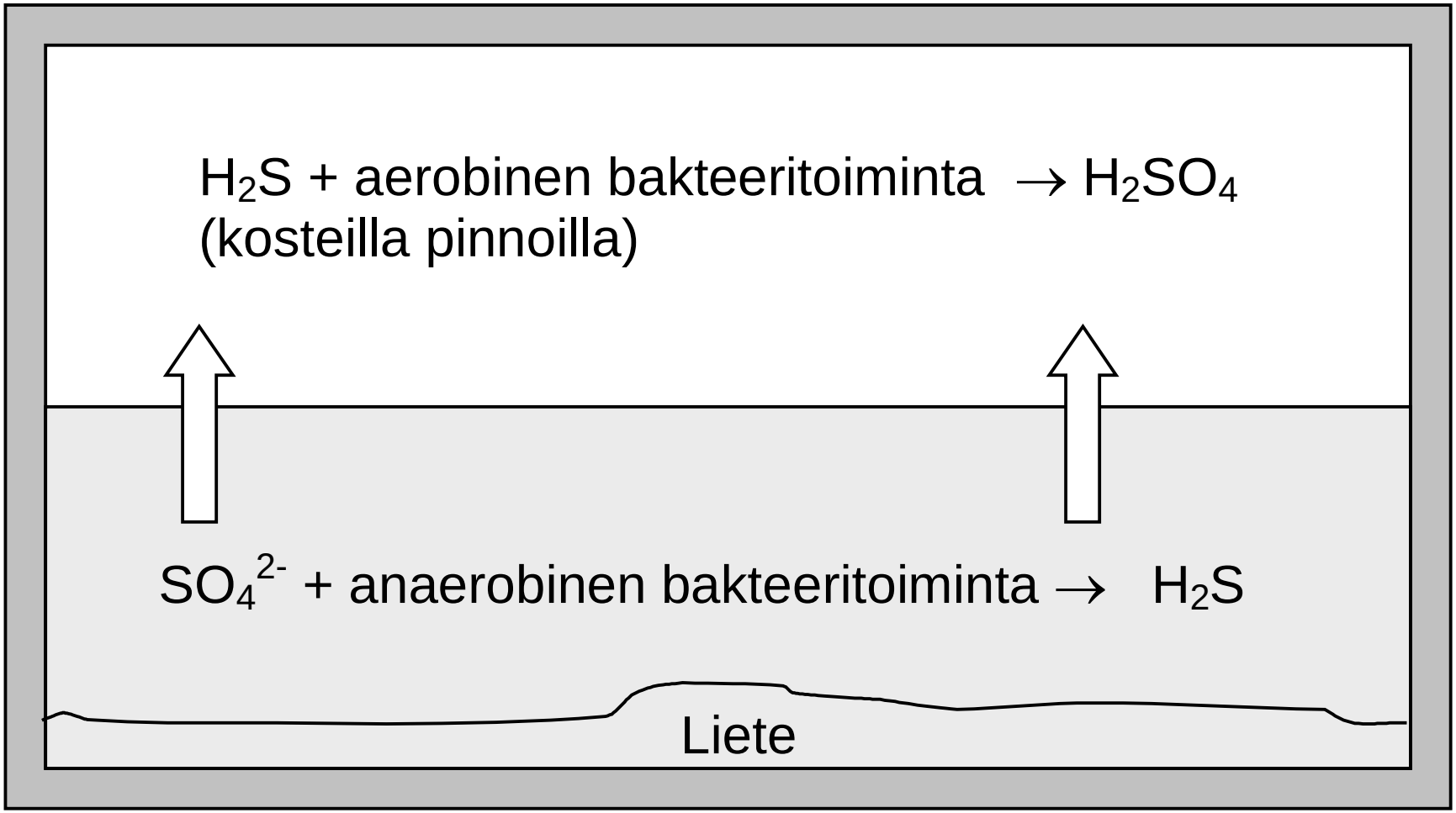
pH 6 – 8

NH_4^+ 15 – 25 mg/l

Biologinen rasitus

Biologiseksi korroosioksi kutsutaan betonikorroosiota, joka on seurausta tuulettamattomassa jätevesisäiliössä tai viemäriputkistossa kostean ilmatilan pinnoilla elävien bakteerien toiminnasta.

Seuraavassa kuvassa 6 on esitetty biologisen korroosion syntymekanismi.


H_2S + aerobinen bakteeritoiminta $\rightarrow$ H_2SO_4
(kosteilla pinnoilla)
SO_4^{2-} + anaerobinen bakteeritoiminta $\rightarrow$ H_2S
Liete

Syy ilmiöön tunnetaan hyvin. Seuraavassa on esitetty tapahtumaketju, joka voi johtaa säiliön vaurioitumiseen:

- Säiliössä syntyy lietekerros, jossa kehittyy bakteeritoiminnan tuloksena rikkivetyä (H_2S)
- Rikkivety vapautuu säiliön ilmatilaan ja liukenee säiliön märkiin pintoihin.
- Pinnoilla elävät bakteerit *Thiobacillus Thiooxidans* hapettavat rikkivedyn rikkihapoksi
- Betoni syöpyy hapon ja sulfaatin vaikutuksesta

Betoniteknisin keinon vauriota ei kyetä hallitsemaan, vaan säilöön on saatava riittävä tuuletus. Tällöin ilmatilaan mahdollisesti vapautuva rikkivety poistuu säiliöstä. Samalla tuuletus lisää jäteveden happipitoisuutta ja vähentää siten merkittävästi rikkivedyn vapautumista ilmatilaan. Tuuletus myös kuivattaa säiliön ilmatilassa olevat pinnat, jolloin rikkivety ei voi joutua bakteerien hapettamaksi.