



Inverkan av salter på betong

Kemisk och fysikalisk påverkan

Elforsk rapport 12:29



Göran Fagerlund

April 2011

ELFORSK

Inverkan av salter på betong

Kemisk och fysikalisk påverkan

Elforsk rapport 12:29

Förord

Elforsk driver sedan 2007 ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att bygga både kompetens och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland.

Betong används ofta till konstruktioner som är hårt utsatta för olika typer av saltbelastning. Det kan vara fråga om hårt frostbelastade konstruktioner vilka utsätts för en kombination av upprepade frysningar, ofta till låg temperatur, i kombination med att ytan exponeras för salt, t.ex. upptiningssalt eller havsvatten. Det kan också vara fråga om konstruktioner som står i kontakt med salthaltig jord eller salthaltigt vatten. Lösta salter kan tränga in i betongen och då orsaka skadlig kemisk reaktion. Aggressivt vatten kan t.ex. vara salthaltigt, naturligt eller förorenat grundvatten, processvatten från industrin, havsvatten. Angreppet kan dels vara rent kemiskt, där komponenter i betongen attackeras och bryts ned. Det kan också vara rent fysikaliskt och bestå av frost- eller saltsprängning.

Rapporten ger en översikt över dessa båda huvudtyper av attack på betong. Informationen har till större delen hämtas från litteratur i form av böcker, rapporter och artiklar.

Projektet har genomförts av Göran Fagerlund på uppdrag av Elforsk AB och följts av styrgruppen för Elforsks Betongprogram med följande medlemmar;

Kostas Xanthopoulos SSM, Jonas Bergfors EON OKG, Lars-Erik Berglund, Anders Bergkvist och Marcus Edin Vattenfall Forsmark, Patrik Gatter och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall Research and Development AB, Jan Gustavsson, Johanna Spåls och Johan Klasson Vattenfall Ringhals, Juha Riihimäki TVO samt Lars Wrangensten Elforsk AB. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla kommentarer och synpunkter under projektgenomförandet.

Juni 2012

Lars Wrangensten
Elforsk AB
Programområde Kärnkraft

Sammanfattning

Kapitel 1 och 2

En kort beskrivning av betong och ballast görs. Betong består av två huvudfaser: (1) cementpasta (ca 25-35 vol-%), (2) ballast (ca 65-75 vol-%). Det är cementpastafasen i betongen som kan skadas av salt. Ballasten, som normalt består av krossat svenskt berg eller grus med låg inre porositet, påverkas normalt inte. Undantags finns dock, t.ex. thaumasitbildning som beskrivs i 7.3.2.

Kapitel 3 och 4

Avgörande för betongens motståndsförmåga mot saltangrepp är dels binde-medlets egenskaper, dels betongens täthet. Den senare beror på hur betongen är sammansatt, varvid det s.k. vattencementtalet (vct) har fundamental betydelse. Cementpastans kemiska och fysikaliska struktur beskrivs. Cementets kemiska reaktioner med vatten presenteras. En beskrivning görs av inverkan av betongsammansättningen på cementpastans porositet och täthet. Inverkan av olika mineraliska tillsatsmaterial (t.ex. flygaska) på kemisk och fysikalisk struktur diskuteras.

Kapitel 5 och 6

Olika typer av salt, liksom olika huvudtyper av saltangrepp, beskrivs kortfattat.

Kapitel 7

Olika typer av kemiska saltangrepp på betong presenteras. Huvudvikten (avsnitt 7.2) läggs på *sulfatangreppet* som är det i särklass farligaste saltangreppet och den angreppstyp som studerats mest vid sidan av havsvattenangreppet. Angreppet orsakas i viss mån av att kalciumhydroxiden i cementpastan omvandlas till expansiv gips, men framförallt av att ett mycket expansivt sulfat-haltigt mineral, ettringit, bildas. Det visas att en avgörande faktor för hög beständighet är att cementet är sulfatresistent, dvs. att det har lågt innehåll av tri-kalcium-aluminat (C_3A). Det visas även att hög täthet, dvs. lågt vattencementtal, är fundamental för beständigheten. Inverkan av olika mineraliska tillsatsmaterial diskuteras. Resultaten är varierande, men viss positiv inverkan kan noteras, i synnerhet vid hög inblandning (>65 à 70%) av granulerad masugnsslagg.

Katjonen i sulfatet har påverkan på angreppet. Det är framförallt magnesiumjonen och ammoniumjonen som ökar sulfatets aggressivitet.

I avsnitt 7.3 beskrivs tre typer av ovanliga men mycket destruktiva sulfatangrepp, nämligen (1) försenad ettringitbildning, (2) thaumasitbildning, (3) inre angrepp av sulfidhaltig ballast. *Försenad ettringitbildning* uppträder när betongen härdats vid för hög temperatur (>ca 70°C) och leder till omfattande sprickbildning.

Thaumasitbildning är ett tämligen nyupptäckt fenomen, som kan uppträda när betongen tillverkats med kalkstenshaltig ballast eller med cement som innehåller kalkstensfiller. Låg temperatur är ogynnsam. Cementets reaktionsprodukter angrips varvid betongen kan bli mer eller mindre totalt förstörd. *Sulfidhaltig ballast* förekommer framförallt i norra Sverige. När den används i betong med icke sulfatresistent cement kan omfattande förstörelse ske.

I avsnitt 7.4 beskrivs hur andra salter än sulfater kan angripa betong. Det är framförallt vissa magnesiumsalter, ammoniumsalter och klorider som kan angripa betong. Ofta verkar dessa salter upplösande, varvid kalciumhydroxiden i betongen, och så småningom den lastbärande s.k. cementgelen, förbrukas.

Avsnitt 7.5 behandlar angrepp av havsvatten. Trots att detta innehåller höga halter av sulfat, magnesium och klorid är det förvånansvärt litet aggressivt mot betong. Detta förutsätter dock att vattencementtalet inte är alltför högt och att betongen i övrigt är tät. Orsaken till betongens motståndsförmåga anses vara att betongytan täcks med ett tätt skikt av aragonit vilket bildas genom reaktion mellan havsvattnets bikarbonatjoner och betongens kalciumhydroxid.

Kapitel 8

Kapitel 8 behandlar olika fysikaliska angrepp. I avsnitt 8.2 behandlas frostangrepp i närvaro av salt, t.ex. avisningssalt eller havsvatten. Omfattande experiment visar att mycket kraftig avskalning av betongytan kan uppträda när saltlösningen har låg koncentration. Ofta uppnås den mest negativa effekten vid 1 à 3% saltkoncentration. Typen av salt spelar mindre roll, vilket visar att det inte handlar om något kemiskt angrepp. Mineraliska tillsatsmaterial har ofta negativ påverkan på beständigheten mot salt-frostangrepp.

I avsnitt 8.2 beskrivs saltsprängning orsakad av kristalltillväxt. Fenomenet kan troligen uppträda i betong med hög kapillaritet och därmed snabb transport av salt. I avdunstningszonen innanför ytan kan då en övermättad saltlösning uppkomma vilken ger tillväxt av saltkristaller. Den inre spänningen orsakad av kristalltillväxten kan teoretiskt leda till söndersprängning av ytan. Skador bör inte kunna uppstå i betong med lågt vct.

Summary

Concrete is often used in structures in salt environment. It might be structures exposed to repeated frost load, at the same time as the surface is exposed to salt, e.g. de-icing salt or sea water. It might also be structures in contact with saline soil or saline water. Dissolved salt might enter the concrete and cause detrimental chemical attack. Aggressive water might be natural or contaminated ground water, industrial process water, or sea water.

Attack might be purely chemical, at which components in the concrete are attacked. It might also be purely physical, e.g. salt-frost damage or crystal growth. A presentation of these two types of attack is made in the report.

Chapter 1 and 2

A short presentation of concrete and aggregate is made. Concrete is composed of two main phases; cement paste (25-35% by volume) and aggregate (65-75%). Only the cement paste phase is vulnerable to salt attack, provided the aggregate is non-porous and non-calcareous.

Chapter 3 and 4

Properties of the cement (the binder), chemically and physically, and the concrete permeability are of vital importance for the ability of concrete to resist salt attack. The water-cement ratio is of vital importance. The chemical and physical composition of cement paste is presented. The reaction between cement and water is described. A presentation is made of the effect of the concrete composition on the porosity and permeability. The effect of mineral admixtures on the chemical and physical structure of cement paste is discussed.

Chapters 5 and 6

Different types of salt and main types of salt attack are described briefly.

Chapter 7

Different types of chemical salt attack on concrete are described. The main stress is laid upon the sulfate attack (section 7.2). Besides sea water attack, sulfate attack is the most dangerous and most studied type of salt attack. To some extent the attack is caused by formation of expansive gypsum by reaction between sulfate and calcium hydroxide. The main destruction, however, is caused by formation of the very expansive mineral ettringite. The main factor for achieving high resistance is sulfate-resistant cement, i.e. cement with low content of tri-calcium-aluminate (C_3A). It is also shown that low permeability, i.e. low water-cement ratio, is required for high sulfate resistance. The effect of different mineral admixtures is discussed. The results are varying, but a certain positive effect is often observed, especially for high amount of granulated blast-

furnace slag (>65 à 70%). The cation in the sulfate affects the sulfate attack, particularly the magnesium ion and the ammonium ion. Both aggravate sulfate attack.

In section 7.3 three types of unusual but very harmful sulfate attacks are described, viz.: (1) delayed ettringite formation, (2) thaumasite formation, (3) internal attack in concrete with sulfide-containing aggregate. *Delayed ettringite formation* appears when the concrete has been cured at high temperature (>70°C). It often leads to severe crack formation. *Thaumasite formation* might occur when the concrete contains limestone aggregate or contains cement with limestone filler. Low temperature stimulates the formation. The reaction products make the concrete lose its cohesion, it might be more or less completely destroyed. *Sulfide-containing aggregate* can be found in parts of northern Sweden. When used in concrete with non-sulfate resistant cement considerable damage might occur.

Section 7.4 gives a presentation of how salts other than sulfates might attack concrete. Most harmful are some magnesium salts, ammonium salts and chlorides. These salts might dissolve the calcium hydroxide. Furthermore, also part of the load-carrying cement gel might be dissolved.

In section 7.5 sea water attack is described. Sea water contains high amount of sulfate, magnesium and chloride. Despite this, it is remarkably non-aggressive to concrete. The requirements are that the water-cement ratio is low and the concrete is dense. The reason for the fairly high resistance to sea water seems to be that the concrete surface is covered by a dense layer of aragonite formed by reaction of bicarbonate ions in sea water and calcium in concrete.

Chapter 8

Different types of physical attack are discussed. In section 8.2 frost attack in presence of salt is treated. Comprehensive studies show that the biggest surface scaling occurs when the salt content is low (1-3%). This fact, and the fact that the type of salt is of low or no importance, demonstrates that no chemical attack is involved. Mineral admixtures often have negative effect on the salt-scaling resistance.

In section 8.3, damage caused by salt crystallization is described. The phenomenon might possibly appear in concrete with high capillarity and therefore rapid ingress of salt. Super-saturated solution appears in the evaporation zone, which makes crystal growth possible. Internal tensile stresses high enough to destroy concrete might appear.

Innehåll

1	Betong	1
2	Ballast	3
3	Cementpasta	4
3.1	Portlandcement.....	4
3.1.1	Portlandcementets sammansättning	4
3.1.2	Portlandcementets kemiska reaktioner	5
3.1.3	Cementpastans alkalitet	8
3.1.4	Hydratationens tidsförlopp	10
3.2	Alternativa cementtyper.....	11
3.2.1	Cementtyper. Kemisk reaktion	11
3.2.2	Cementpastans alkalitet	15
4	Cementpastans fysikaliska struktur	17
4.1	Portlandcement.....	17
4.1.1	Hydratationsprodukternas struktur	17
4.1.2	Cementpastans porositet	18
4.1.3	Permeabilitet.....	21
4.2	Alternativa cementtyper.....	27
4.2.1	Struktur	27
4.2.2	Permeabilitet.....	29
5	Salt	33
6	Saltangrepp på betong-huvudtyper	35
7	Kemiskt saltangrepp	36
7.1	Allmänt.....	36
7.2	Sulfatangrepp.....	37
7.2.1	Allmänt	37
7.2.2	Rent sulfatangrepp – skademekanism	40
7.2.3	Inverkan av katjonen	45
7.2.4	Inverkan av karbonatisering.....	46
7.2.5	Reaktionshastigheten	46
7.2.6	Inverkan av cementtypen	49
7.2.7	Inverkan av luftinblandning	52
7.2.8	Inverkan av vattencementtalet.....	53
7.3	Speciella sulfatangrepp	54
7.3.1	Försenad ettringitbildning	54
7.3.2	Thaumasitbildning	56
7.3.3	Inre angrepp av sulfidhaltig ballast	57
7.4	Angrepp av andra salter än sulfat.....	59
7.4.1	Allmänt	59
7.4.2	Magnesiumsalter	59
7.4.3	Ammoniumsalter	59
7.4.4	Fosfater.....	61
7.4.5	Klorider	61
7.4.6	Inverkan av vct och cementtyp	62
7.5	Angrepp av havsvatten	63
7.5.1	Havsvattens sammansättning.....	63
7.5.2	Havsvattens aggressivitet	63
7.5.3	Angreppsmekanism.....	66

7.5.4	Inverkan av betongens täthet	66
8	Fysikaliskt angrepp	69
8.1	Frostangrepp utan salt.....	69
8.2	Saltfrostangreppet	72
8.2.1	Inverkan av saltkoncentration och typ av salt.....	72
8.2.2	Förstörelsemekanism	74
8.2.3	Inverkan av lufthalt och antalet fryscyklar	75
8.2.4	Inverkan av cementtyp	76
8.3	Kristallisationstryck-saltsprängning	79
9	Referenser	83
9.1		88

1 Betong

Betongens beständighet avgörs av dess kemiska och fysikaliska struktur. Därför görs i Kapitel 3 och 4 en genomgång av viktiga strukturparametrar innan beskrivningen av olika saltangrepp görs.

Konventionell betong består av två huvudfaser:

1. *Ballast*, dvs. olika typer av bergartsmaterial. Volymandel ca 65-75%. Ballasten är normalt icke-porös.
2. *Cementpasta*, dvs. den hårdnade massan av cement och vatten. Volymandel ca 25-35%. Cementpastan har en porositet som kan variera mellan ca 40 och 60%.

Vid sidan av dessa huvudfaser finns en tredje fas nämligen *fasgränsområdet* mellan cementpasta och framförallt grövre ballast. Fasgränsområdet har en tjocklek av ca 10-25 μm och består av glest utbildade hydratationsprodukter från cementets reaktion med vatten. Mätningar har visat att fasgränsområdet har betydligt högre porositet än cementpastan i övrigt. Mikrohårdhetsmätningar har dessutom visat att fasgränsen har lägre hårdhet än den normala cementpastan. Total fasgränsvolym kan uppgå till några volym-% av betongvolymen. Avgörande för fasgränsvolymen är den genomsnittliga fasgränstjockleken och medelstorleken hos ballastkornen.

Fasgränserna är svaghetszoner i betongen och kan ofta medföra att betongens permeabilitet blir högre än de båda huvudfasernas permeabilitet. De kan därför ha viss negativ påverkan på betongens beständighet.

Betong innehåller även rätt grova s.k. *luftporer* vilka antingen beror på att den färska betongmassan inte kan komprimeras fullständigt (ca 1,5-3 volym-%), eller som är medvetet skapade genom att luftporbildande medel tillsätts den färska betongmassan (lufthalt ca 4-6 volym-%).

En central parameter hos betong, vilken bestämmer i stort sett alla betongegenskaper inklusive den kemiska beständigheten, är *vattencementtalet*, *vct*, vilket definieras:

$$vct = \frac{w}{c} \tag{1}$$

där W är mängden blandningsvatten (kg) och C är cementhalten (kg) hos betongen. När cement med tillsatsmaterial ingår (slagg, flygaska) används samma definition av C , dvs. hela bindemedelsvikten ingår.

Metoden att *härda* betongen under de första dygnen är fundamental för beständigheten mot alla typer av angrepp. Betongen måste *förhindras att torka* under några dygn. Detta kan ske genom att formen får sitta kvar, och att fria ytor täcks med ett ångtätt membran av någon typ. När det inte är risk för frost bör betongens fria ytor helst begjutas med vatten under några dygn. Härdning vid *hög temperatur* bör undvikas eftersom dels materialstrukturen försämras, dels negativa kemiska reaktioner kan uppstå, se avsnitt 7.3.1. Regler för härdning finns i handböcker, t.ex. Betonghandbok. Arbetsutförande (1992). Det finns även en svensk standard för härdning, SS-EN 13670.

2 Ballast

Naturballast som används i betong har normalt mycket låg porositet (<2 vol-%) och låg permeabilitet. Den inre angreppsytan och omsättningshastigheten för ev. inträngande salthaltigt vatten är därför mycket låg. De mineral som bygger upp normal ballast (t.ex. kvarts, glimmer, fältspat) är stabila mot saltangrepp. Dessa faktorer medför att ballast i praktiken inte påverkas av normalt förekommande salter i vatten och mark, t.ex. sulfater, nitrater, klorider, m.fl.

Viss ballast, som innehåller alkalilöslig kiselsyra (t.ex. flinta, opal, kalcedon, m.fl.), liksom viss kalksten (dolomit) kan vara reaktiv i närvaro av starkt alkaliskt vatten (t.ex. det porvatten som finns i betong), varvid svällande föreningar kan uppstå. Dessa ballasttyper förekommer sällsynt i Sverige. De kan undvikas eftersom deras reaktivitet kan avslöjas i laboratoriet. Reaktionerna är inte orsakade av salter och behandlas därför inte i rapporten.

Kalkstensballast kan under vissa förhållanden reagera med salt i grundvattnet och ge betongskador. Fenomenet är inte känt från Sverige. Det beskrivs i avsnitt 7.2.3.

Viss ballast som förekommer i svenska fjällkedjan innehåller kismineral, t.ex. svavelkis. Dessa kan ge destruktiv kemisk reaktion i betongen. Fenomenet beskrivs i avsnitt 7.3.3.

Porös ballast kan skadas av frost. Skadetypen orsakas inte av salt och behandlas inte i rapporten.

3 Cementpasta

3.1 Portlandcement

3.1.1 Portlandcementets sammansättning

Portlandcement har traditionellt varit den helt dominerande cementtypen i Sverige. Fortfarande används huvudsakligen portlandcement i mera avancerade anläggningskonstruktioner där man önskar hög beständighet.

Portlandcement består av fyra huvudfaser ("klinkerfaser") vilka skapas vid cementbränningen:

- Trikalcium-silikat (C_3S): $3CaO \cdot SiO_2$
- Dikalcium-silikat: (C_2S): $2CaO \cdot SiO_2$
- Trikalcium-aluminat (C_3A): $3CaO \cdot Al_2O_3$
- Tetrakalcium-aluminat-ferrit (C_4AF): $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$

Dessutom tillförs gips vid cementmalningen: $CaSO_4 \cdot xH_2O$. Där x beror på gipsens avvattningsgrad. För naturgips är $x=2$. För "stuckgips" är $x=0,5$. I formelnerna nedan antas att $x=2$.

Dessutom tillsätts en viss mängd (<1 vikt-%) av kromatreducerande sulfat, normalt järnsulfat. Detta görs för att minska risken att betongarbetarna skall få kromatrelaterat eksem.

Ett typiskt *rent* svenskt portlandcement (cement utan tillsatser förutom gips) har följande ungefärliga sammansättning:

C_3S :	56 vikt-%
C_2S :	19 vikt-%
C_3A :	8 vikt-%
C_4AF :	11 vikt-%
Gips:	6 vikt-%

3.1.2 Portlandcementets kemiska reaktioner

Samtliga komponenter ovan reagerar med vatten; de "hydratiserar". De viktigaste komponenterna i cementet är C_3S och C_2S . Bägge bildar kalcium-silikat-hydrat (CSH eller "*cementgel*") med sammansättningen:



Detta är den främsta lastbärande fasen i betong. Cementgelen kallas också "*tobermorit*", vilket är ett i naturen förekommande kalcium-silikat-hydrat.

C_3S och C_2S

De fullständiga reaktionerna hos C_3S och C_2S är:



Vid sidan av cementgel bildas alltså en avsevärd mängd *kalciumhydroxid* ("portlandit").

C_3S binder mer vatten än C_2S men samtidigt utvecklas mer kalciumhydroxid, dvs. mängden cementgel blir något mindre vid C_3S -reaktionen; 1 kg C_3S bildar 0,75 kg cementgel medan 1 kg C_2S bildar 1 kg cementgel.

C_3A

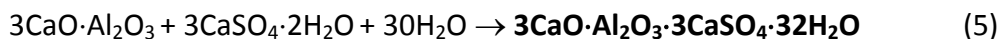
C_3A utan *gipstillsets* reagerar mycket snabbt med vatten och bildar kalcium-aluminat-hydrat (CAH):



Ingen kalciumhydroxid utvecklas

Denna reaktion sker direkt när C_3A kommer i kontakt med vatten. Den medför att betongen snabbt blir så styv att den inte går att hantera. Därför tillsätts gips (sulfat) till cementet för att styra C_3A -reaktionen.

C_3A reagerar med tillsatt gips och vatten. I ett första stadium, när betongen fortfarande är färsk och tillgången till gips är hög, sker följande reaktion:

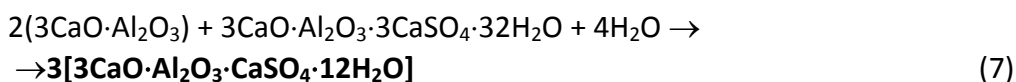


Reaktionsprodukten kallas "*ettringit*". Den är starkt vattenhaltig och mycket voluminös. Ingen destruktiv effekt uppstår emellertid eftersom betongen fortfarande är färsk och deformierbar.

När nästan all gips förbrukats och sulfathalten sjunkit omvandlas ettringit till en något mindre voluminös produkt kallad "*monosulfat*". Reaktionen kan förenklat skrivas:



Reaktionsformeln är:

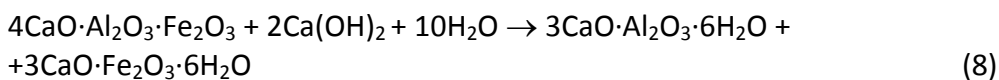


Reaktionen sker under första dygnet. Den medför ingen volymökning och är därför inte destruktiv.

Monosulfaten kan återigen omvandlas till ettringit om sulfatjoner tillförs utifrån när betongen är hård. Detta medför volymökning och kan därför ge omfattande skador; se avsnittet sulfatangrepp, Ekv. (32).

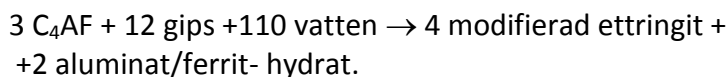
C₄AF

C₄AF förbrukar en del av den frigjorda kalciumhydroxiden vid sin reaktion. Samtidigt binds mycket vatten. Förenklat kan reaktionen skrivas, när *reaktioner med gips försummas*:

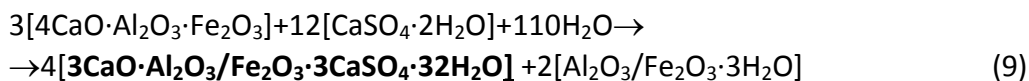


I verkligheten deltar överskottsgips som inte reagerat med C₃A i reaktionen av C₄AF. Förenklat ersätter järn en del av aluminium i ettringiten och monosulfaten.

Reaktionen som ger modifierad ettringit kan skrivas (gips med 2 kristallvatten antas):



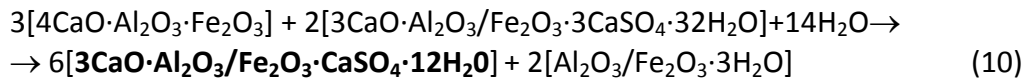
Reaktionsformeln är:



Reaktionsformeln som ger modifierad monosulfat kan skrivas:

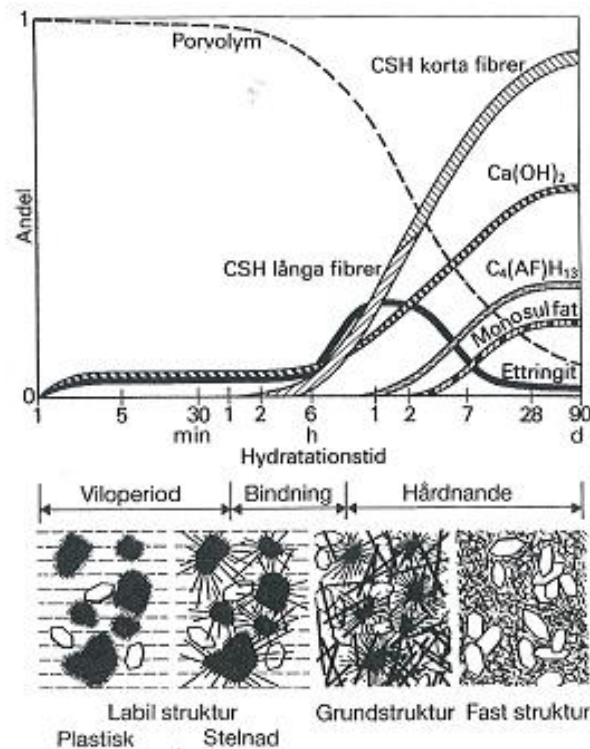
$3C_4AF + 2$ modifierad ettringit + 14 vatten $\rightarrow$ 6 modifierad monosulfat +
+ 2 aluminat/ferrit-hydrat

Reaktionsformeln är:



Figur 1 visar hydratationsprocessen översiktligt.

- Efter några timmar startar hydratationen. Alltmer CSH-gel utvecklas med ökande tid. Till en början, när mycket utrymme finns, uppstår gelen som större aggregat av fibrösa och plattformade kristaller. I ett senare skede när en större mängd hydratationsprodukter bildats och cementpastan blivit tätare minskar de enskilda hydratationsprodukternas "partikelstorlek".
- Porositeten minskar med ökande hydratationsgrad
- Mängden kalciumhydroxid ökar med ökande hydratationsgrad.
- Under den första tiden bildas ettringit från C_3A .
- Efter några timmar konverteras ettringiten till monosulfat. Samtidigt bildar C_4AF en modifierad typ av monosulfat där aluminium delvis ersatts av järn.
- Efter något dygn finns fem huvudfaser i cementpastan:
 - Oreagerat cement
 - CSH-gel
 - Kalciumhydroxid
 - Monosulfat
 - Porer



Figur 1: Hydrationsförloppet principiellt. Locher, Richartz, Sprung (1976).

Vid fullständig reaktion av ett typiskt svenskt portlandcement binds ca 0,25 kg vatten per kg cement. Mängden producerad kalciumhydroxid är ca 0,30 kg per kg cement. I de tre betongtyper som diskuteras i avsnitt 4.1.2 gäller följande värden för några månader gammal betong. (α är hydratationsgraden. Se Ekv (11) nedan).

- Avancerad anläggningsbetong ($\alpha=0,65$): 115 liter hydratvatten;
135 kg Ca(OH)_2
- Enkel husbyggnadsbetong ($\alpha=0,80$): 60 liter hydratvatten;
70 kg Ca(OH)_2
- Vattenbyggnadsbetong ($\alpha=0,75$): 85 liter hydratvatten;
95 kg Ca(OH)_2

3.1.3 Cementpastans alkalitet

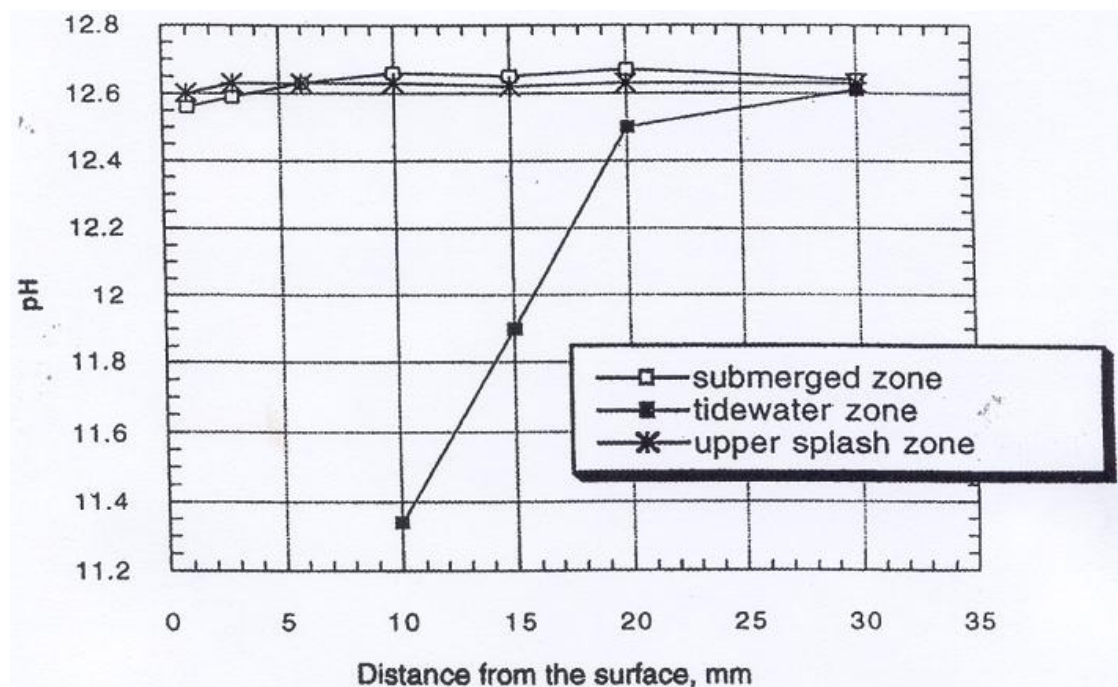
Lösligheten hos kalciumhydroxid är mycket låg. Därför kommer porvattnet i betongen alltid att vara mättat med avseende på kalciumhydroxid. Det innebär att pH-värdet i betong som lägst är ca 12,6, dvs. det är starkt alkaliskt. pH-värdet sjunker först när i stort sett all kalciumhydroxid har lakats ut och detta

tar mycket lång tid, i synnerhet i högvärdig betong med lågt vct eftersom sådan betong dels innehåller hög mängd kalciumhydroxid, dels har låg permeabilitet.

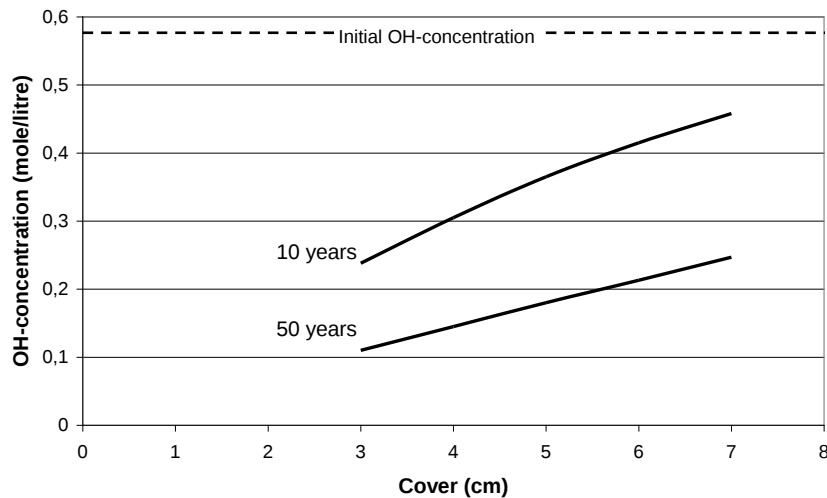
Cement innehåller alltid någon viktprocent natriumoxid och kaliumoxid. Större andelen av dessa komponenter löser sig i vatten i porerna varvid de övergår till hydroxider. pH värdet i färsk betong är därför avsevärt högre än vad som ges av kalciumhydroxiden. pH 13 à 14 är vanligt.

Det höga pH-värdet medför att ingjuten armering är väl skyddad mot korrosion. Några beständighetsproblem orsakade av den höga alkaliteten uppstår inte, bortsett från de fall där betongen innehåller ballast som är alkalireaktiv.

När betongen omges av vatten kommer urlakning av NaOH och KOH att ske. På sikt urlakas även $\text{Ca}(\text{OH})_2$. I Figur 2 visas hur pH-profilen såg ut i en kajkonstruktion efter 35 års exponering för havsvatten. I huvuddelen av konstruktionen in till 30 mm djup är pH 12,6 vilket motsvarar mättad kalciumhydroxid. Det innebär att all NaOH och KOH har lakats ut ända in till detta djup. Annars skulle pH-värdet vara högre. I den del av betongen som utsätts för tidvatten sker en kraftig urlakning även av kalciumhydroxid. En teoretisk beräkning av urlakning av alkalier från betong i vatten, och hur detta påverkar resterande OH^- jonkoncentration hos porvattnet, visas i Figur 3.



Figur 2: Uppmätt pH i en dansk kajkonstruktion efter 35 års exponering i Nordsjön; Sandberg (1993).



Figur 3: Beräknad OH-koncentration efter 10 resp. 50 år i en betong som exponeras för vatten angripande från vänster. Betongens transportkoefficient för OH⁻-joner är $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Fagerlund (2011).

3.1.4 Hydratationens tidsförlopp

Hydratationstillståndet beskrivs av hydratationsgraden, α . Denna definieras:

$$\alpha = \frac{C_h}{C} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (11)$$

Där C_h (kg) är mängden cement som reagerat med vatten. C (kg) är totala cementhalten.

Hydratationsgraden ökar med tiden. Dess tillväxt vid rumstemperatur hos ett normalt svenskt portlandcement visas i Figur 4. Förloppet kan beskrivas av en ekvation av följande typ:

$$\ln \alpha = a(\ln t)^b \quad (12)$$

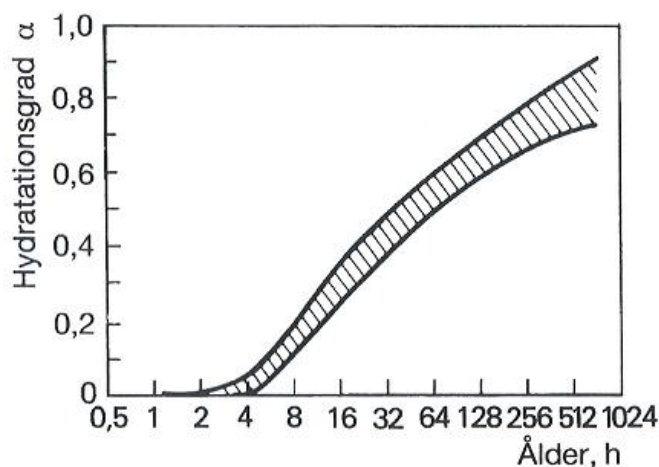
För svenskt portlandcement och normala vct är koefficienten $a \approx -10$ och $b \approx -2$ när tiden t uttrycks i timmar och härdningstemperaturen är ca $+20^\circ\text{C}$.

Ekvationen ger följande hydratationsgrad vid olika ålder:

1 dygn:	$\alpha=0,37$
1 vecka:	$\alpha=0,68$
1 månad:	$\alpha=0,79$
1 år:	$\alpha=0,89$

Redan efter 1 vecka har alltså ca 70% av den maximala hydratationen och 85% av hydratationsgraden efter 1 år utspelats. Det innebär att redan efter någon månad kan betongen anses ha uppnått ett slags "normalstadium", även om den kommer att fortsätta att hydratisera och därför med tiden uppnå ännu högre täthet och beständighet.

Koefficienterna a och b blir något olika för olika vct; hydratationsgraden vid en viss ålder når nämligen ett högre värde ju högre vct är. Detta har bekräftats av försök. Orsaken är att den mycket täta materialstruktur som utbildas vid låga vct försvårar för vatten att nå in till ohydratiserat cement. Även cementsorten och temperaturen påverkar värdet på koefficienterna.



Figur 4: Hydratationsgradens utveckling vid +20 °C för ett svenskt Portlandcement. Byfors (1980).

3.2 Alternativa cementtyper

3.2.1 Cementtyper. Kemisk reaktion

En alltmer vanlig metod att minska energiförbrukning och koldioxidutsläpp vid cementtillverkning är att blanda ut cementklinkern som produceras i cementugn med någon typ av mer eller mindre reaktivt mineraliskt tillsatsmaterial. Vanliga tillsatsmaterial är:

- Mald granulerad masugnsslagg, ett restmaterial från tillverkning av tackjärn i masugn.
- Flygaska, ett restmaterial från koleldning i värmekraftverk.
- Silikastoft, ett restmaterial från tillverkning av metallisk kisel eller kiseljärn.
- Kalkstensmjöl.

Tillsatsmaterialen kan indelas efter sin reaktivitet. Denna beror på tre faktorer:

- 1) Kalciumhalten. Ju högre kalciumhalt, desto högre reaktivitet. (Gäller inte kalkstensmjöl eftersom detta är kristallint och i stort sett saknar reaktivitet).
- 2) Finheten. Ju finare desto högre reaktivitet.
- 3) Glashalten. Ju högre desto högre reaktivitet

Typiska sammansättningar för de vanliga tillsatsmaterialen visas i Tabell 1:

Tabell 1: Typisk kemisk sammansättning av olika mineraliska tillsatsmaterial.

Typ	Glashalt	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	(Na ₂ O) _{ekv}	SO ₃	Glöd-förlust
Slagg	97	39	36	11	10	1	1,5	1	-
Flygaska	Varierande	3	50	25	<5	-	3	<4	<5
Silikastoft	98	<2	>90	<0,5	<5	<0,5	<0,5	<4	-

Mängden av mineraliskt tillsatsmaterial i cement är starkt varierande. Den europeiska (och svenska) cementstandarden delar in cement i olika typer beroende på maximalt tillåtna inblandade mängder:

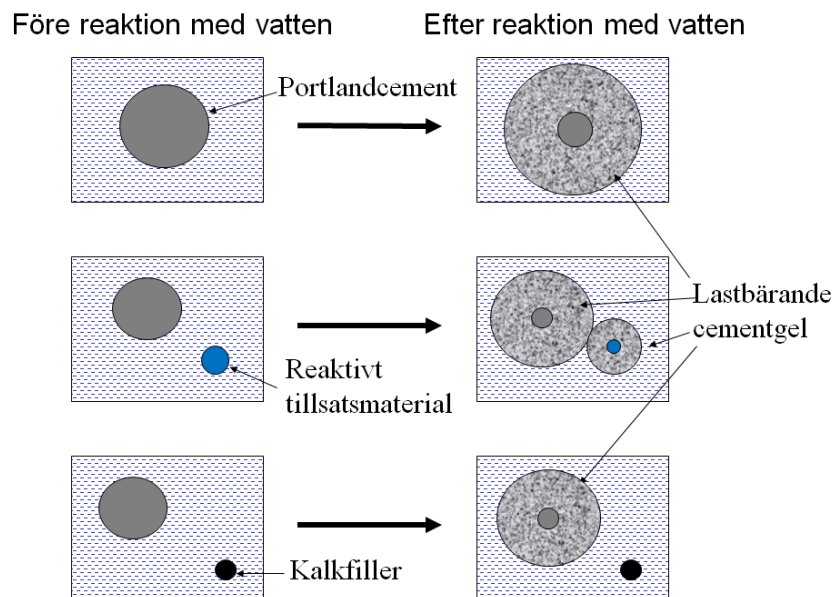
- CEM I: Högst 5%.
- CEM II-A: Högst 20%
- CEM II-B: Högst 35%
- CEM III-A: Högst 65% (enbart slagginblandning kommer i fråga)
- CEM III-B: Högst 80% (Dito)

Dessutom tillåter den svenska betongstandarden (SS 13 70 03) att man blandar in tillsatsmaterial direkt i betong. Mängderna begränsas dock. I mest utsatta miljön tillåts följande mängder räknade i vikt-% av cementvikten:

- Slagg och flygaska: 25% (ingen slagg tillåts i frostmiljö med salt)
- Silikastoft: 6% (11% i miljö utan saltbelastning)

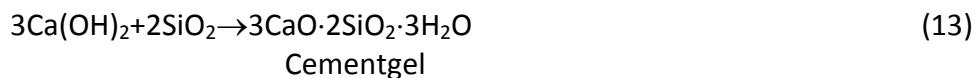
Slagg, flygaska och silikastoft, vilka i sig själva saknar spontan reaktivitet, reagerar när de är inblandade i cementet med den kalciumhydroxid som avspjälkats av portlandcementet. *Detta innebär att "inaktiv" kalciumhydroxid konverteras till cementgel.* Principen visas i Figur 5. Reaktionen kan förenklat skrivas:

- *Reaktion 1:* portlandcement+vatten → cementgel + kalciumhydroxid
- *Reaktion 2:* kalciumhydroxid + SiO₂ från restmaterial → cementgel



Figur 5: Pozzolanreaktionen, principiellt.

Pozzolanreaktionen mellan kalciumhydroxid och kiselsyra kan skrivas:



Enligt ekvationen ger 1 kg kiselsyra 2,8 kg cementgel (utan inräknad kalciumhydroxid), vilken har den approximativa volymen $2,8/2,45=1,14$ liter där 2,45 (kg/liter) är den rena gelens densitet (se avsnitt 4.1.1).

Den totala volymen ren cementgel som skapas av 1 kg cement innehållande x% tillsatsmaterial blir:

$$V_{gel} = (1 - x) \cdot \alpha_{pc} \cdot 0,51 + x \cdot \gamma_{si} \cdot \alpha_{si} \cdot 1,14 \text{ liter} \quad (14)$$

Där α_{pc} är hydrationsgraden hos portlandcementdelen av cementet, α_{si} är hydrationsgraden hos kiselsyran i tillsatsmaterialet, x är halten tillsatsmaterial, γ_{si} är halten kiselsyra i tillsatsmaterialet. 0,51 är volym ren cementgel som skapas av 1 kg cement (se avsnitt 4.1.1). 1,14 är volymen cementgel som skapas av 1 kg kiselsyra.

Några exempel på tillämpningen av ekvationen ges. Som framgår av exempel 2 kan den totala mängden cementgel bli mindre än vad den blivit om enbart portlandcement använts, trots att kalciumhydroxid konverteras till gel.

Exempel 1: Rent portlandcement. Hydratationsgrad 80%:

$$V_{\text{gel}}=0,8 \cdot 0,51=0,41 \text{ liter/kg cement}$$

Exempel 2: Cement med 25% flygaska. Askans halt av reaktiv kiselsyra är 50%.

40% av denna har hydratiserat. Portlandcementets hydratationsgrad är 80%:

$$V_{\text{gel}}=0,75 \cdot 0,80 \cdot 0,51 + 0,25 \cdot 0,5 \cdot 0,4 \cdot 1,14=0,36 \text{ liter/kg cement}$$

(mindre än i ex. 1)

Exempel 3: Cement med 8% silikastoft. Dess halt av reaktiv kiselsyra är 90%.

90% av denna har hydratiserat. Portlandcementets hydratationsgrad är 80%:

$$V_{\text{gel}}=0,92 \cdot 0,80 \cdot 0,51 + 0,08 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1,14=0,45 \text{ liter/kg cement}$$

(mer än i ex. 1)

När tillsatsmaterialet *tillsätts direkt till betongen utan att mängden portlandcement minskas* ökar naturligtvis totala volymen cementgel vilket visas av exempel 4:

Exempel 4: Portlandcement med hydratationsgrad 80%. Tillsatt mängd flygaska 0,25 kg per kg portlandcement. samma reaktionsgrad och mängd kiselsyra som i exempel 2.

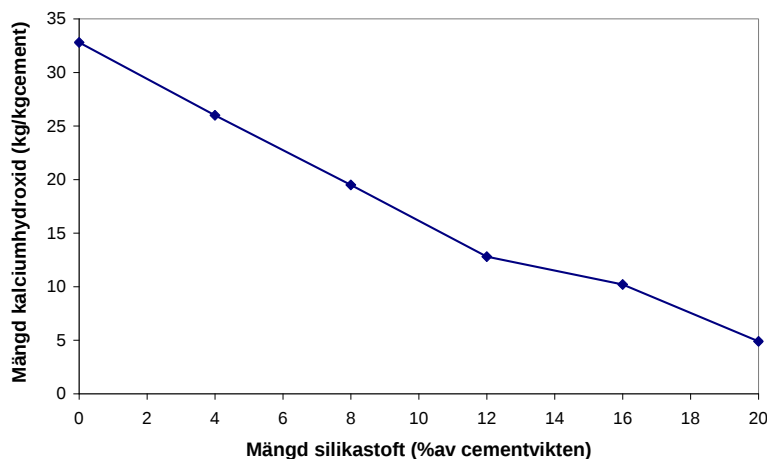
$$V_{\text{gel}}=0,80 \cdot 0,51 + 0,25 \cdot 0,5 \cdot 0,4 \cdot 1,14=0,47 \text{ liter/kg portlandcement}$$

När portlandklinker ersatts med *kalkmjöl* kan man anta att mängden cementgel reduceras i stort sett i samma proportion som andelen kalkmjöl, dvs. 20% inblandning ger 20% minskning av mängden cementgel, vilket bör få negativ effekt på betongens täthet och beständighet. Vissa undersökningar visar dock att kalkstenen kan reagera med aluminater i cementet och skapa karboaluminater; Bonavetti m fl. (2001).

Reaktioner hos cement med *slagg* är mer komplicerade än den rena puzzolanreaktionen. Visserligen sker även här en puzzolanreaktion mellan slaggens innehåll av kiselsyra (ca 40%) och den kalciumhydroxid som skapats av portlandcementandelens reaktion, men slaggen innehåller också stor mängd egen kalk (ca 40%) samt aluminat och andra komponenter. Masugnsslagg kan i princip betraktas som ett slags kalkfattigt och kiselsyrarikt cement. Därför kommer slaggcement att skapa större mängd cementgel än ett cement med samma andel av andra, rena puzzolana tillsatsmaterial. Detta är orsaken till att man i CEM III tillåter högre mängd slagg än vad som gäller t.ex. för flygaska, där maxgränsen är satt till 35%.

3.2.2 Cementpastans alkalitet

Puzzolanreaktionen medför att mängden kalciumhydroxid minskar. Exempel på att detta sker visas i Figur 6. Vid 20% inblandning av silikastoft har i stort sett all kalciumhydroxid försvunnit. Den maximala inblandningen 10% medför i stort sett en halvering av mängden kalciumhydroxid.



Figur 6: Kalciumhydroxidmängden i 2 månader gammal cementpasta som funktion av mängden inblandat silikastoft. Sellevold. (1982).

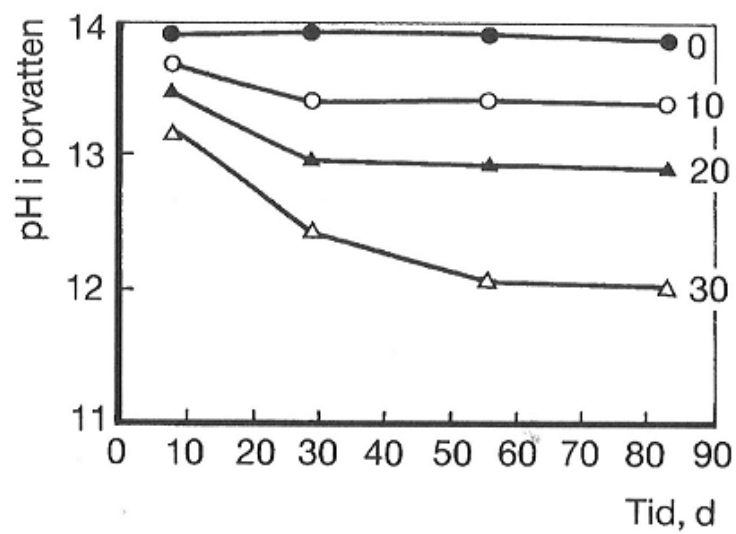
På motsvarande sätt ger även inblandning av flygaska en minskning av mängden kalciumhydroxid.

Exempel på att även masugnsslagg minskar mängden kalciumhydroxid visas i Tabell 2. I ett slaggcement med 65% slagg återstår bara ca 20% av den ursprungliga mängden.

Tabell 2: Inverkan av halten masugnsslagg på betongens kalciumhydroxidhalt. Peterson & Warris (1981).

Cementets slagghalt, %	Relativ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -halt vid 28 dygns ålder
0	100%
30	59%
65	21%

Portlandcement innehåller alltid en viss mängd alkalioxid; Na_2O , K_2O . Dessa komponenter reagerar snabbt med puzzolaner vilket medför en sänkning av betongens pH-värde. Exempel på denna effekt hos betong med silikastoft visas i Figur 7. Samma effekt har observerats hos betong med slagg, Bijen (1989).



Figur 7: Inverkan av silikastoftinblandning på porlösningens pH-värde.
Page&Wennesland (1985).

4 Cementpastans fysikaliska struktur

4.1 Portlandcement

Beskrivningen nedan baseras på arbete av Powers (1962), presenterat i kortfattad form i Fagerlund (1994). Det förutsätts att cementet har en sådan sammansättning att 1 kg hydratiserat cement binder 0,25 kg vatten kemiskt. Detta gäller i stort sett för normalt svenskt portlandcement. Andra portlandcement kan ha något annorlunda vattenbindning. Exempel ges i Powers (1962).

4.1.1 Hydratationsprodukternas struktur

Cementgelen är ett kolloidalt material bestående av en extremt finporös massa av små partiklar. Detta är orsaken till namnet "gel" eller "fast gel".

Porositeten hos cementgelen är ca 28%.

"Gelporerna" är extremt små. Medeldiametern är ca 10-15 Å (1-1,5 nanometer) vilket kan jämföras med vattenmolekylens diameter som är 3,5 Å.

Partiklarna, varav cementgelen är uppbyggd, består av små fibrer och plattor som har en bredd av ca 25-30 Å.

C kg cement skapar följande volym hydratationsprodukter inkluderande den kalciumhydroxid som skapas:

$$0,71 \cdot \alpha \cdot C \quad \text{liter} \quad (15)$$

Volymen ren cementgel (exkl. kalciumhydroxid) är:

$$0,51 \cdot \alpha \cdot C \quad (16)$$

Dvs. vid fullständig hydrataion är volymen hydratationsprodukter $0,71 \cdot C$ och volymen ren cementgel $0,51 \cdot C$.

Hydratationsprodukternas densitet inkl. kalciumhydroxid är 1,76 kg/liter. Själva cementgelpartiklarnas densitet (exkl. kalciumhydroxid) är 2,45 kg/liter.

4.1.2 Cementpastans porositet

Cementpastan är starkt porös. *Totalporositeten* varierar mellan ca 35-40 vol-% för den mest högvärdiga "anläggningsbetongen" och ca 55-60% för enkel "husbyggnadsbetong". Avgörande för porositeten är det s.k. vattencementtalet, vct , och cementets reaktionsgrad (hydratationsgrad), α . För vanlig portlandcementpasta gäller för totalporositeten:

$$P_{tot} = \frac{vct - 0,19 \cdot \alpha}{vct + 0,32} \quad (17)$$

vct definieras enligt Ekv. (1). Hydrationsgraden definieras enligt Ekv. (11).

Totalporositeten minskar således med sänkt vct . Men även den genomsnittliga *porstorleken* minskar med sänkt vct . Porerna kan nämligen uppdelas i två typer:

1. Gelporer med vidd 10-15 Å.
2. Kapillärporer med vidd mellan ca 100 Å (10 nanometer) och ca 1µm (1000 nanometer).

Totala volymen av dessa båda portyper beskrivs av:

Pastans gelporositet. För portlandcementpasta gäller:

$$P_{gel} = \frac{0,20 \cdot \alpha}{vct + 0,32} \quad (18)$$

Pastans kapillärporositet. För portlandcementpasta gäller:

$$P_{kap} = \frac{vct - 0,39 \cdot \alpha}{vct + 0,32} \quad (19)$$

Som exempel på tillämpning av formlerna ovan visas porförhållandena i två "ytterlighetsbetonger" och en normal "vattenbyggnadsbetong". Enbart pasta-fasens porositetsförhållanden beräknas. Betongens porositetsdata fås genom multiplikation med volymandelen pasta. Det förutsätts då att ballasten är icke-porös.

*Alt 1: Högpresterande anläggningsbetong efter ca 1 månads ålder: $vct=0,38$.
 $\alpha=0,65$:*

$$P_{tot} = \frac{0,38 - 0,19 \cdot 0,65}{0,38 + 0,32} = 0,366$$

$$P_{gel} = \frac{0,20 \cdot 0,65}{0,38 + 0,32} = 0,185$$

$$P_{kap} = \frac{0,38 - 0,39 \cdot 0,65}{0,38 + 0,32} = 0,181$$

Dvs. 50% av totalporositeten utgörs av de extremt fina gelporerna.

Alt 2: Enkel husbyggnadsbetong efter ca 1 månads ålder: vct=0,80. $\alpha=0,80$.

$$P_{tot} = \frac{0,80 - 0,19 \cdot 0,80}{0,80 + 0,32} = 0,579$$

$$P_{gel} = \frac{0,20 \cdot 0,80}{0,80 + 0,32} = 0,143$$

$$P_{kap} = \frac{0,80 - 0,39 \cdot 0,80}{0,80 + 0,32} = 0,436$$

Dvs. totalporositeten är 60 % högre än i anläggningsbetongen , samtidigt som gelporerna endast utgör 25% av totalporositeten.

Alt 3: "Vattenbyggnadsbetong" efter ca 1 månads ålder: vct=0,55. $\alpha=0,75$.

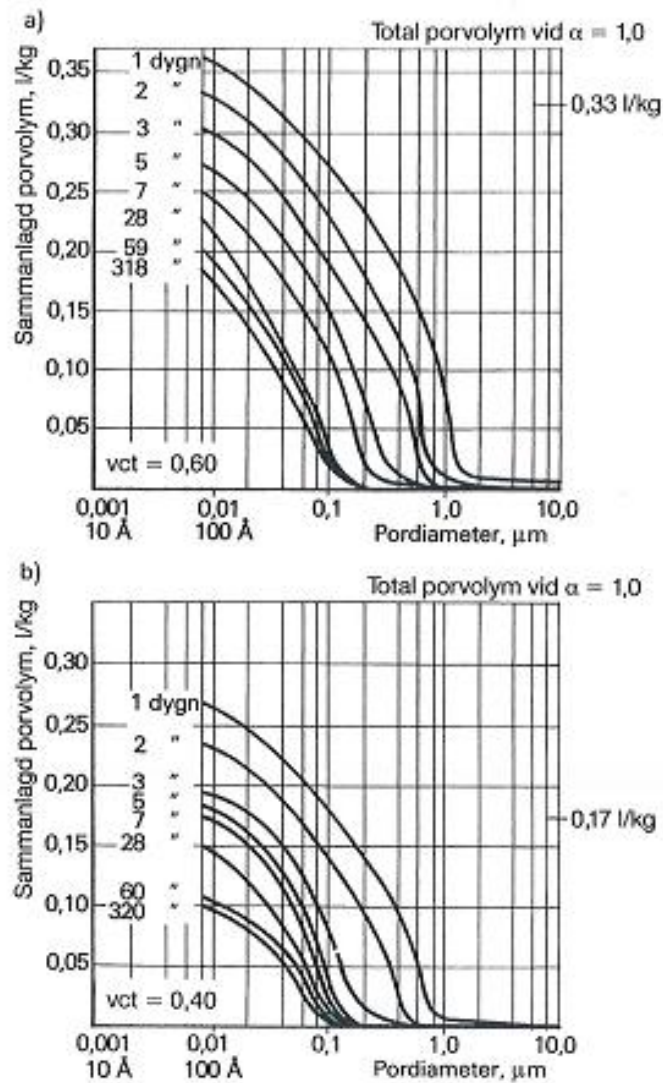
$$P_{tot} = \frac{0,55 - 0,19 \cdot 0,75}{0,55 + 0,32} = 0,468$$

$$P_{gel} = \frac{0,20 \cdot 0,75}{0,55 + 0,32} = 0,172$$

$$P_{kap} = \frac{0,55 - 0,39 \cdot 0,75}{0,55 + 0,32} = 0,296$$

Som framgår av ekvationerna minskar *totalporositeten* med ökande hydrationsgrad (ökande ålder) hos cementpastan. Ökande ålder innebär också att porstrukturen förfinas; dels ökar andel fina gelporer, dels minskar den genomsnittliga storleken hos kapillärporerna. Det senare förhållandet visas i Figur 8, som visar porstorleksfördelningen i området 10-1000 nanometer vid olika ålder hos två cementpastor med olika vct (0,40 resp. 0,60). Porstorleksfördelningen har bestämts med kvicksilverporosimetri där kvicksilver pressas in i materialet under gradvis ökat tryck. Det nödvändiga trycket för att pressa in kvicksilver i en por är omvänt proportionellt mot porradien. Volymen inpressat

kvicksilver vid ett visst tryck är därför ett mått på volymen porer med radie som motsvarar trycket.



Figur 8: Porstorleksfördelning hos portlandcementpasta som funktion av åldern.
Övre figur: $v_{ct}=0,60$. Undre figur: $v_{ct}=0,40$. Winslow&Diamond (1970).

4.1.3 Permeabilitet

Konsekvensen av inverkan av vct och α på cementpastans porstruktur är att dess permeabilitet minskar kraftigt med sänkt vct och ökad hydratationsgrad. Begreppet *permeabilitet* måste då kopplas till någon transportegenskap. Intressanta sådana när det gäller kemisk påverkan är:

- Permeabilitet för vatten under yttre övertryck. Drivkraft är totaltrycksgradient.
- Permeabilitet för vattentransport utan övertryck, t.ex. kapillaritet. Drivkraft är vattenhaltsgradient.
- Permeabilitet för jontransport. Drivkraft är koncentrationsgradient.

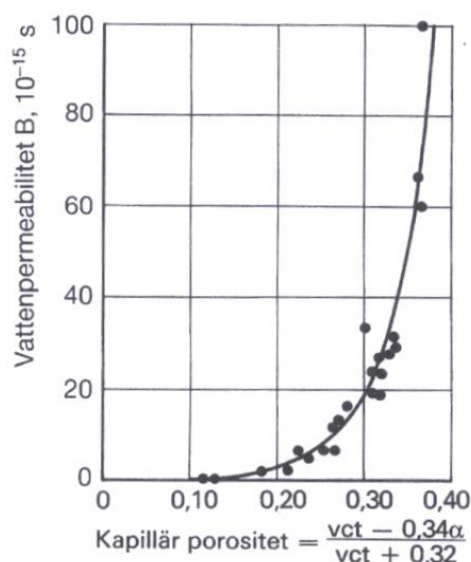
Permeabilitet för vatten under övertryck

Inverkan av kapillära porositeten (dvs. inverkan av vct och hydratationsgrad) på *permeabilitet för vatten under övertryck* visas i Figur 9.

Permeabilitetskoefficienten B i figuren definieras av följande ekvation:

$$q = B \cdot \frac{\Delta P}{L} [s] \quad (20)$$

Där q är vattenflödet ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$). ΔP är tryckdifferensen (Pa) över sträckan L (m). Det antas att tryckgradienten är linjär vilket gäller när ett prov kommit till jämvikt med yttre trycken.



Figur 9: Permeabiliteten hos portlandcementpasta som funktion av den kapillära porositeten (något annorlunda definierad än i Ekv. (19); faktorn 0,39 är ersatt med 0,34). Powers et al (1954).

Som synes är effekten av kapillärporositeten mycket stor. Som exempel tas de tre betongtyperna ovan. Definition av kapillär porositet som i figuren:

Avancerad anläggningsbetong (vct 0,38):

$$P_{\text{kap}} \approx 0,22: B \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ (s)}$$

Enkel husbyggnadsbetong (vct 0,80):

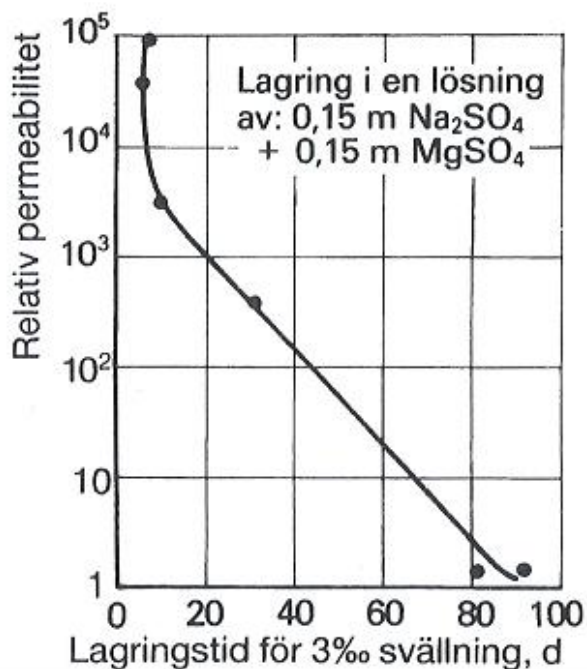
$$P_{\text{kap}} \approx 0,47: B \gg 100 \cdot 10^{-15} \text{ (s)}$$

Vattenbyggnadsbetong (vct 0,55):

$$P_{\text{kap}} \approx 0,34: B \approx 30 \cdot 10^{-15} \text{ (s)}$$

Exemplen visar att en ökning av vct från 0,38 till 0,55 medför en ca 15-faldig ökning av vattenpermeabiliteten. En cementpasta med vct överstigande ca 0,70 har mycket hög permeabilitet. Den kan aldrig bli tät mot vatten under övertryck.

Ökad permeabilitet innebär att angreppshastigheten ökar hos alla angreppstyper som styrs av inflöde av aggressiva ämnen i betongen. Dit hör flera saltangrepp, t.ex. sulfatangreppet. Ett exempel på inverkan av vattenpermeabiliteten på beständigheten mot sulfatangrepp visas i Figur 10.



Figur 10: Inverkan av betongens permeabilitet för vatten under tryck på beständigheten mot sulfatangrepp. Schwiete&Ludwig (1966). (m=lösningens mol-koncentration).

Kapillaritet

Om den icke vattenmättade betongen (cementpastan) exponeras för fritt vatten tar den upp vatten genom kapillärsugning. I normal betong med måttligt låga vct vandrar vattnet in som en front som skiljer ett vattenfyllt porsystem beläget närmast det yttre vattnet från ett torrt (eller inte helt vattenfyllt) porsystem bortom fronten. Vattenfronten vandrar in med en hastighet som beskrivs av följande ekvation:

$$t = m \cdot z^2 \quad (21)$$

Där t (s) är tiden från det betongen utsattes för vatten, z (m) är avståndet från den exponerade ytan till fronten, m (s/m^2) är en *materialegenskap* som beror på porsystemets finhet. Ju finare porsystem desto högre värde på m , och desto långsammare tränger fronten in. Koefficienten m kallas ibland *motståndstalet*.

Ensidigt insugen vattenmängd innanför en vattenexponerad (sug-)area av 1 m^2 , Q_w (kg/m^2), beskrivs på följande sätt eftersom, enligt definitionen av m , frontens inträngning är proportionell mot kvadratroten ur tiden:

$$Q_w = k \cdot t^{0,5} \quad (22)$$

Där k ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$) är *kapillaritetstalet*.

k är ingen materialegenskap utan bestäms av hur stor porvolym, P_w (m^3/m^3) som var tom när sugningen började och som därför kan vattenfyllas vid kapillärsugningen. k bestäms även av hur djupt vattenfronten trängt in, vilket i sin tur bestäms av motståndstalet m . k kan då beräknas ur följande ekvation:

$$k = \frac{1000 \cdot P_w}{m^{0,5}} \quad (23)$$

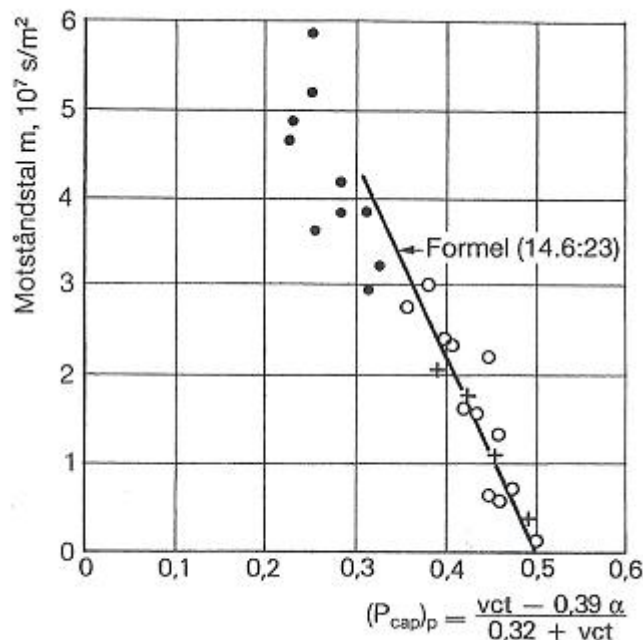
Där 1000 är vattnets densitet (kg/m^3).

När betongen (cementpastan) är så torr att endast gelporerna är vattenfyllda när sugningen startar (motsvarar jämvikt med 30-50% rel. fukt) är $P_w = P_{\text{kap}}$ där P_{kap} definieras av Ekv. (19).

Motståndstalet hos portlandcementbetong som har en startfukthalt som motsvarar jämvikt med 50% rel. fukt (rf) har approximativt visat sig öka linjärt med minskad kapillär porositet. Detta framgår av mätningar som visas i Figur 11. Följande ungefärliga samband gäller enligt figuren:

$$m \approx (11 - 22 \cdot P_{\text{kap}}) \cdot 10^7 \frac{\text{s}}{m^{0,5}} \quad (24)$$

Överslagsmässigt antas denna ekvation gälla även om betongen skulle ha mer vatten när sugningen startar än vad som motsvarar jämvikt med 50% rf.



Figur 11: Motståndstalet för cementbruk som funktion av den kapillära porositeten. Proverna var konditionerade vid ca 50% relativ fuktighet när vatteninsugningen startade. Fagerlund (1980).
(Formel 14.6:23 i figuren är densamma som Ekv. (24) ovan)

Vattenupptagningen under 1 dygn ($8,64 \cdot 10^4$ s) beräknas för de tre betongtyperna enligt ovan. Det antas att startfukthalten motsvarar 50% rf. Data för denna fukthalt ges i Nilsson (1980). Beräkningsresultatet visas i Tabell 3.

Tabell 3: Beräknad kapillär vattenabsorption under 1 dygn för tre betongtyper.

Betongtyp	Cementpasta						Betong	
	P_{kap} m^3/m^3	P_w m^3/m^3	m	k	Q_w kg/m^2	Djup z cm	Volandel pasta ¹⁾	Q_w kg/m^2
Anlägg.	0,181	0,10	$7,0 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	3,5	3,5	0,32	1,1
Husbygg.	0,436	0,34	$1,4 \cdot 10^7$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	26,7	7,9	0,25	6,7
Vattenbygg.	0,296	0,19	$4,5 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	8,2	4,4	0,28	2,3

1. Baseras på följande vattenhalter i färska betongen: 170 , 175 resp. 180 liter per m^3 med högst vattenhalt för betongen med högst vct.

Som synes är vattenabsorptionen starkt beroende av vct. En sänkning av vct från 0,55 till 0,38 minskar insugen mängd i pastan med 60%. Det innebär att även mängden lösta aggressiva ämnen bör minska med sänkt vct, vilket innebär att ett eventuellt angrepp går långsammare och livslängden förlängs. Insugningsdjupet minskar med 20% vilket också har en positiv inverkan.

Jondiffusion

Joner i vattenlösning vandrar från platser med högre koncentration till platser med lägre koncentration. Ett exempel är där en betong placeras i kontakt med vatten med lösta joner av en typ som saknas i betongen. Joner från lösningen vandrar då in i betongen genom diffusion. Diffusionen beskrivs av Fick's lag:

$$q = -\delta \cdot \frac{dc}{dx} \quad (25)$$

Där q ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$) är jonflödet, δ (m^2/s) är transportkoefficienten, c (kg/m^3) är jonkoncentrationen, x (m) är lägeskoordinaten utgående från den exponerade betongytan, dc/dx (kg/m^3 per m) är gradienten i jonkoncentration.

När kloridbindningen sker momentant beskrivs tidsförloppet av:

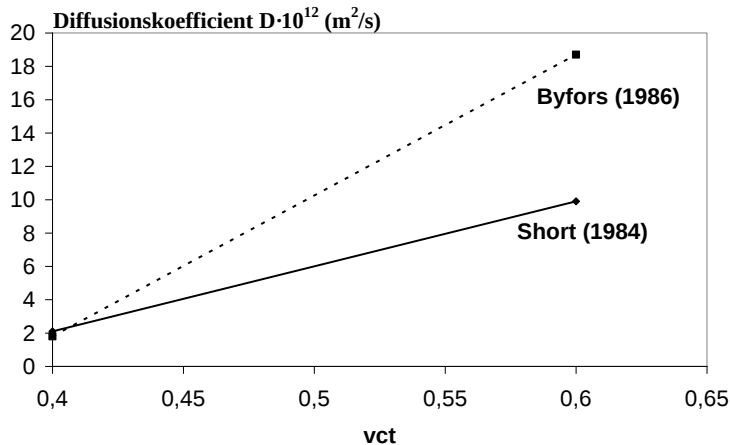
$$\frac{dc}{dt} = \delta \cdot \frac{d^2c}{dx^2} \quad (26)$$

Transportkoefficienten ("jonpermeabiliteten") är beroende av cementpastans porositet och porstorleksfördelning, dvs. av vattencementtal och hydrationsgrad. Inverkan av dessa faktorer är dock betydligt mindre än vad som gäller för vattenpermeabilitet under tryck. Exempel på mätningar av diffusion av kloridjoner genom vattenmättad cementpasta visas i Figur 12. Mätningen har genomförts när provet kommit till jämvikt, dvs. ingen effekt av bindning av klorid till fasta massan finns med; mätningarna visar alltså den "rena permeabiliteten".

I figuren har transportkoefficienten antagits vara direkt proportionell mot vct. Ett mer sannolikt vct-beroende är:

$$\delta \approx a \cdot vct^b \quad (27)$$

Där a och b är materialkoefficienter.



Figur 12: Mätningar av transportkoefficienten för kloridjoner i vattenmättad cementpasta. Ingen hänsyn till bindning av klorid.

Följande värden skulle gälla för de tre betongtyperna förutsatt att ballasten saknar betydelse. δ antas följa Ekv. (27). Värdet på δ beror på vilken kurva i Figur 12 som används.

Avancerad anläggningsbetong (vct 0,38):	$\delta \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Enkel husbyggnadsbetong (vct 0,80):	$\delta \approx 30 \text{ à } 80 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Vattenbyggnadsbetong (vct 0,55):	$\delta \approx 7 \text{ à } 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

En ökning av vct från 0,38 till 0,55 ökar transportkoefficienten med en faktor ca 3 à 5. Detta innebär att mängden intransporterade joner under en viss tidsrymd också ökar, vilket ökar ev. kemiskt angrepp och minskar livslängden. *Resonemanget förutsätter att effekten av bindning av joner till fasta fasen i betongen försummas.*

När bindning av joner sker reduceras transportkoefficienten kraftigt. Diffusionsekvationen kan då skrivas, förutsatt att bindningen är momentan:

$$\frac{dc}{dt} = \delta_{eff} \cdot \frac{d^2c}{dx^2} \quad (28)$$

Där δ_{eff} är en *effektiv* transportkoefficient som tar hänsyn till bindning. Om bindningen är linjär, dvs. direkt proportionell mot koncentrationen hos den diffunderande lösningen, blir transportkoefficienten:

$$\delta_{eff} = \frac{\delta}{1 + K} \quad (29)$$

Där K är förhållandet mellan bundna och fritt rörliga joner.

Exempel

Vid $K=2$, dvs. bundna (immobiliserade) joner är dubbelt så många som fritt rörliga, sker inflödet av joner med en hastighet som är enbart $1/3$ av hastigheten utan bindning.

Betongens förmåga att binda joner bestäms av cementpastans kemiska sammansättning. Olika portlandcement tycks ge olika bindningskapacitet. Exempel visas i Figur 17. Anläggningscementet ger betydligt högre bindning av kloridjoner än vanligt portlandcement vilket troligen kan förklaras av den låga alkaliteten och den höga halten C_4AF . Inverkan av cementet på bindning av andra jonslag är okänd.

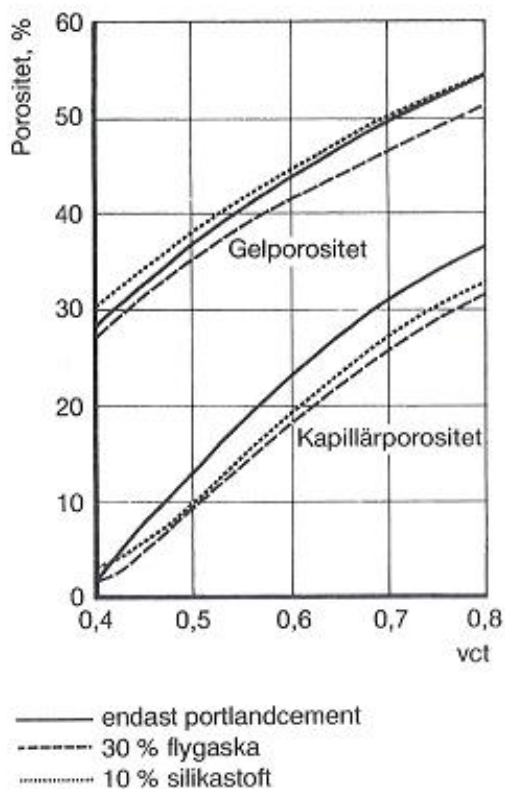
4.2 Alternativa cementtyper

4.2.1 Struktur

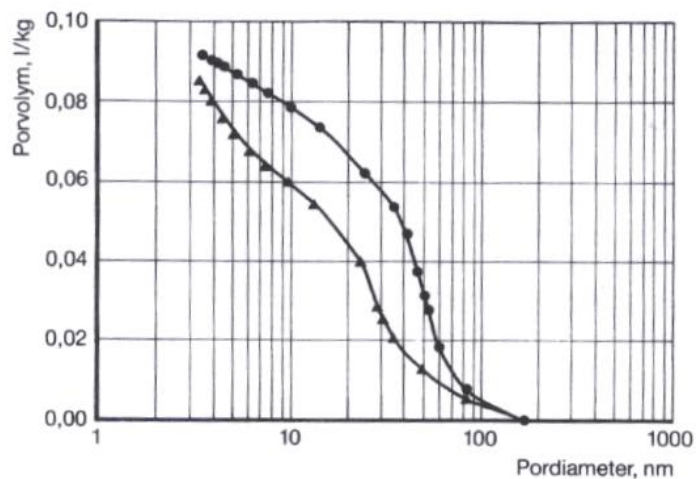
I stort sett bildas samma typ av hydratationsprodukter hos cement med puzzolaner som hos rent portlandcement. En beräkning av gelporositet och kapillärporositet hos cementpasta med 10% silikastoft resp. 30 % flygaska (kiselsyrahalt 60%) visas i Figur 13. Enligt denna ändras totalporositeten marginellt när puzzolaner blandas in i cementet. Andelen kapillärporer minskar däremot något medan andelen gelporer ökar. Formler för porositetsberäkning ges i Fagerlund (1983).

Att silikastoft ger minskad genomsnittlig porstorlek framgår även av Figur 14 där resultat av kvicksilverporosimetermätningar visas.

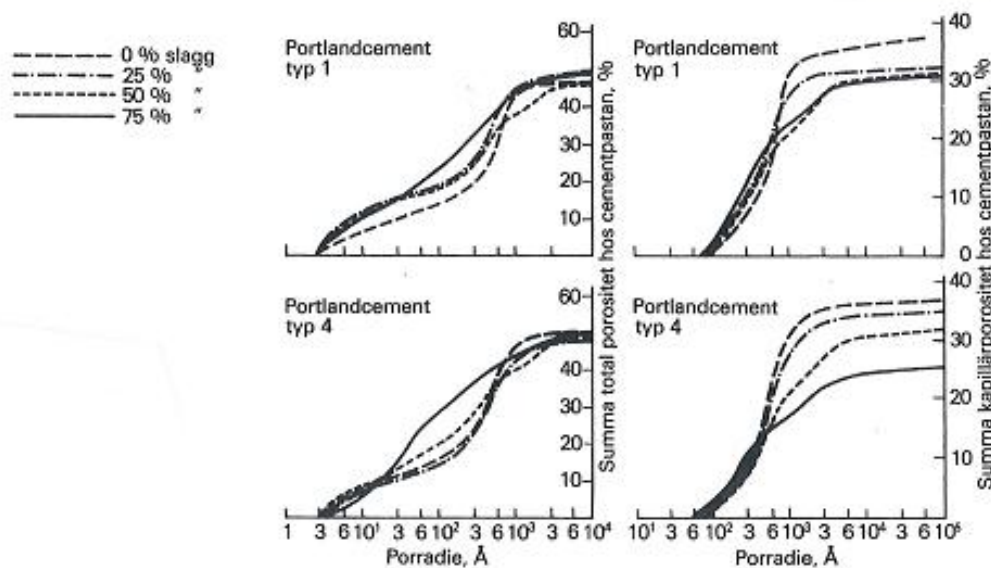
Samma tendens finns hos slaggcement vilket visas av Figur 15. Två typer av portlandklinker har blandats med 3 olika halter av en viss masugnsslagg. Totalporositeten påverkas inte. Däremot blir mängden kapillärporer allt mindre ju mera slagg som blandas in. Konsekvensen är att mängden gelporer ökar. Orsaken är sannolikt att mera cementgel bildas eftersom den kalciumhydroxid som produceras av det rena portlandcementet konverteras till cementgel vid reaktionen med slaggen.



Figur 13: Beräknad gelporositet och kapillärporositet hos cementpasta med silikastoft eller flygaska. Antagna hydratationsgrader är 100% hos cement och silikastoft samt 50% hos kiselsyran i flygaskan. Övre kurvor är totalporositeten. Fagerlund (1994).



Figur 14: Porstorleksfördelning hos cementpasta med rent portlandcement och med 10% inblandat silikastoft. Vattencemenntal 0,30. Zhang&Gjörv (1991). Övre kurva: rent portlandcement.



Figur 15: Porstorleksfördelningar hos portlandcement och slaggcement.
 Romberg (1971). Vänstra bilder: totalporositet.
 Högra bilder: kapillärporositet.

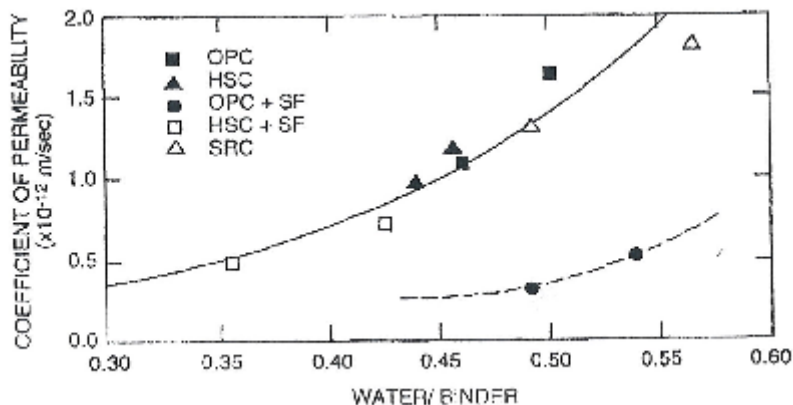
4.2.2 Permeabilitet

Konsekvensen av den finare porstrukturen hos betong med cement med inblandade tillsatsmaterial är att betongen normalt blir tätare mot inträngande ämnen, t.ex. vatten eller lösta salter. Det finns inte så många direkta jämförelser mellan betong med rent portlandcement och blandcement genomförda med exakt samma vct och utan hänsyn till bindning av diffunderande joner. Några exempel skall dock ges.

Permeabilitet för vatten under övertryck

Resultat av mätning av vattenpermeabilitet hos betong med slaggcement (60% slagg) och betong med inblandat silikastoft (7%) ges i Figur 16. De två rena portlandcementen är dels ett normalt, dels ett sulfatresistent.

Som väntat ökar permeabiliteten med ökande vct. Inverkan av slagg och silikastoft är liten förutom för en blandning med vanligt portlandcement och 7% silikastoft. Däremot ses ingen positiv effekt när silikastoftet blandas in i betong med slaggcement. Orsaken är troligen att silikastoftets reaktivitet då är låg eftersom större delen av kalciumhydroxiden från "portlandreaktionen" konsumeras vid slaggreaktionen.



Figur 16: Permeabilitetskoefficienten för vatten under tryck för betong med portlandcement; Khatri m fl (1997). OPC : normalt portlandcement. HSC: slaggcement. SRC: sulfatresistent portlandcement. SF: silikastoft.

Kapillaritet

Mätningar av vatteninträngningshastigheten definierad av m i ekv (21) och kapillaritetstalet k definierat av ekv (23) har gjorts på slaggcementbetong som är 3 månader gammal och med olika slagghalt. $v_{ct}=0,40$ för alla betongtyper. Resultatet visas i Tabell 4:

Tabell 4: Kapillaritetsdata för slaggcementbetong. Startfukthalt motsvarande ca 20% rf; Fagerlund (1982).

Slagghalt	m (s/m ²)	k (kg/m ² ·s ^{0,5})
0%	$2,6 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{-2}$
15%	$3,7 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
40%	$5,1 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
65%	$4,8 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^{-2}$

Kapillariteten uttryckt med motståndstalet m minskar med ökad slagghalt upp till 40% inblandning vilket säkerligen beror på slaggcementbetongens finare porstruktur. Därefter ökar kapillariteten igen.

Några motsvarande data för flygaskacement och silikastoftcement har inte kunnat hittas. Tendensen torde vara likartad eftersom även dessa material ger en minskning av genomsnittliga porstorleken.

Jondiffusion

Ren jondiffusion, dvs. diffusion utan att bindning förekommer, har studerats för kloridjondiffusion av Short (1984) och i en mindre studie av Byfors (1986A). Resultatet visas i Tabell 5. Både slagg och flygaskainblandning sänker diffusionskoefficienten. Däremot kan silikastoft öka kloridpermeabiliteten.

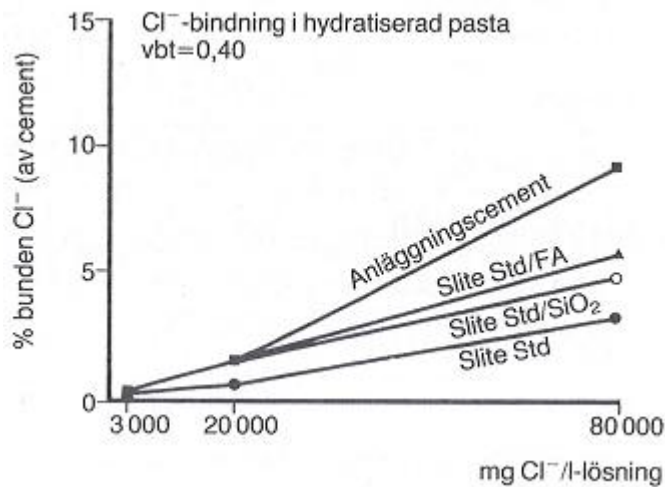
Tabell 5: Inverkan av inblandning av olika mineraliska tillsatsmaterial på den rena kloridjontransporten genom cementpasta.

Typ av tillsatsmaterial	Inblandad mängd %	Diffusionskoefficient $\cdot 10^{-12}(\text{m}^2/\text{s})$		Källa
		Vbt 0,60 ¹⁾	Vbt 0,40	
Inget	0	9,9	2,1	Short (1984)
Slagg	65	0,97	0,11	
Flygaska	15	8,2	1,3	
	35	2,5	0,3	
Silikastoft	10	12,2	3,0	
Inget	0	18,7	1,8	Byfors (1986A)
Silikastoft	10	9,9	1,8	

- 1) vbt definieras $W/PC(1+k)$ där PC är mängden portlandcement i blandningen och k är mängden tillsatsmaterial i relation till mängden portlandcement.

När man tar hänsyn till bindning har många försök visat att diffusion av lösta *kloridjoner* går betydligt långsammare i betong med tillsatsmaterial. Orsaken anses huvudsakligen vara att den kloridbindande förmågan ökar. Exempel på inverkan av flygaska och silikastoft på kloridbindning visas i Figur 17. Flygaska ger nästan dubbelt så hög kloridbindning som portlandcementet, Slite Std. Slagg anses ge ännu högre bindningskapacitet. Den främsta orsaken till att bindningen ökar antas vara att flygaska och slagg innehåller aluminat och ferrit som har förmåga att binda klorid. När det gäller silikastoft, vilket saknar aluminat och ferrit, kan den ökade mängden cementgel orsakad av silikastoftets reaktion bidra till att mer kloridjoner adsorberas. Dessutom är det förmodligen så att den lägre alkaliteten hos betong med puzzolaner ger högre kloridbindningsförmåga.

Några motsvarande mätningar av inverkan av cementtypen på bindning av andra joner, t.ex. sulfatjonen, saknas.



Figur 17: Kloridbindande förmåga hos olika bindemedel som funktion av yttre kloridkoncentration. Byfors (1986B). FA: flygaska. SiO_2 : silikastoft. Slite Std: högalkaliskt portlandcement. Anläggningscement: lågalkaliskt portlandcement.

Mätning av kloridprofiler hos betong med tillsatsmaterial kan användas för att bestämma den effektiva transportkoefficienten (inkl. bindning) för kloridjonen. Några resultat ges i Tabell 6 för rent portlandcement, samt för portlandcement med 30% flygaska resp. 70% masugnsslagg. Proverna har varit exponerade i havet under 8 år. Kloridprofiler har bestämts efter olika lång exponering. Den positiva inverkan av tillsatsmaterialen är tydlig

Tabell 6: Kloridtransportkoefficient utvärderad ur kloridprofiler hos fältexponerade betongblock. Thomas&Bamforth (1999).

Cementtyp	Exponeringstid i saltvatten år	Transportkoefficient m^2/s
Portlandcem.	2	7,6
	3	5,6
	8	8,7
30% flygaska	2	1,9
	3	1,1
	8	0,6
70% slagg	2	1,9
	3	1,0
	8	0,6

Det är inte säkert att diffusion av andra aggressiva joner, t.ex. sulfatjoner, påverkas på samma sätt av tillsatsmaterial. Se dock avsnitt 7.2.5.

5 Salt

Enkelt uttryckt bildas ett salt genom en reaktion (neutralisation) av en syra med en bas. Ett salt kan antingen vara oorganiskt eller organiskt.

Oorganiskt: Natriumklorid



Organiskt: Kalciumacetat

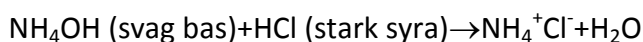


Salt består alltså av en positiv del (katjon) som ofta utgörs av en metall och en negativ del (anjon). I de båda exemplen ovan utgörs katjonen av Na^+ resp. Ca^{2+} . Anjonen utgörs av Cl^- (kloridjon) resp. CH_3COO^- (acetatjon).

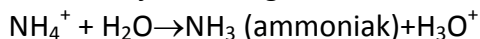
Flertalet viktiga salter i samband med påverkan på betong är starkt vattenlösliga, dvs. de dissocieras så gott som helt i vatten till sina komponenter, katjoner resp. anjoner.

Salter kan vara *basiska* vilket innebär att de bildar hydroxyljoner (OH^-) i vattenlösning, vilken då blir basisk. Andra salter är *sura*, dvs. de bildar hydroniumjoner (H_3O^+) i vattenlösning, vilket gör denna sur. Andra salter är *neutrala*, dvs. vattenlösningen blir neutral.

Ett *surt salt* bildas av en *svag bas* och en *stark syra*. Ett exempel är ammoniumklorid:

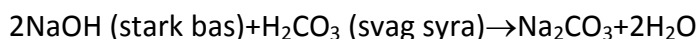


Ammoniumjonen reagerar med vatten enligt:

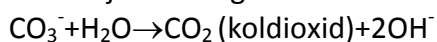


Där H_3O^+ -jonen ger sur reaktion.

Ett *basiskt salt* bildas av en *stark bas* och en *svag syra*. Exempel är natriumkarbonat:

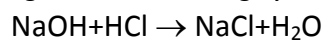


Karbonatjonen reagerar med vatten enligt:



Där OH^- -jonen ger basisk reaktion.

Ett *neutralt salt* bildas antingen av en *stark bas* och en *stark syra* eller av en *svag bas* och en *svag syra*. Exempel på det förra är kalciumklorid:



6 Saltangrepp på betong-huvudtyper

Många salter i vattenlösning angriper betong. Angreppet kan vara av två huvudtyper:

1. *Kemiskt saltangrepp* där saltet reagerar med komponenter i betongen. Ett viktigt exempel är sulfatangreppet. Oftast är det anjonen som är den destruktiva komponenten, men i vissa fall har även katjonen en påverkan. Angreppet kan medföra volymexpansion eller upplösning av betongen. Konsekvensen är hållfasthetsförlust och annan försämring av konstruktionens funktion.
2. *Fysikaliskt saltangrepp*. Detta kan indelas i två huvudtyper:
 - *Salt-frostangreppet*. I flertalet fall är det fysikaliska angreppet dominant. Exempel är påverkan av frost kombinerad med en natriumkloridlösning eller havsvatten. För andra salter har kemiskt angrepp en viss ytterligare påverkan, framförallt vid höga saltkoncentrationer. Exempel är påverkan av frost kombinerad med kalciumklorid.

Konsekvensen av salt-frostangreppet är avskalning av betongytan och därmed försämring av skyddet mot armeringskorrosion.

- *Typ 2: Saltsprängning* orsakad av kristalltillväxt inne i porsystemet. Konsekvensen är avskalning av angripen yta och därmed minskning av täcksiktet över armeringen.

7 Kemiskt saltangrepp

7.1 Allmänt

Betong som exponeras för vatten med lösta salter kan angripas av dessa. Angreppet är först och främst begränsat till ytan men kan också ske på större djup från betongytan när de aggressiva salter, vilka ännu inte reagerat med betongen tränger in. Detta kan ske genom yttre övertryck, genom kapillär-sugning eller genom diffusion. Betongen kan förstöras på i huvudsak två sätt:

- Reaktionsprodukterna är expansiva och spränger därför sönder betongen. Angreppet är både ett ytangrepp och ett inre angrepp.
- Reaktionen löser upp betongen. Angreppet sker där saltlösningen är sur eller där en jonbytesmekanism mellan cementgelen och angripande ämne medför nedbrytning av cementgelen.

Saltangrepp orsakas av aggressiva ämnen i mark och vatten. Det är främst sulfatjoner (SO_4^{2-}), magnesiumjoner (Mg^{2+}) och ammoniumjoner (NH_4^+) som är skadliga. I Tabell 7 visas riktlinjer för vilka koncentrationer av olika ämnen som ger olika angreppsgrader. Inverkan av joner i havsvatten beskrivs i avsnitt 7.4.

Tabell 7: Aggressivitet hos lösta joner i mark och vatten enligt Cembureau (1978).

	Angreppsgrad				
	Ingen	Svag	Måttlig	Stark	Mycket stark
<i>I vatten</i>					
Sulfat mg SO_4^{2-} /l	<200	200-600	600-3000	3000-	>6000
Ammonium mg NH_4^+ /l	<15	15-30	30-60	6000	>100
Magnesium mg Mg^{2+} /l	<100	100-300	300-1500	60-100 1500-3000	>3000
<i>I Jord</i>					
Sulfat mg SO_4^{2-} /l	<2000	2000-6000	6000-12000	>12000	Har aldrig observerats

Listor över olika ämnens aggressivitet mot betong finns i Rombén (1994) och i Woods (1968).

7.2 Sulfatangrepp

7.2.1 Allmänt

Sulfatangrepp på betong karakteriseras av volymexpansion hos betongen ofta ackompanjerad av uppsprickning och uppmjukning av ytlagret. Det orsakas av lösta sulfathaltiga eller sulfidhaltiga ämnen som tränger in i betongen. Sådana ämnen förekommer i viss typ av mark. Ämnena löser sig i grundvattnet som sedan angriper betong.

I Sverige förekommer sulfat och sulfid i gammal industrimark. De förekommer också i sådana delar av Sverige där sulfidmalmer eller andra svavelhaltiga bergarter förekommer, t.ex. i flera av de norrländska malmfälten, i avrinningsvatten från deponier eller virkesupplag samt i mossmarker.

Dessutom förekommer sulfat i avloppsvatten, i vissa industriella processvatten, t.ex. inom pappersindustrin.

Sulfat finns även i havsvatten. Dess inverkan på betong behandlas i avsnitt 7.5.

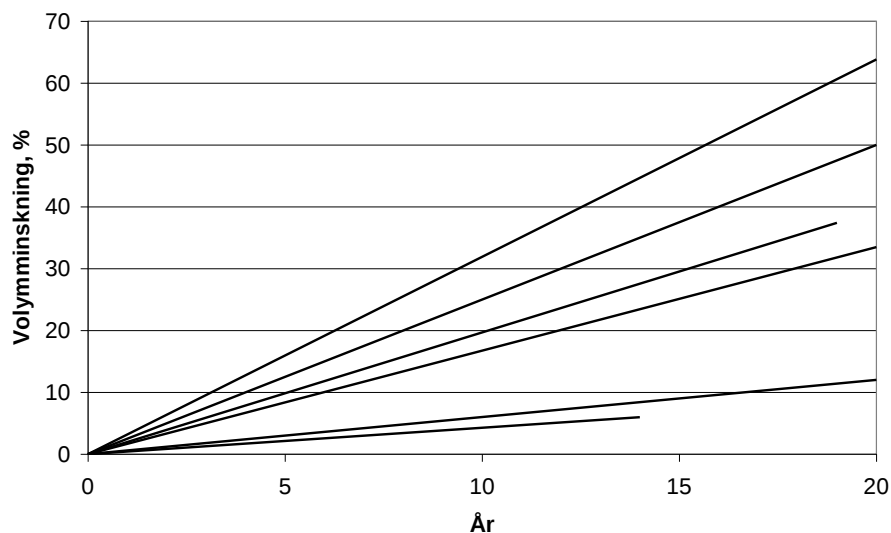
Sulfat i mark är tämligen sällsynt i Sverige. Därför är risken för sulfatangrepp inte så stor. Däremot är sulfatangreppet mycket vanligt i länder där sulfathalten i mark och grundvatten är hög. Flertalet undersökningar av sulfatangreppet har därför genomförts utanför Sverige.

Sulfatnedbrytning noterades tidigt i betongens historia och många undersökningar av betong i sulfathaltig miljö startades därför redan i början av förra seklet. Det finns också ett otal långtidsundersökningar i fält och lab. som visar hur betong kan brytas ned när den utsätts för sulfathaltig mark eller sulfathaltigt vatten. Som exempel kan nämnas ett fältextponeringsförsök rapporterat av Miller&Manson (1951) i vilket 75 000 prover tillverkade av 122 cement från 85 tillverkare placerades ut i 1-procentig Na_2SO_4 -lösning och i en salthaltig insjö, Medicine Lake, i South Dakota i USA. Sjöns salt var $\frac{2}{3}$ MgSO_4 och $\frac{1}{4}$ Na_2SO_4 . Proverna exponerades under 25 år.

I en annan stor amerikansk undersökning administrerad av PCA (Portland Cement Association) exponerades 1000 betongbalkar i mark som innehöll 10% löslig sulfat. Hälften av proverna exponerades för enbart Na_2SO_4 . Den andra hälften exponerades för $\frac{2}{3}$ Na_2SO_4 och $\frac{1}{3}$ MgSO_4 . Proverna var nedgrävda till hälften. Testplatsen låg i Kalifornien. 25 olika portlandcement och mineraliska tillsatsmaterial ingick i studien. 20-årsresultat har publicerats i PCA (1965). 11-årsresultat har publicerats av Stark (1982). Exempel visas i Figur 24, 27 och 28 nedan.

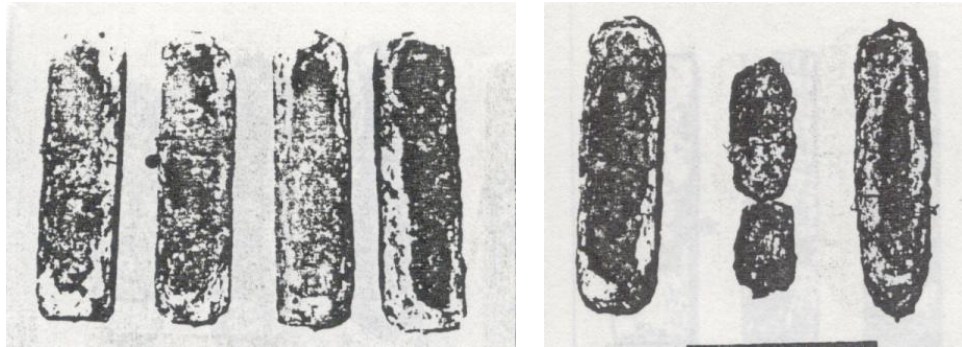
Som exempel på en långtidsundersökning visas nedan resultat från en större norsk fältundersökning i vilken man studerade betong utsatt för grundvatten i svavelhaltig alunskiffer, en bergart som finns i Osloområdet, men som även finns i Sverige, t.ex. på Öland, i Skåne och i Västergötland. SO_3 -halten i grundvattnet var ca 3-4 g/liter. Totalt provades 16 olika betongsammansättningar med olika cementtyper, såväl rena portlandcement som utländska cement med förväntad högre sulfatresistens. Alla betongtyperna hade cement-innehållet 290 kg/m^2 . vct är obekant men bör vara ca 0,60.

Provkropparna fick i många fall kraftigt sönderfall. I Figur 18 visas volymminskningen hos betong med 6 olika typer av portlandcement. Efter 20 års exponering kan volymminskningen hos proverna uppgå till mer än 60%, dvs. angreppet har lett till så gott som totalt sönderfall. Skadorna var alltid störst i provernas ytparti och grävde sig gradvis allt längre in. Av figuren framgår att cementtypen har mycket stor inverkan. Frågan om cement diskuteras nedan i avsnitt 7.2.6.



Figur 18: Uppmätt volymminskning hos betong med 6 typer av portlandcement exponerad för vatten från alunskiffer. Resultat från norsk långtidsundersökning. Fiskaa (1973).

Några fotografier av prover efter avslutad exponering visas i Figur 19. Fotona är kopierade ur en kopia av originalrapporten och är därför av låg kvalitet. De visar emellertid att angreppet sker från ytan och inåt. I mycket allvarliga fall återstår bara en liten "kärna" av det ursprungliga provet. Spridningen i resultaten är tämligen stor.



Figur 19: Utseende hos prover efter 25 års sulfatexponering. Vänstra bilden 12% Volymminskning. Högra bilden 50% volymminskning. 3 eller 4 prover av varje cementtyp. Fiskaa (1973).

Långtidsförsök har även gjorts i laboratoriet. Resultatet av ett 1-årsförsök visas i Figur 20. Två olika sulfatlösningar har använts:

- Magnesiumsulfat.
- Natriumsulfat

Av figuren framgår att magnesiumsulfat ger större hållfasthetsförlust än natriumsulfat vid den lägre sulfathalten, 0,5%. Detta visar att inte enbart sulfationen spelar roll för nedbrytningen utan också katjonen. Figuren visar även betydelsen av cementtypen. Cementtyp A som inte är sulfatresistent, dvs. som har hög C_3A -halt, påverkas mest av Na_2SO_4 när koncentrationen är hög, medan cementtyp B som är sulfatresistent påverkas mest av $MgSO_4$. Angreppet ökar med ökad saltkoncentration. Vid den lägre koncentrationen 0,5% påverkas cementtyp A och B ganska litet av Na_2SO_4 , medan 5% ger stor påverkan för bägge cementtyperna.

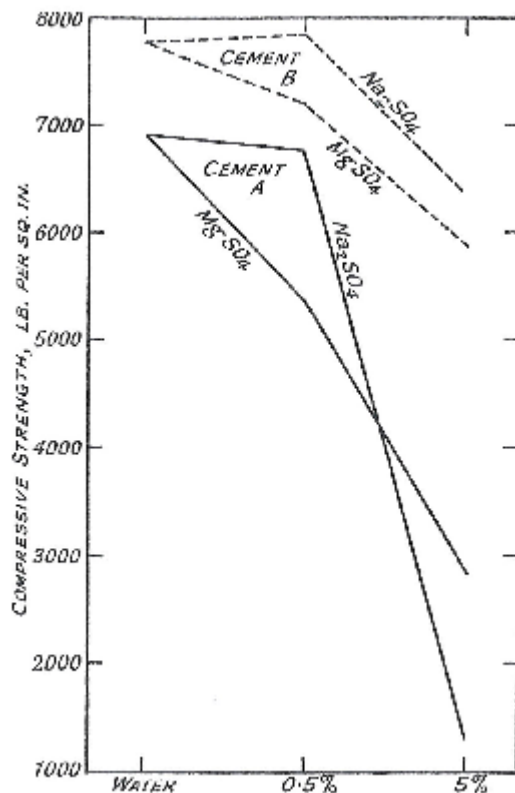


Fig 20: Hållfastheten hos två betongtyper med olika portlandcement efter 1 års lagring i sulfatlösningar med 0,5 och 5% sulfatinnehåll. Lea (1970).

7.2.2 Rent sulfatangrepp – skademekanism

Vid given typ och koncentration av angripande sulfathaltig miljö är följande faktorer mest avgörande för sulfatangreppets omfattning:

- Cementets kemiska sammansättning.
- Betongens permeabilitet. Exempel på den stora inverkan av tätheten visas i Figur 10.

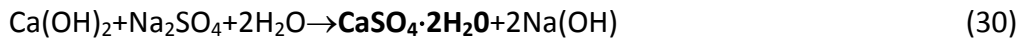
Av störst betydelse för det rena sulfatangreppet på portlandcementbetong är följande komponenter i cementpastan:

- Kalciumhydroxid; $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Kalciumaluminat; C_3A .

Kalciumsilikaterna anses *inte* bidra till sulfatangreppet (se dock thaumasitbildning, avsnitt 7.3.2).

Gipsbildning

I det rena sulfatangreppet spelar katjonen ingen större roll. Ett exempel är angrepp av natriumsulfat. Kalciumhydroxiden reagerar med sulfat under bildning av gips:



Gipsreaktionen ger en volymökning hos kalciumhydroxiden av ca 18%. Det har emellertid ifrågasatts om denna volymökning verkligen skapar expansion hos provet eftersom detta förutsätter att gipsen kristalliserar in situ på hydratationsprodukterna. En utförlig diskussion av gipsreaktionen genomförs i Bing& Cohen (2000). De har även utsatt cementpasta med cement som består enbart av C_3S för natriumsulfatlösning. I ett sådant försök är enda tänkbara reaktionsmekanismen gipsbildning.

I Figur 21 visas resultat av deras experiment. Pasta (vct 0,48) med ren C_3S samt med 10% silikastoft exponerades dels för 5-procentig sulfatlösning, dels för enbart kalkvatten. Som synes ger sulfatexponeringen i ren C_3S -pasta kraftig expansion som börjar efter ca 40 dygns exponering. Expansionen är betydligt större än cementpastans brottöjning. Det är intressant att notera att inblandning av silikastoft minskar expansionen kraftigt. Orsaken är troligen dels att pastan blir tätare, men framförallt att mängden kalciumhydroxid är lägre på grund av puzzolanreaktionen, se Figur 6.

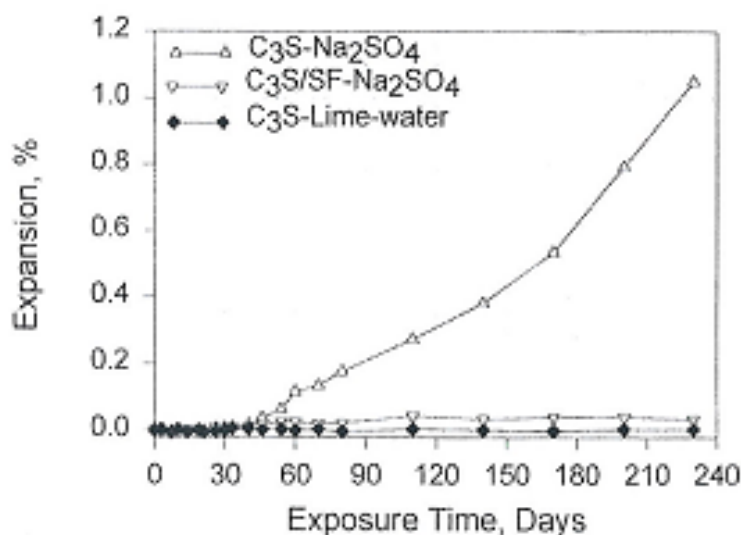


Fig 21: Expansion hos C_3S -pasta lagrad i Na_2SO_4 -lösning. Bing&Cohen (2000).

I andra försök användes en C_3S -liknande produkt som getts namnet "alit". Pastor tillverkat av detta cement (vct 0,48) med och utan 10% silikastoft lagrades i 5% natriumsulfat och 4,7% ammoniumsulfat. Resultatet visas i Figur 22. Det tar ca 1 år innan en begränsad expansion startar i natriumsulfatlösningen. I ammoniumsulfatlösningen däremot är reaktionen omedelbar och mycket stor. Detta är ett exempel på att katjonen har stor betydelse. Även i detta experiment är inblandning av silikastoft positiv, åtminstone vid exponering för natriumsulfat.

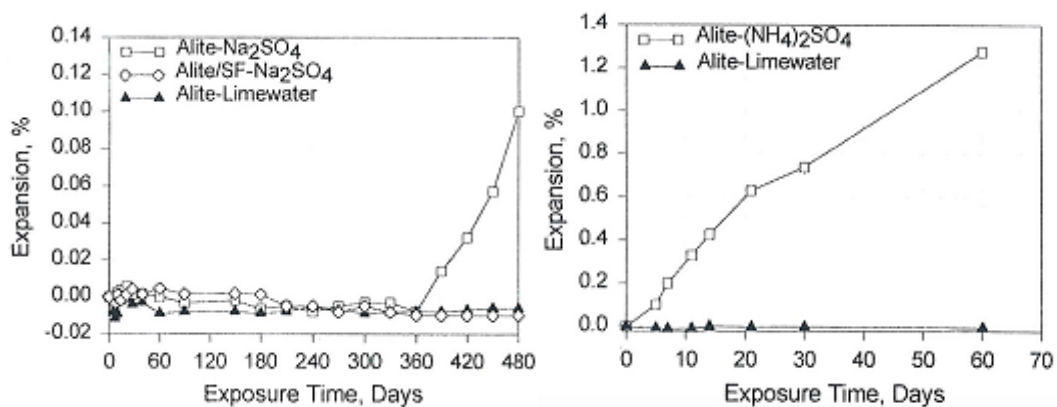
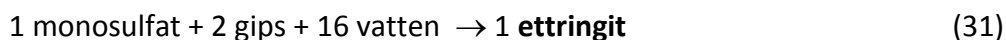


Fig 22: Expansion hos alit-pasta i natriumsulfatlösning (vänster bild) och i ammoniumsulfatlösning (höger bild). Bing&Cohen (2000).

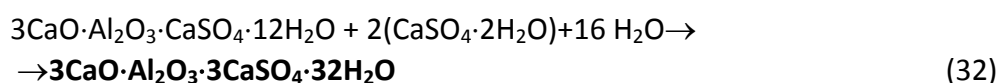
Gipsreaktionen är beroende av att det finns kalciumhydroxid i betongen. Det innebär i princip att cement med hög halt C_3S , vars reaktion skapar stor mängd kalciumhydroxid, bör vara mer känslig för gipsbildning än cement med hög halt C_2S . Se Ekv (1) och (2). Puzzolaner, vars reaktion förbrukar kalciumhydroxid, bör minska risken för gipsreaktion. Att så är fallet bekräftas av Figur 21 och 22.

Aluminatreaktion

Slutprodukten av cementets C_3A -reaktion med vatten är *monosulfat* med formel enligt Ekv (7). Monosulfat kan reagera med sulfat under bildning av mineralet ettringit. När sulfatet angriper i form av gips, som t.ex. uppstått vid gipsreaktionen beskriven ovan, kan reaktionen förenklat skrivas:

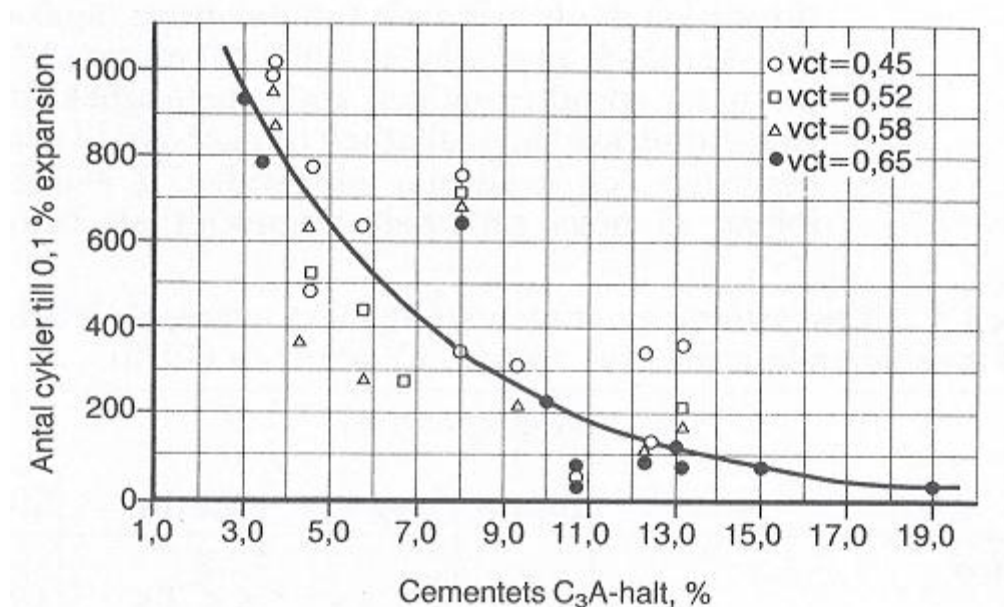


Reaktionsformeln är:



Reaktionen innebär stor upptagning av vatten och sker därför under *mycket stor volymökning*. Räknat från volymen hos C_3A är volymökningen ca 230%. Till en början kan den bildade ettringiten fällas ut i porsystemet utan att skador uppstår. När mera ettringit bildas än vad som kan tas omhand av i porsystemet kommer den att verka sprängande.

Risken för stor ettringitbildning bör minska om mängden C_3A i cementet minskar. Exempel på att så är fallet ses i Figur 23, 25 och 27.



Figur 23: Inverkan av cementets C_3A -halt på sulfatresistensen hos betong som Exponerats cykliskt för 2-procentig Na_2SO_4 -lösning; 16 tim. sulfatexponering vid $+22\text{ }^\circ\text{C} + 8\text{ tim. i luft med temperatur }+54\text{ }^\circ\text{C}$. Harboe (1982).

Det är omtvistat hur expansionen sker. Den vanligaste uppfattningen är att ettringitkristaller fälls ut och tillväxer, vilket skapar ett inre tryck. Lösligheten hos ettringit ökar emellertid med minskad mängd $Ca(OH)_2$ (och ökad temperatur). Låg mängd $Ca(OH)_2$ skulle därför medföra att ettringitkristallerna löses och sedan re-kristalliserar på platser där det finns utrymme, t.ex. i luftporer. Därvid skulle expansionen minska.

Det har också visat sig att puzzolaner, vilka sänker mängden kalciumhydroxid kan minska sulfatexpansionen. Ett exempel från en långtidsexponering av betong i sulfatkontaminerad jord visas i Figur 24. Inblandning av 20% flygaska i portlandcement med hög C_3A -halt gav en kraftig förbättring av sulfatresistensen. Detta gäller dock bara för betong med högt vct. För en tät betong

hade flygaskainblandningen ingen större effekt. För cement med lägre halt C_3A tycks flygaskainblandning kunna vara negativ, se Figur 28.

C_4AF -komponenten i cement tycks inte ha samma destruktiva effekt som C_3A trots att dess reaktionsprodukt med sulfat från gipsen påminner om den från C_3A : jämför Ekv. (7) och (10). Enligt Lea (1970) kan man förbättra ett cements sulfaresistens genom att konvertera dess C_3A till C_4AF . Detta kan man göra genom att tillsätta järnhaltigt material till råmjölet vid cementtillverkning. Den metoden använder man t.ex. vid tillverkning av det svenska Anläggnings-cementet.

I amerikanska normer begränsar man emellertid mängden C_4AF genom att begränsa summan $C_3A + C_4AF$ till max. 20%.

Enligt den svenska cementstandarden (SS 13 42 04) får ett sulfatresistent cement ha högst 3,5% C_3A . Inga krav ställs på maximal C_4AF -halt.

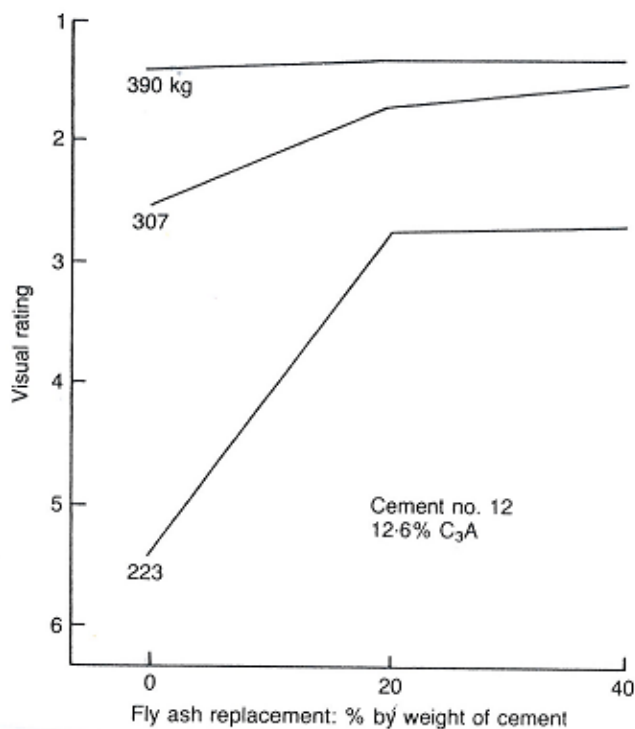


Fig 24: Visuell bedömning av beständigheten hos prover som lagrats under 11 år i sulfathaltig jord. Inverkan av flygaska inblandad i normalt portlandcement (Type1). Stark (1982).

För y-axeln gäller: 1: oförstört prov. 6: helt förstört prov.
(390 kg cement: $vct \approx 0,45$. 307 kg cement: $vct \approx 0,60$.
223 kg cement: $vct \approx 0,80$).

7.2.3 Inverkan av katjonen

Viktiga katjoner vid sulfatangreppet är Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ . Magnesiumjonen och ammoniumjonen bidrar till sulfatangreppet och förvärrar ofta detta. Kalcium- och natriumjonen har så gott som ingen påverkan.

Magnesiumsulfat ger ofta större angrepp än natriumsulfat vid samma sulfatjonkoncentration, se Figur 20. Orsaken tros vara att magnesiumjonen attackerar kalciumsilikathydrat genom en jonbytesreaktion där kalcium byts mot magnesium. Därvid förlorar den angripna cementgelen en stor del av sin bindande funktion. Att reaktion har skett framgår av att betongen innehåller magnesiumhydroxid (brucit) och magnesiumsilikathydrat. Reaktionerna kan skrivas:

Reaktion 1 bildning av gips och brucit genom attack på kalciumsilikathydrat:



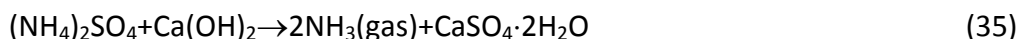
Reaktion 2 bildning av magnesiumsilikathydrat genom reaktion av brucit med kisel syra från reaktion 1:



Den bildade gipsen från reaktion 1 reagerar sedan på vanligt sätt med monosulfat och bildar ettringit. Se ekv (32). Magnesiumsaltet ger alltså både en vanlig ettringitsvällning och en gradvis nedbrytning av cementpastan.

Ammoniumsulfat, vilket t.ex. förekommer i konstgödsel, är ett av de mest aggressiva ämnena mot betong. Ett exempel på ammoniumsulfats stora aggressiva påverkan framgår av jämförelsen av de båda bilderna i Figur 22.

Ammoniumsulfat är ett surt ämne som gradvis löser upp den basiska kalciumhydroxiden och omvandlar denna till ammoniak som avgår, samt gips. Den upplösande reaktionen kan skrivas:



Ammoniumsulfat ger alltså upplösning och urlakning av kalciumhydroxiden på liknande sätt som rent syraangrepp. Vid tillräckligt stor kalkförlust börjar även cementgelen att brytas ned.

Den bildade gipsen reagerar med monosulfat och ger då ettringit enligt ekv. (32). Ammoniumsulfat ger således både upplösning av cementpastan och expansion av denna.

7.2.4 Inverkan av karbonatisering

Både kalciumhydroxid och cementgel karbonatiseras genom att ta upp koldioxid från omgivande luft (eller vatten). Karbonatiseringen innebär att kalciumkarbonat (CaCO_3) bildas.

En betongyta är därför ofta karbonatiserad in till ett visst djup, vilket ökar med tiden. Även betong i vatten kan ha karbonatiserad yta eftersom vatten ofta innehåller karbonat- och bikarbonatjoner. Karbonatisering medför en sänkning av pH-värdet från 12,5 och högre, till 9 eller lägre.

Ettringit blir ostabil när pH sjunker och bryts därför ned i det karbonatiserade skiktet; Lawrence (1990). Därför kan inget sulfatangrepp ske där. Man har även studerat sulfatresistensen hos helt genomkarbonatiserade prover och då kunnat bekräfta att inget sulfatangrepp skett; Arber&Vivian (1961).

Karbonatisering medför dessutom att betongen blir tätare eftersom karbonatiserad betong har lägre porositet. Detta gäller framförallt betong med portlandcement. Det innebär att även betongens motstånd mot sulfatattack innanför karbonatskiktet ökar; Arber&Vivian (1961).

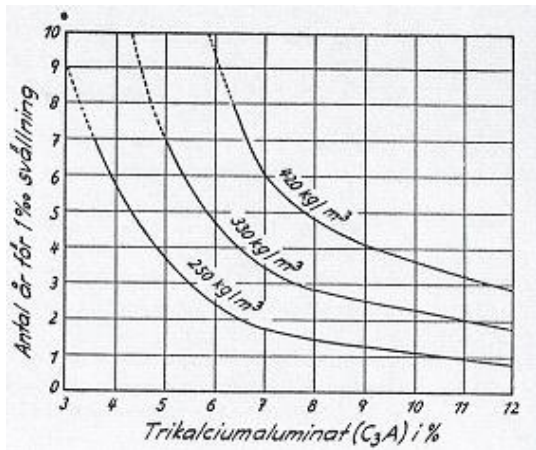
För betong med puzzolan medför karbonatisering ofta att betongytan blir otätare, vilket är negativt med avseende på motståndet mot inre sulfatangrepp.

7.2.5 Reaktionshastigheten

Eftersom löst sulfat angriper från ytan blir angreppets omfattning och djup beroende av hur snabbt sulfatjoner kan tränga in, dvs. av betongens permeabilitet. Exempel på att detta är fallet framgår av Figur 10. Ett annat exempel visas i Figur 25. Ju lägre vct är, desto långsammare sker angreppet vid oförändrad C_3A -halt hos cementet.

Oftast är inflödet av sulfatjoner diffusionsstyrt. Avgörande är därför transportkoefficienten för sulfatjonen. Mätningar har visat att diffusion av sulfatjonen går betydligt långsammare än diffusion av kloridjonen. Värderna av storleksordningen $0,6\text{--}0,9 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ har uppmätts, vilket enbart är ca 1 % av diffusionskoefficienten för klorid; Lawrence (1990). Dessa värden inkluderar troligen effekten av att sulfatjonen binds kemisk till cementpastan.

Diffusionskoefficienten för sulfat tycks inte vara lika beroende av bindemedlets typ som diffusionskoefficienten för klorid. Troligen är däremot inverkan av vct likartad, dvs. sänkt vct ger lägre diffusionskoefficient.



Figur 25: Sulfatangrepp som funktion av cementhalt och C_3A -halt hos cementet. Tuthill (1955). (420 kg cement: $vct \approx 0,45$. 320 kg cement: $vct \approx 0,55$. 250 kg cement: $vct \approx 0,70$)

Man kan särskilja två idealiserade fall av sulfatdiffusion.

Fall 1:

I ett ytterlighetsfall antas reaktionen kunna beskrivas som en "moving boundary", där angreppet sker i en smal angreppszon och där en yttre angripen zon avskiljs från en inre oangripen zon. Då kan inträngningen av angreppszonen beskrivas på följande sätt:

$$x = \left(\frac{2 \cdot \delta \cdot c_y}{M} \right)^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad (36)$$

Där x är inträngningsdjupet (m), δ är transportkoefficienten (m^2/s), c_y är koncentrationen av sulfatjoner vid ytan (mol/m^3), M är mängden mol i materialet som kan angripas (mol/m^3), t är exponeringstiden (s). För den rena sulfatattacken ges värdet på M av reaktionsformeln, Ekv. (32).

Ekvationen visar att inträngningshastigheten hos angripen zon ökar med en ökning av yttre sulfathalten och med en ökning av transportkoefficienten. Den minskar när mängden material i betongen, som kan reagera med sulfat, ökar. Det innebär att ökad mängd C_3A skulle medföra en långsammare inträngning vilket alltså skulle vara positivt. Å andra sidan innebär låg C_3A -halt att expansionen är liten eller försumbar, vilket är den dominerande faktorn.

Angreppsdjupet avtar med kvadratroten ur tiden, dvs. det är gradvis avstannande.

Fall 2:

I ett annat ytterlighetsfall antas den kemiska reaktionen inte vara omedelbar, som i Fall 1, utan ske gradvis och bestämmas av följande tidsfunktion:

$$\frac{dc}{dt} = -k \cdot c \quad (37)$$

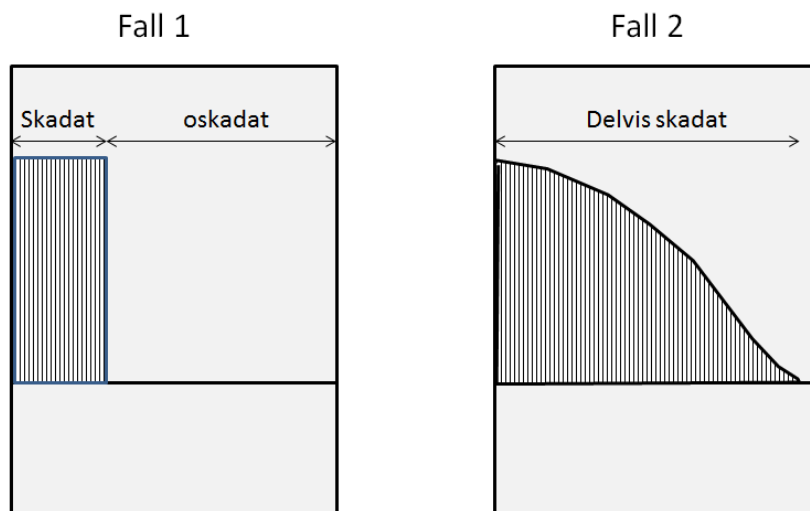
Där k är en hastighetskoefficient för sulfatreaktionen.

Transportekvationen skrivs då:

$$\frac{dc}{dt} = \delta \cdot \frac{d^2c}{dx^2} - k \cdot c \quad (38)$$

Metoder att lösa denna ekvation ges i Crank (1975).

De båda fallen åskådliggörs av Figur 26.



Figur 26: Angreppssätt för sulfatangrepp. Vänster: Fall 1, enbart ytpartiet skadat. Höger: Fall 2, även inre delar skadade.

Hos mera permeabel betong med högt vct utsatt för genomträngande vatten orsakat av övertryck eller genom kapillärsugning kan troligen även sulfattransport ske konvektivt, dvs. jonerna följer med vattenströmmen. Då kan intransporten och därmed nedbrytningshastigheten beräknas ur betongens vattenpermeabilitet -Ekv. (20)- och ur dess kapillaritet -Ekv. (21-23).

7.2.6 Inverkan av cementtypen

Portlandcement

För rena portlandcement ökar motståndet mot sulfatangrepp med minskad mängd C_3A hos cementet, vilket bl.a. framgår av försök som visas i Figur 23 och 25. Resultaten bekräftas av resultat från långtidsförsöket i Kalifornien, se Figur 27.

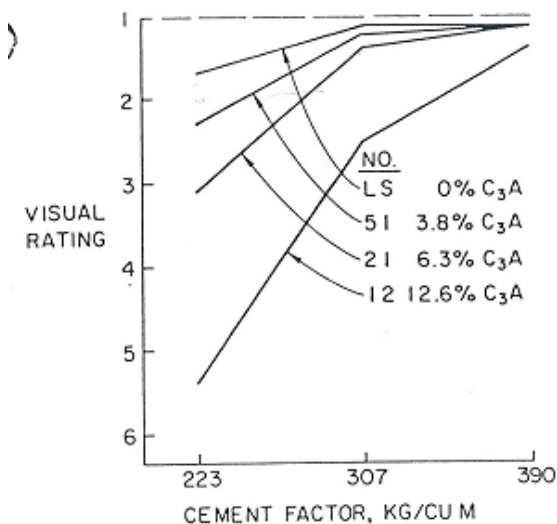


Fig 27: Visuellt bedömning av beständigheten hos prover som lagrats i 11 år i sulfathaltig jord. Inverkan av cementets C_3A -halt. Stark (1982).
För y-axeln gäller: 1: oförstört prov. 6: helt förstört prov.

I olika länders normer och cementstandards ställs därför krav på maximalt tillåten C_3A -halt för att cementet skall anses ha *hög sulfatresistens*.

- Sverige: $C_3A < 3,5\%$
- USA: $C_3A < 5\%$
- UK: $C_3A < 3,5\%$ (samt SO_3 -halten i cementet $< 2,5\%$)
- Tyskland: $C_3A < 3\%$

I USA används även begreppet "måttlig sulfatresistens". Gränsvärdet sätts då till $C_3A < 8\%$.

Europeiska rekommendationer för när sulfatresistent cement bör användas ges i Tabell 8 på sid. 54.

Den ytterligare stora fördelen med sulfatresistent cement är att det normalt har låg alkalitet (låg halt Na_2O och K_2O) och att det har låg värmeutveckling. Cementtypen är därför resistent mot skadliga alkali-ballastreaktioner och ger

betong med lägre risk för temperatursprickbildning i samband med hårdnandet.

I Sverige produceras ett sulfatresistent portlandcement, *Anläggningscement* med ca 2% C_3A . Det har dessutom låg alkalihalt och begränsad värmeutveckling.

Erfarenheten från praktisk användning och från ett stort antal försök visar att icke sulfatresistent portlandcement med olika typer av inblandad puzzolan (silikastoft, flygaska) eller granulerad masugnsslagg inte överträffar sulfatresistensen hos portlandcement med låg C_3A -halt. Däremot kan ungefär lika hög sulfatresistens uppnås, förutsatt att halten tillsatsmaterial anpassas till C_3A -halten hos det använda portlandcementet. Lawrence (1990).

Flygaska

Inblandning av flygaska anses kunna öka motståndet mot sulfatangrepp. Det har emellertid visat sig att utgångscementets C_3A -halt har stor betydelse; se Figur 24 och 28 vilka visar resultat av långtidsförsök i Kalifornien. Vid hög C_3A -halt (12,6%) gav ökad mängd aska upp till 20% höjd sulfatresistens. Inblandningar över detta gav ingen påverkan. För cement med måttligt hög C_3A -halt (6,3%) och låg C_3A -halt (3,6%) gav låg och hög mängd aska starkt sänkt sulfatresistens. För betong med lågt vct har askinblandning ingen effekt.

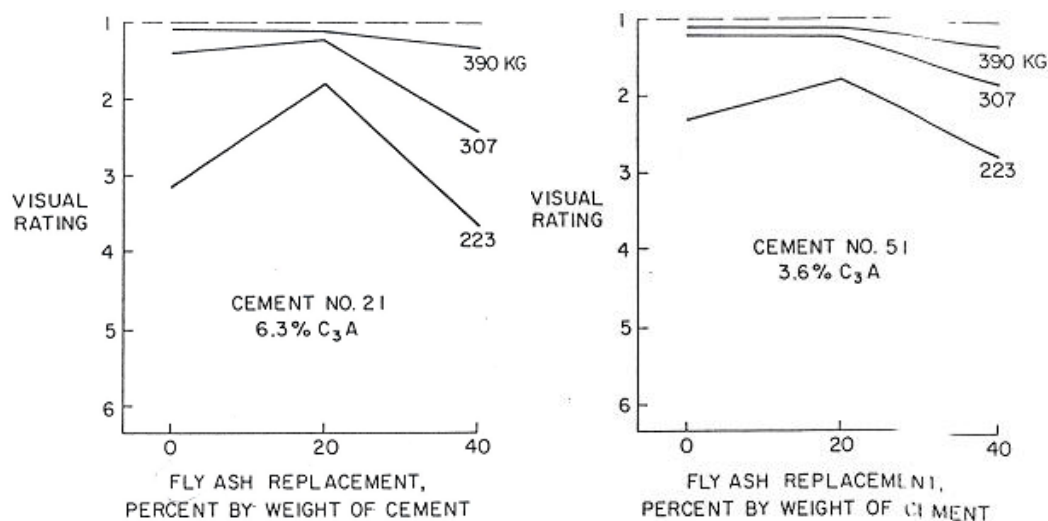


Fig 28: Visuell bedömning av beständigheten hos prover som lagrats i 11 år i sulfathaltig jord. Inverkan av flygaska inblandad i normalt portlandcement (Type1). Stark (1982).

För y-axeln gäller: 1: oförstört prov. 6: helt förstört prov.

(390 kg cement: vct≈0,45. 307 kg cement: vct≈0,60. 223 kg cement: vct≈0,80).

En trolig orsak till den positiva effekten av flygaska, som noteras för cement med hög C_3A -halt, är att permeabiliteten minskar, eftersom porstrukturen förfinas. En annan orsak kan vara att mängden kalciumhydroxid minskar på grund av puzzolanreaktionen. Flygaska innehåller viss mängd aluminium, se Tabell 1, men reaktionsprodukter från denna tycks inte ge sulfatexpansion.

Silikastoft

Silikastoft minskar sulfatexpansionen vilket visades ovan i Figur 21 och 22 när det gäller gipsreaktionen. Ett annat exempel visas i Figur 29. 7% silikastoft har tillsatts vanligt portlandcement och slaggcement med 60% slagg. Även ett sulfatresistent portlandcement ingår i undersökningen. Silikastoftet minskade expansionen både när det blandades med portlandcement och med slaggcement.

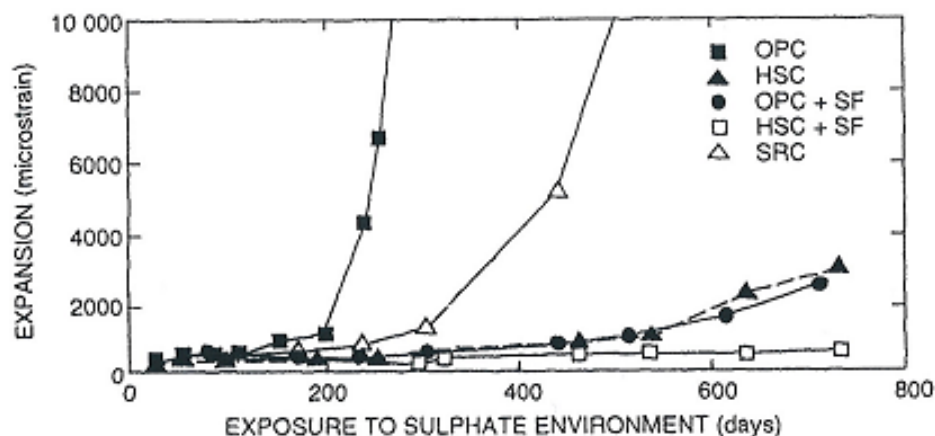


FIG. 3.

Figur29: Expansion hos betongprismor lagrade i 5-procentig Na_2SO_4 -lösning. Inverkan av bindemedlet. Khatrı m fl. (1997).

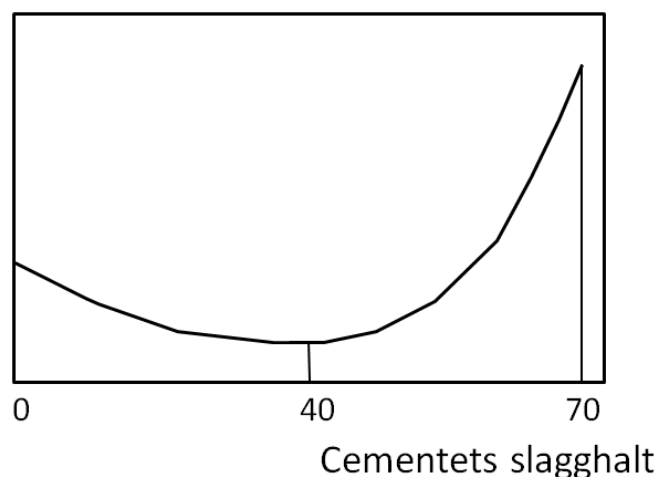
Masugnsslagg

Slaggcement kan ge förhöjd sulfatresistens förutsatt att slagghalten är hög. Locher (1966) har dock visat att sulfaresistensen sänks med ökad slagghalt när denna är måttligt hög. Ett minimum i sulfatresistens nås ofta när slagghalten är av storleksordningen 30-40%. Principen visas i Figur 30. Hur stor effekt en viss mängd slagg har beror på utgångscementets C_3A -halt.

Ett slagginnehåll av 65 á 70% anses alltid ge cement med hög sulfatresistens. Tidigare tillverkades ett cement med 65% masugnsslagg i Sverige. Cementet såldes under namnet Massivcement. Det gav betong med hög sulfatresistens. Tyvärr medförde det andra problem vilket ledde till att tillverkningen lades ned.

Exempel på att slagghalt understigande 30% inte ger särskilt hög resistens mot havsvattenangrepp medan slagghalt 60 à 70% ger god resistens visas i Figur 35 och 37.

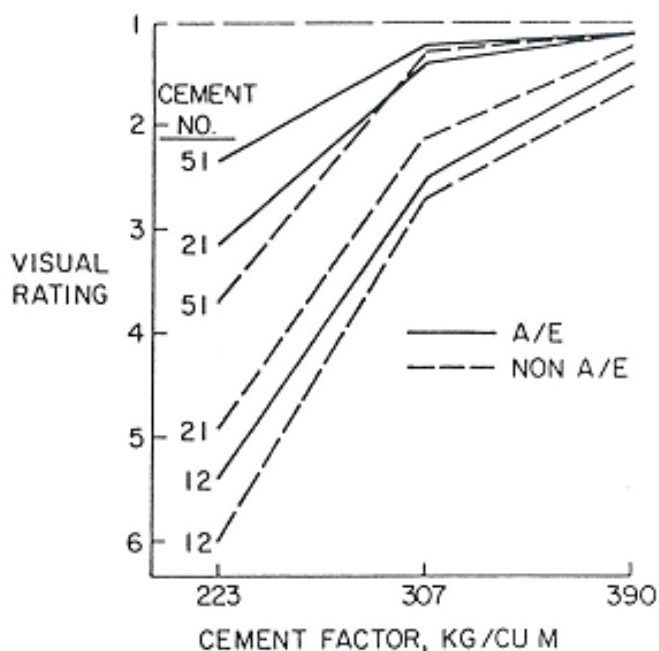
Sulfatresistens



Figur 30: Principiell effekt av slagginnehållet i cement på sulfatresistensen

7.2.7 Inverkan av luftinblandning

Det amerikanska långtidsförsöket i Kalifornien där betongprover lagrades i sulfathaltig mark visar att luftinblandning har viss positiv inverkan. Resultat efter 11 år exponering visas i Figur 31. Orsaken är troligen att den bildade ettringiten kan fällas ut i luftporerna vilket kan ske utan expansion. Frostbeständigheten kan naturligtvis påverkas negativt av att luftporer fylls med ettringit. I fältförsöket förekom dock ingen frost, så den observerade positiva inverkan av luft kan inte förklaras av luftens inverkan att höja frostbeständigheten.



Figur 31: Visuell bedömning av beständigheten hos prover som lagrats under 11 år i sulfathaltig jord. Inverkan av luftinblandning på betong med olika cementshalt. Stark (1982).

För y-axeln gäller: 1: oförstört prov. 6: helt förstört prov.

A/E: luftinblandad betong.

7.2.8 Inverkan av vattencementtalet

Sänkt vct (ökad cementshalt) ger ökad täthet och ger därför förbättrad sulfatbeständighet. Exempel på detta ges i Figur 25, 27 och 31.

I olika internationella riktlinjer ges rekommenderade högsta tillåtna vct för betong i olika aggressiva miljöer. Europeiska rekommendationer ges i Tabell 8. Där ges även rekommendationer till lämpligt cement. I tabellen ges även rekommendationer till högsta vct, när det gäller andra salter än sulfat. Beträffande "angreppsgrad" se Tabell 7.

Tabell 8: Krav på cementtyp och högsta tillåtna vct vid olika angreppsgrad.
Cembureau (1978). Beträffande angreppsgrad se Tabell 7.

	Angreppsgrad					
	ingen	svag		måttlig	stark	Mycket stark
		<400 ¹⁾ <4000 ²⁾	<400-600 <6000			
Sulfathaltig miljö Cementtyp Max vct Kompletterande yttskydd	OPC -	OPC ³⁾ 0,55	OPC 0,50	SRC ⁴⁾ 0,55	SRC 0,50	SRC 0,45 nödvändigt
Miljö utan sulfat Cementtyp Max vct Kompletterande yttskydd	OPC -	OPC -	OPC 0,55	OPC 0,50	OPC 0,45	OPC 0,45 nödvändigt

¹⁾ Halt sulfat i vatten.

²⁾ Halt sulfat i jord

³⁾ Vanligt portlandcement.

⁴⁾ Sulfatresistent cement

7.3 Speciella sulfatangrepp

7.3.1 Försenad ettringitbildning

Svällande och destruktiv ettringitbildning kan ibland ske efter det att betongen hårdnat och utan att betongen utsätts för yttre sulfat. Fenomenet kallas *försenad ettringitbildning*. Ingen sulfat utifrån är alltså nödvändig utan sulfat tillhandahålls av den gips som tillfördes cementet vid tillverkningen. Det är alltså inte fråga om ett normalt saltangrepp, men skall trots detta presenteras kortfattat.

Förstörelsen av betongen kan bli mycket stor. Försenad ettringitbildning har medfört mycket stora kostnader i många länder. I Sverige har tusentals värmehärdade betongsliprar skadats så allvarligt att de fått bytas ut. Omfattande skador har också skett i många andra länder, t.ex. Finland och Kanada.

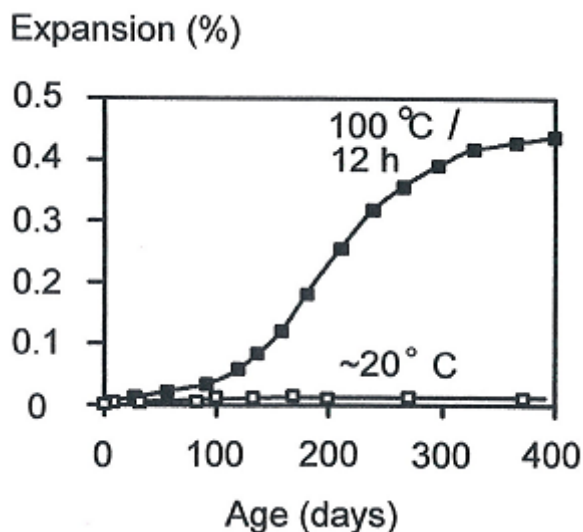
Orsaken till fenomenet är kopplad till att betongen fått alltför hög temperatur under hårdnandet. Därför är flertalet skadefall kopplade till att betongen värmehärdats på felaktigt sätt. Även massiva konstruktioner som inte

värmehärdas kan drabbas på grund av att värmeutvecklingen under cementreaktionen gett alltför hög temperatur. Man anser att en betongtemperatur högre än ca $+70^{\circ}\text{C}$ kan ge skador. Troligen kan emellertid även lägre temperatur ge skador vid vissa olämpliga typer av cement. Det kan nämnas att vid bygget av Öresundsförbindelsen sattes temperaturkravet till max $+60^{\circ}\text{C}$.

Skadorna uppträder inte förrän rätt lång tid efter det att betongen göts. Förutsättningen för skador är att betongen befinner sig i fuktig miljö.

Ett typiskt exempel på försenad ettringitbildning ges i Figur 32. I detta fall härdades betongprover vid $+20^{\circ}\text{C}$ och $+100^{\circ}\text{C}$. Efter det att härdningen avslutats placerades betongproverna i vatten vid rumstemperatur. Den värmehärdade betongen får kraftig expansion som startar efter ca 100 dygn och som stannar av efter ca 1 år. Betongprovet som lagras i rumstemperatur får ingen svällning.

En diskussion av fenomenet med omfattande litteraturhänvisningar ges i Taylor m. fl. (2001).



Figur 32: Linjär expansion av prover som härdats vid två olika temperaturer och därefter lagrats i vatten av rumstemperatur. Yang m.fl. (1999).

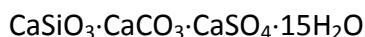
Skademekanismen är inte klarlagd i alla sina detaljer. Det är emellertid klarlagt att ettringit inte är stabil vid temperaturer över ca $+70^{\circ}\text{C}$. I stället för att reagera på normalt sätt med C_3A medan betongen är färsk och därmed "oskadliggöras", förblir därför en stor del av sulfaten från gipsen löst bunden till cementgelen vilken även kommer att innehålla aluminat. När sedan den hårdnade betongen svalnat och lagras i fuktig miljö frigörs sulfatjoner och attackerar aluminat i cementgelen. Detta skapar expansiv ettringit. Meka-

nismen och de kemiska reaktionerna har bl.a. beskrivits i Taylor m.fl. (2001), Diamond (1996) och Kuzel (1996).

Undersökningar tyder på att sulfatresistent cement med låg C₃A-halt ger mindre risk för försenad ettringitbildning, Taylor m.fl. (2001).

7.3.2 Thaumasitbildning

Thaumasit är ett sulfathaltigt mineral med följande sammansättning:



Detta mineral kan uppstå i betong under förutsättning av att samtliga följande förhållanden är uppfyllda:

- Tillgång till sulfat eller sulfid. Normalt från jord och grundvatten.
- Tillgång till kalcium-silikat-hydrat (CSH). Finns i cementpastan.
- Tillgång till karbonat. Finns t.ex. i fillercement med inmalt kalkmjöl, eller i ballast, eller i grundvatten.
- Låg temperatur. Reaktionen är mest aktiv vid temperatur lägre än +15°C. Den sker även vid högre temperatur men då med lägre hastighet.

Det är närvaron av karbonatjonen (CO₃²⁻) som är den destruktiva faktorn. När sulfat utifrån tränger in i betongen sker inte den vanliga sulfatreaktionen, som bildar ettringit, utan i stället angrips CSH-gel och kalciumkarbonat under bildning av thaumasit som saknar egen hållfasthet. Nedbrytningen av cementgelen försvagar betongen. I allvarliga fall förvandlas cementpastan till en "mosig massa" utan kohesion.

Inverkan av temperatur har studerats i laboratorieförsök. Dessa visar att betong som var resistent vid rumstemperatur blev alltmer skadad ju lägre temperaturen sänktes under +15°C. Detta innebär att risken för thaumasitattack bör vara högst i länder med låg temperatur.

Fenomenet uppmärksammades först i Storbritannien där mer än 80 byggnadsverk skadats, främst konstruktioner i mark. Skadade byggnader har också noterats i många fler länder, bl.a. Kanada.

Inga svenska fall är veterligen kända. Den ökade användningen av cement med hög halt kalkfiller kan möjligen medföra att skador även kommer att ske här.

En grundlig genomgång av fenomenet ges i Crammond (2003).

Eftersom thaumasitbildningen till skillnad från den vanliga sulfatattacken inte beror på närvaro av aluminat kommer även sulfatresistenta cement, dvs. cement med låg halt C_3A , att angripas. Enda metoden att försvåra angreppet är att göra betongen mycket tät.

Det förefaller som om slaggcement kan göra betongen mera beständig mot thaumasitangrepp.

7.3.3 Inre angrepp av sulfidhaltig ballast

Ballast som innehåller svavelhaltigt mineral, t.ex. kismineral eller sulfidmineral, kan ge samma typ av expansion som sulfatangreppet när den är ingjuten i betong. Sådan ballast finns i delar av den svenska fjällkedjan.

Undersökningar av inverkan av svavelhaltig ballast har genomförts av Hagerman&Roosaar (1955) och Roosaar&Vessby (1962). Betong med tre ballasttyper innehållande 0%, 4%, 14% och 21% svavelkis göts. Enbart den grova fraktionen utgjordes av kishaltigt material. vct var 0,78, dvs. högre än vad som normalt används i anläggningsbetong. 3 olika lagringstyper användes:

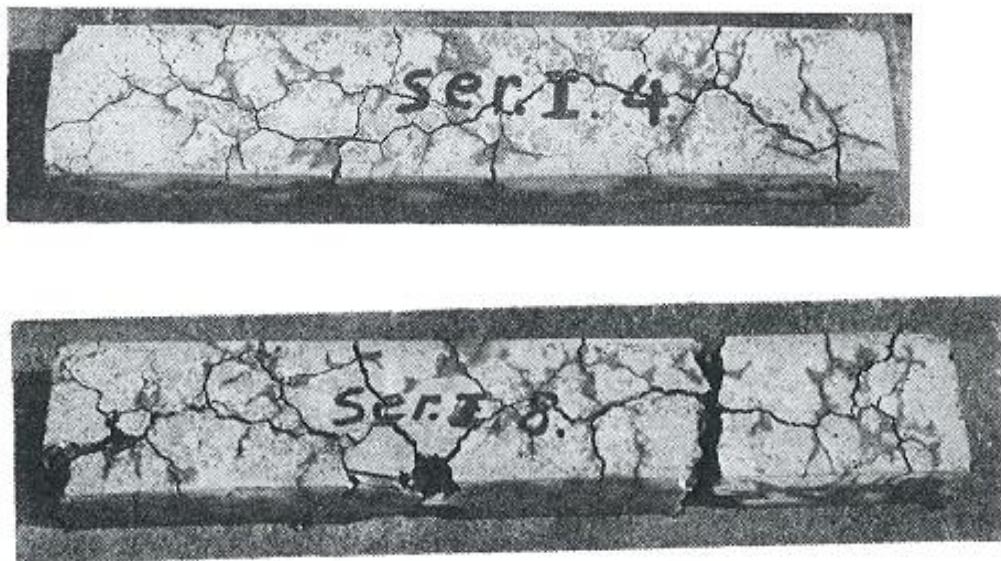
- A: Lagring växelvis 3 dygn i varmt vatten och 4 dygn i luft. Temperatur +75°C.
- B: Samma typ av lagring men vid rumstemperatur.
- C: Lagring utomhus.

Exponering skedde upp till 7 år. Provkropparnas expansion mättes. Resultat för lagringssätt A visas i Tabell 9.

Tabell 9: Längdändring hos prover med sulfidhaltig ballast långtidslagrade vid +75°C växelvis i vatten och luft. Roosaar&Vessby (1962).

Kishalt %	Svällning % (approximativa värden)		
	9 mån	29 mån	7 år
0	0	0,025	-0,03 (krympning)
4	0,01	0,04	0,01 (2 prover krympte)
14	0,06	0,34	>0,5
21	0,13	0,20	0,25

Den linjära brottöjningen hos betong är av storleksordningen 0,02 %. De uppmätta svällningarna hos betong med kishaltig ballast är betydligt större, vilket medförde kraftig sprickbildning hos proverna. Foton av prover med 14-procentig kisballast lagrade vid rumstemperatur (Metod B) och utomhus (Metod C) visas i Figur 33.



Figur 33: Foton av betongprover med 14-procentig kisballast exponerade under 7 år. Övre bilden: Lagring enligt Metod B i laboratoriet. Undre bilden: Lagring enligt Metod C utomhus. Roosaar& Vessby (1962)

7.4 Angrepp av andra salter än sulfat

7.4.1 Allmänt

Förutom av sulfat kan cementpastan angripas av andra salter. Betydande angrepp kan ske av *magnesiumsalter*, *ammoniumsalter* och vissa *klorider*. Angreppen är ofta av typ *syraangrepp* eftersom lösningarna ofta är sura medan cementpastan är basisk. Angreppet startar därför i ytan och fortskrider inåt. Vissa angrepp är dock sprängande, t.ex. kloridangrepp.

Även *sulfider* och *sulfiter* är aggressiva och medför ungefär samma påverkan som sulfater.

Natrium- och *kaliumsalter*, bortsett från svavelhaltiga föreningar t.ex. alkalisulfater, har låg påverkan på betong.

Organiska salter har oftast låg påverkan på betong. Undantag är salter med aggressiv katjon, t.ex. magnesiumacetat, se nedan.

7.4.2 Magnesiumsalter

Som framgår av avsnitt 7.1.3 reagerar magnesiumjoner från en angripande lösning med kalciumhydroxid och CSH-gelen i en jonbytesreaktion där kalcium i gelen byts mot magnesium varvid cementgelens hållfasthet minskar. Reaktionsmekanismerna beskrivs av Ekv. (33)-(35). Reaktionen sker från betongytan och inåt.

Under senare år har man sökt alternativ till kloridhaltiga avisningsmedel på broar och vägar för att därmed minska korrosion på bilar och på ingjuten armering. Ett sådant ämne är dubbelsaltet *calcium/magnesium-acetat* $\text{Ca}(\text{COOH})_2/\text{Mg}(\text{COOH})_2$. Saltet benämns ofta CMA. Undersökningar genomförda vid LTH visar att detta salt vid höga koncentrationer kan bryta ned betong; Peterson (1992). Nedbrytningen är större än om proverna lagrats i lösningar av andra vanliga avisningsmedel, NaCl och CaCl_2 .

7.4.3 Ammoniumsalter

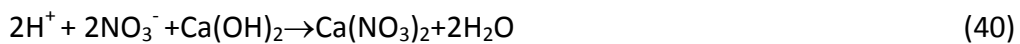
Ammoniumsalter ger sur reaktion i vattenlösning; se avsnitt 5 ovan. De angriper därför i första hand kalciumhydroxiden i cementpastan, varvid ammoniak (NH_3) avgår i gasform.

Ett tämligen aggressivt ammoniumsalt är ammoniumnitrat (NH_4NO_3) vilket används som konstgödsel och som sprängmedel. En tänkbar reaktion med kalciumhydroxid är:

Reaktion 1: Upplösning av saltet. Avgång av ammoniak. Bildning av vätejoner (salpetersyra):

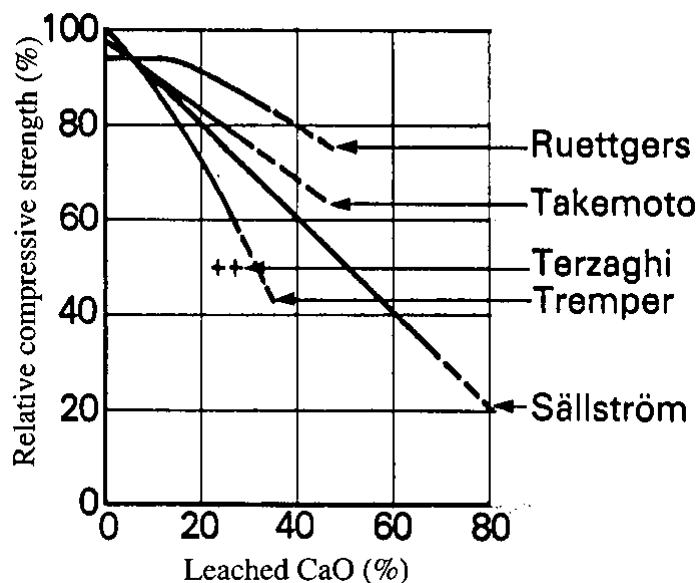


Reaktion 2: angrepp av vätejoner på kalciumhydroxiden:



Det kalciumnitrat som bildas påverkar inte betongen negativt.

När en viss andel av kalciumhydroxiden brutits ned börjar även cementgelen avge kalcium varvid hållfastheten sjunker. Exempel på inverkan av kalkförlust på hållfastheten hos betong ges i Figur 34.



Figur 34: Samband mellan urlakning av CaO på betongens hållfasthet. Resultat från ett flertal försök. Halvorsen (1968).

7.4.4 Fosfater

Enligt Biczok (1972) är en blandning av ammoniumfosfat med ammoniumnitrat särskilt aggressiv mot betong. Fosfater i övrigt är inte särskilt aggressiva. Ett skyddande lager av kalciumfosfat $\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{-}$ bildas normalt på betongytan och förhindrar fortsatt nedbrytning.

7.4.5 Klorider

Flera klorider angriper betong. Dit hör magnesiumklorid, kalciumklorid, järnklorid och aluminiumklorid. Natriumklorid och kaliumklorid har liten påverkan.

När det gäller många klorider sker ett *surt angrepp* på kalciumhydroxiden, som gradvis löses upp; Biczók (1972). Processen är långsam. Ett exempel är järnklorid:



Aluminiumklorid ger samma typ av angrepp.

Inverkan av de vanliga salterna MgCl_2 , CaCl_2 och NaCl har studerats av Peterson (1984). De mest aggressiva salterna är MgCl_2 och CaCl_2 . Båda salterna ger huvudsakligen sprängande angrepp, och båda förutsätter hög koncentration hos den angripande lösningen för att ge kraftigt angrepp. NaCl ger liten påverkan även vid hög koncentration.

Enligt Peterson gäller följande för attack av *magnesiumklorid*:

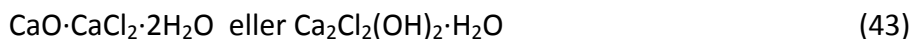
- Vid *låg koncentration* av MgCl_2 sker en upplösande effekt beroende på skillnader i pH-värde mellan betong ($\text{pH}=12,5$ hos mättad $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -lösning) och yttre magnesiumlösning ($\text{pH}=10,5$ hos mättad $\text{Mg}(\text{Cl})_2$ -lösning). Därför sker en diffusion av OH^- -joner från kalciumhydroxiden inne i betongen till magnesiumlösningen. Kalciumhydroxiden löses därför långsamt upp. Ingen sprängande effekt kan uppstå, men betongen försvagas på sikt.
- Vid *hög koncentration* (>3 mol/l) reagerar MgCl_2 med den fasta kalciumhydroxiden i cementpastan och bildar ett fast magnesium-klor-hydrat:



Den nya fasen upptar dubbelt så stor volym som kalciumhydroxiden varur det bildats. Det ger sprängande verkan.

Enligt Peterson (1984) gäller följande för attack av *kalciumklorid*:

- Mätningar har visat att mängden kalciumhydroxid i betongen börjar minska vid en $\text{Ca}(\text{Cl})_2$ -koncentration överstigande 1 mol/liter. Vid 3 mol/liter har all kalciumhydroxid försvunnit. Vid denna koncentration uppstår sprickor i betongen, vilken slutligen blir helt förstörd vid denna eller högre koncentration.
- Det finns flera tänkbara orsaker till den sprängande effekten, vilket diskuteras av Peterson (1984). Den mest sannolika är att det sker en kemisk reaktion mellan magnesiumklorid och kalciumhydroxid. En sannolik fas vid hög koncentration är ett kalcium-klor-hydrat med följande sammansättning:



Produkten upptar större volym än kalciumhydroxiden och är därför sprängande:

Som nämnts ger NaCl liten påverkan. Detsamma gäller KCl. Båda salterna kan emellertid förvärra alkali-kiselsyrareaktion om ballasten innehåller alkalilöslig kiselsyra. Denna reaktion är inte av typen saltangrepp och behandlas därför inte i rapporten.

7.4.6 Inverkan av vct och cementtyp

Flera saltangrepp sker från ytan och är diffusionstyrda. Därför ger sänkt vct ökat skydd mot nedbrytning.

Sulfatresistent cement har ingen skyddande effekt såvida inte det angripande saltet innehåller svavelkomponenter. Däremot har det visat sig att många angrepp minskar om portlandcement byts mot slaggcement. Även inblandning av flygaska, silikastoft eller annan puzzolan bör vara positiv eftersom den minskar mängden av den huvudsakliga angripna fasen i betongen, kalciumhydroxiden, samtidigt som den ofta minskar permeabiliteten.

7.5 Angrepp av havsvatten

7.5.1 Havsvattens sammansättning

Havsvatten innehåller många ämnen som är potentiellt aggressiva mot betong, t.ex. magnesium- och sulfatjoner. Jonkoncentration och pH hos olika havsvatten ges i Tabell 10. Saltsammansättningen i världshavet visas i Tabell 11.

Tabell 10: Mängd skadliga joner och pH i havsvatten; Biczók (1972).

Jon	Jonkoncentration mg/liter		
	Östersjön	Nordsjön	Atlanten
SO_4^{2-}	580	2 220	2 810
Mg^{2+}	260	1 110	1 410
Ca^{2+}	50	430	480
Cl^-	3 960	16 850	20 000
Na^+	2 190	12 200	11 100
K^+	70	550	400
pH	>7	>8	>8

Tabell 11: Saltinnehåll i världshavet; Biczók (1972)

Typ av salt	g/liter	% av total salthalt
Natriumklorid	26,9	78,3
Magnesiumklorid	3,2	9,4
Magnesiumsulfat	2,2	6,4
Kalciumsulfat	1,3	4,0
Kalciumklorid	0,6	1,7
Andra (t.ex. bikarbonat)	-	0,2
<i>Totalt</i>	<i>34,2</i>	<i>100</i>

7.5.2 Havsvattens aggressivitet

Det höga pH-värdet innebär att havsvatten inte bryter ned betong genom rent syraangrepp. Däremot kan lösta salter ge destruktiv påverkan.

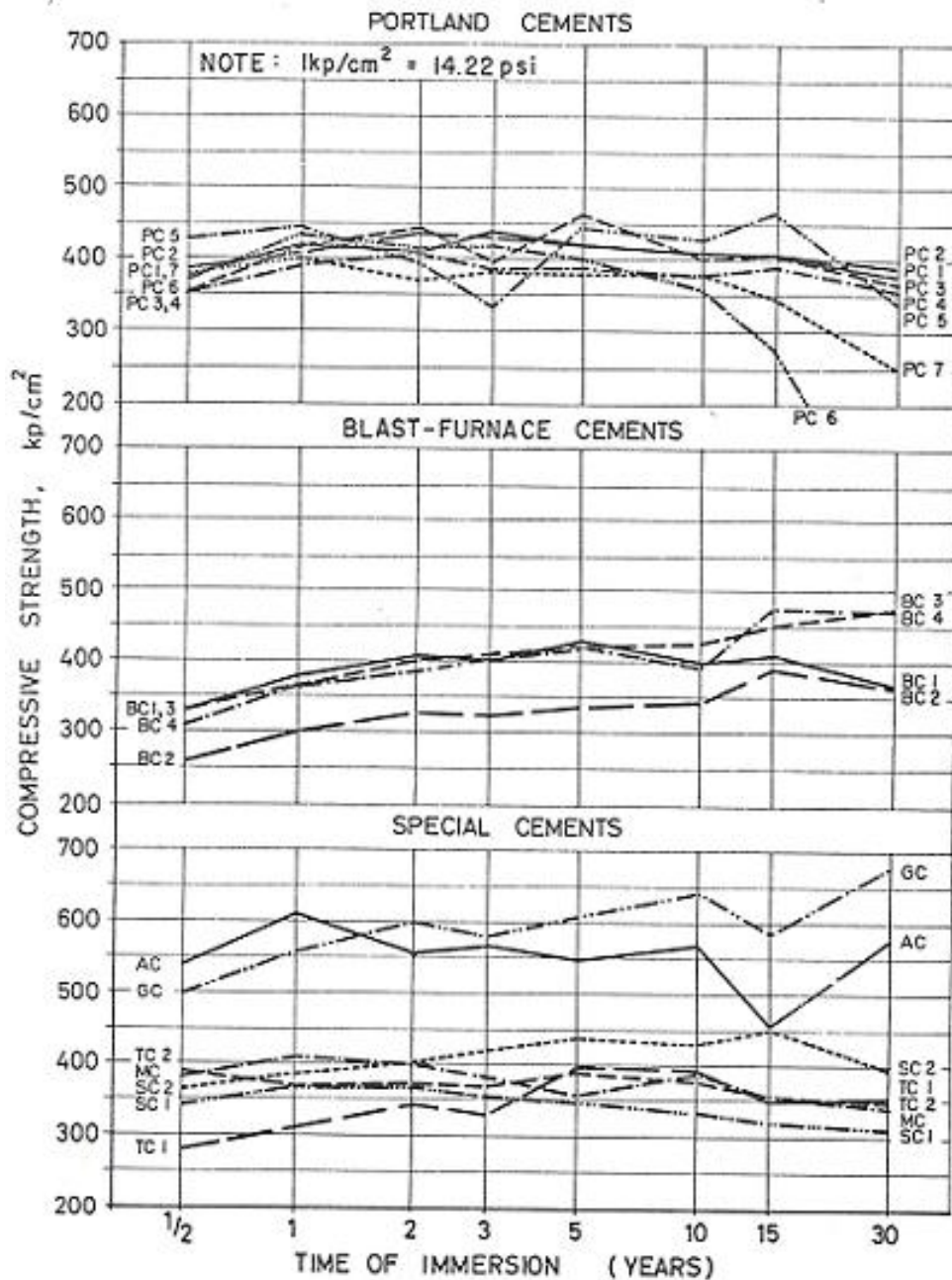
En jämförelse med Tabell 7 visar att sulfatinnehållet motsvarar följande angreppsgrader:

- *Sulfatinnehåll*
Östersjön: Svagt till måttlig.
Nordsjön: Måttlig.
Atlanten: Måttlig till stark.

- *Magnesiuminnehåll:*
Östersjön: Svag.
Nordsjön: Måttlig.
Atlanten: Måttlig till stark.

Trots den höga halten sulfatjoner är betong förvånansvärt beständig i havsvatten. Detta har visats i ett flertal stort upplagda långtidsförsök där prover exponerats i havet. Ett exempel är ett långtidstest genomfört i Norge. 2500 betongprover lagrades under upp till 30 år i Trondheims hamn. 18 olika cementtyper ingick i undersökningen, liksom betong med olika vct. En del prover var nedsänkta. Andra utsattes för tidvatten. De senare proverna kan också ha blivit utsatta för viss frostbelastning. Exempel på resultat visas i Figur 35. Som synes uppvisar i stort sett alla betongprover mycket god beständighet, med undantag av portlandcement med C_3A -halt 10% eller högre (litt 5: 10%, litt 6: 11%, litt 7: 13%).

Betong med slaggcement hade genomgående bäst beständighet. *Det har dock visat sig att slaggcement ger problem där betongen även utsätts för frost, t.ex. över vattenlinjen i kallt klimat.* Orsaken är troligen att det karbonatiserade skiktet hos slaggcementbetong har mycket dålig frostbeständighet i salt miljö, se avsnitt 8.2.4 nedan.



Figur 35: Hållfasthet hos betongprover som lagrats 30 år i Atlantvatten.

Gjörv (1971).

Översta bilden: 7 olika portlandcement med C_3A -halt från 0 (litt 1) till 13% (litt 7).

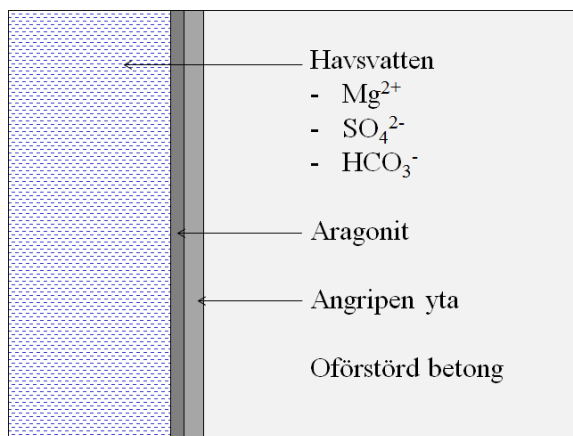
Mellersta bilden: 4 olika slaggcement med slagghalt mellan 30% och 85%.

Understa bilden: Specialcement, bl.a. trasscement (Litt TC, trass inblandad i portlandcement), och aluminatcement (litt AC).

7.5.3 Angreppsmekanism

Havsvattengreppet är ett ytangrepp där ytan gradvis eroderar. Det inre av betongen är fortfarande intakt vilket visas av att hållfastheten behålls i stort sett oförändrad, se Figur 35. Normalt kan man inte heller observera någon inre expansion. Ytangreppet orsakas främst av magnesiumjonen i havsvattnet, vilket framgår av att ytan oftast har ett skikt av magnesiumhydroxid (brucit).

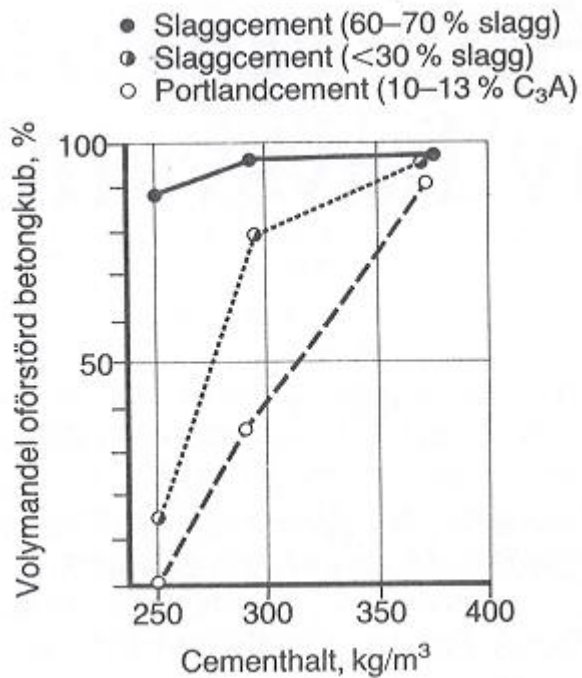
Orsaken till att sulfat- och magnesiumangrepp begränsas trots de höga halterna av dessa joner anses vara att det utbildas ett tätt skikt på betongytan genom reaktion mellan kalk i betongen och bikarbonatjoner i havsvattnet; Locher (1968). Skiktet består av mineralet aragonit som är en form av kalciumkarbonat. Det täta skiktet förhindrar sulfatjoner från att nå in i betongen. Principen visas i Figur 36. Se även Arber&Vivian (1961).



Figur 36: Uppkomst av ytskikt av aragonit som skydd mot havsvattenangrepp.

7.5.4 Inverkan av betongens täthet

För att det skyddande skiktet av aragonit skall kunna fungera måste betongen vara tillräckligt tät. Detta klarar man normalt genom att använda betong med lågt vattencementtal. Ett vct av storleksordningen 0,50 och lägre anses vara tillräckligt lågt. Exempel på den positiva inverkan av vct visas i Figur 37 som visar resultat från en långtidsstudie i Nordsjön. Vid en cementhalt 370 kg/m^3 (vct ca 0,45) har betongen god beständighet även när olämpligt cement för sulfatmiljö använts. Vid cementhalter 300 kg/m^3 (vct $\approx$ 0,60) och 250 kg/m^3 (vct $\approx$ 0,70) sker omfattande skador i betong som inte har sulfatresistent cement; dvs. slaggcement med hög slagghalt och portlandcement med låg C_3A -halt.



Figur 37: Resultat av 25 års exponering av betong i tidvattenzonen i Nordsjön.
Tre olika cementtyper varav två inte är sulfatresistenta.
Hummel&Wesche (1956).

Betong kan ha lågt vct men ändå vara otät. Detta gäller för s.k. hålrumsbetong eller "porbetong" i vilken sandfraktionen saknas. Cementpastan räcker då inte till för att fylla alla hålrum mellan ballastkornen. Man får en "Lecablock-liknande" struktur. Vatten kan därför strömma rätt obehindrat genom betongen. Ett skadefall hos sådan betong har observerats i Sverige; Beijer (1979). Konstruktionen var en lång fartygsbädd gjuten inne i en fartygsdocka. Mellan bädden och det underliggande berget göts en några meter tjock porbetong vars uppgift var att utjämna ev. upplyft av vattentryck från sprickor i berget.

En borrhärna uttagen ur porbetongen visas i Figur 38.



Figur 38: Provcylinder av porbetong; Beijer (1979).

Havsvatten från Nordsjön kunde strömma rakt genom porbetongen från ena änden. Ett par månader efter det att havsvatten första gången kom i kontakt med porbetongen började inre delen av denna att expandera. Expansionen gick snabbt och efter mindre än 1 år hade fartygsbädden lyft sig mer än 20 cm vilket är ca 10% av porbetonglagrets tjocklek. Expansion skedde inte i partier närmast havet utan längre in i bädden.

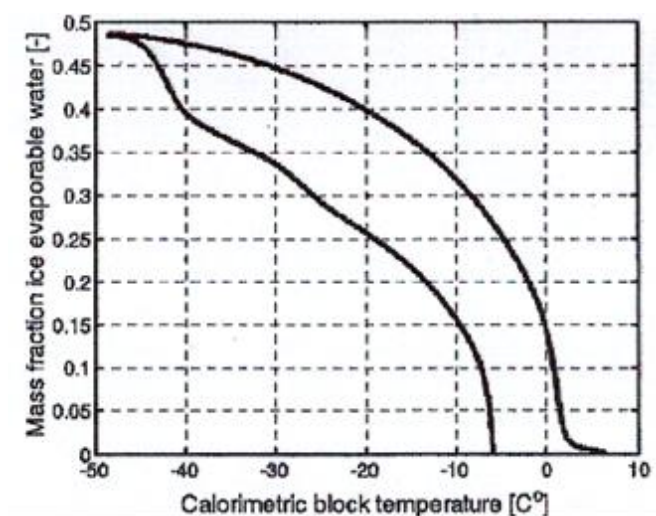
Provhål upptagna där betongen expanderat visade att betongen var närmast totalförstörd. Kemisk analys av utfällningar visade på mycket hög sulfathalt vilket visar att huvudsaklig skadeorsak var sulfatangrepp. En vit smetig massa förekom också i betongen och visade sig bestå av magnesiumhydroxid. Detta visar att även magnesiumattack ägt rum. vct hos betongen var 0,40, dvs. cementpastan i sig hade mycket hög kvalitet.

Orsaken till skadan bedömdes vara att karbonatjonerna i havsvattnet konsumerades på sin väg genom betongen. I betongens inre saknades därför det normala skyddet som aragonit ger.

8 Fysikaliskt angrepp

8.1 Frostangrepp utan salt

En del av det vatten som har absorberats i betongens porsystem är frysbart. I Figur 39 visas en kalorimetermätning av frysning av vatten i cementpasta. Som synes bildas alltmer is ju lägre temperaturen är. Vid temperaturer under ca -50°C bildas ingen mer is.



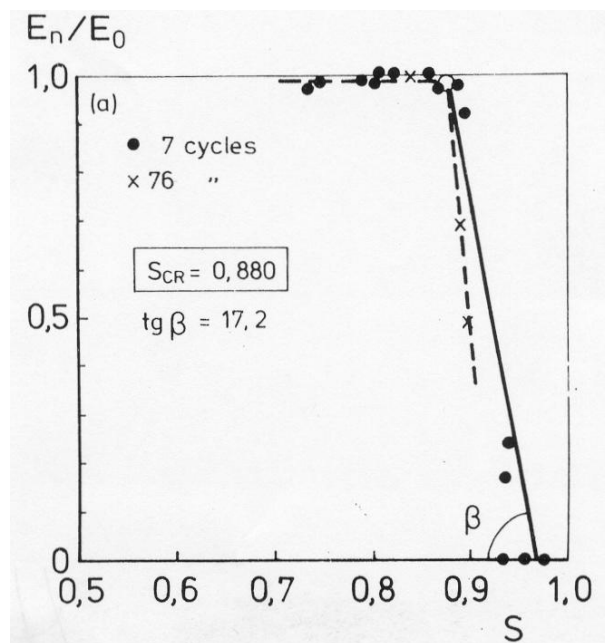
Figur 39: Kalorimetermätning av isbildning och issmältning i cementbruk med vct 0,40. Övre kurvan: Isbildning. Undre kurvan: Issmältning. Johannesson&Fagerlund (2003). Temperaturen mättes i kalorimeterväggen och är därför någon grad skild från provkroppstemperaturen.

Vid de frystemperaturer som kan uppnås i Sverige -20°C till -30°C kan i princip allt vatten i kapillärporerna frysa. Däremot är vatten i gelporerna ofrysbart eftersom det är hårt bundet till porväggarna. Det innebär att approximativt följande vattenmängd (W_f) kan frysa i de tre betongtyper som studerades i avsnitt 4.1.2.

- Högpresterande anläggningsbetong (vct 0,38, cementhalt 450 kg/m^3): $W_f=55\text{ liter/m}^3$.
- Enkel husbyggnadsbetong (vct 0,80, cementhalt 225 kg/m^3): $W_f=110\text{ liter/m}^3$.
- Vattenbyggnadsbetong (vct=0,55, cementhalt 330 kg/m^3): $W_f=85\text{ liter/m}^3$.

Kapillärporerna kan förväntas vara helt vattenmättade i betong som befinner sig i våt miljö. I en sådan situation räcker det med ca 10 liter frysbart vatten per m^3 för att spränga sönder betongen om inga luftfyllda porer finns; Fagerlund (1997). För att klara frysning tillsätts därför luftporbildande medel till den färska betongen. Det skapar luftporer i den hårdnade betongen. Dessa kan inte vattenfyllas utan svårighet. Därför fungerar de som expansionsutrymmen för det vatten som pressas undan från kapillärporerna då vatten i dessa fryser.

I en betong som fryser isolerad från omgivningen, t.ex. genom att förseglas med ett tätt membran, kan man identifiera en *kritisk vattenhalt* som utgör gränsen mellan beständighet och obeständighet. Ett exempel på en mätning av den kritiska vattenhalten visas i Figur 40. Vattenhalt uttrycks här som vattenmättnadsgrad, S ($0 < S < 1$). Vid $S=1$ är betongen helt vattenmättad. Även luftporerna är då vattenmättade. För betongen i Figur 40 är den kritiska vattenmättnadsgraden 0,88. Innan mätningen har olika prover konditionerats till olika vattenmättnadsgrad varefter de förseglades och frystes till ca -20°C .



Figur 40: Inverkan av betongens vattenmättnadsgrad på frostska. E_n/E_0 är relativ dynamisk E-modul efter n cykler och före första fryscykel. Fagerlund (1982).

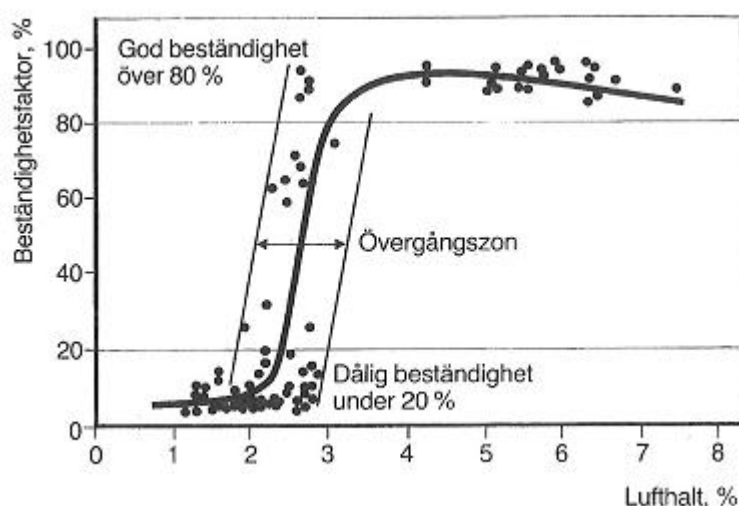
Ingen del av en betongkonstruktion kommer att frostska om den aktuella vattenhalten i alla delar av konstruktionen underskrider den kritiska, dvs. definitionen av frostbeständighet är:

$$S_{\text{AKT}} < S_{\text{KR}} \text{ i alla delar av konstruktionen.}$$

Om detta villkor även är uppfyllt i betongytan som står i kontakt med vatten kommer ytan inte att skadas av frost. Villkoret kan uppfyllas genom att det luftporsystem som skapats i betongen är av hög kvalitet (hög lufthalt, väl fördelade luftporer).

Om man känner hur fuktupptagningen i betongen ser ut kan man i princip förhandsberäkna skadeutvecklingen i konstruktionen och dess förväntade livslängd. Metodiken beskrivs i Fagerlund (2004).

Experimentellt samband mellan lufthalt och frostbeständighet visas i Figur 41. I detta fall har betongen haft möjlighet att absorbera vatten under de 300 fryscykler som använts, eftersom frysning och upptining skedde i vatten. Därför ökar risken för frostsador med ökande antal cykler. Beständighetsfaktorn 100 innebär att provet är helt oskadat.



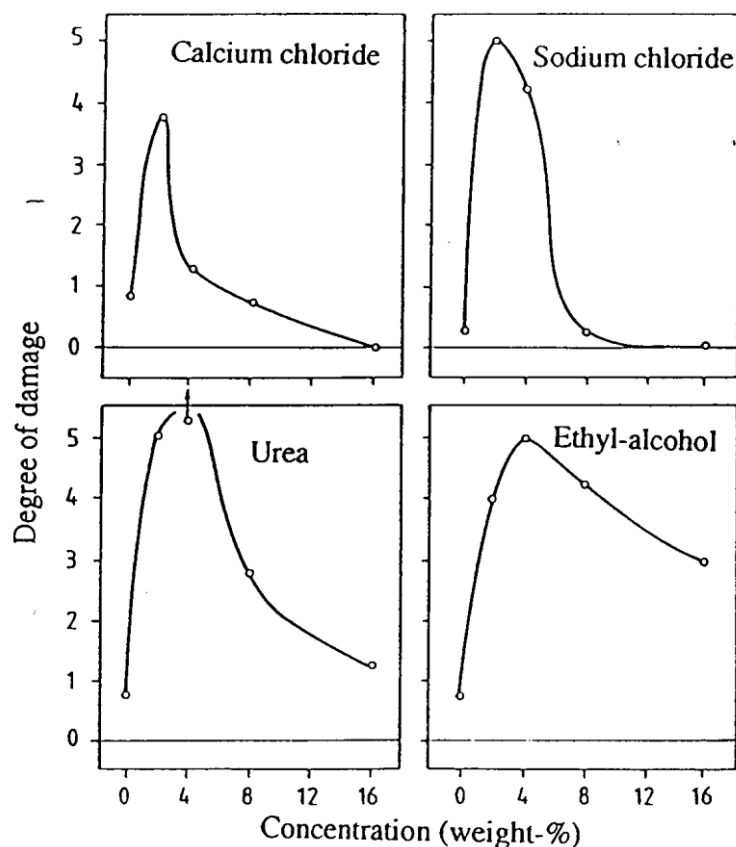
Figur 41: Experimentellt samband mellan lufthalten i betongen och frostbeständigheten. Cordon (1966).

8.2 Saltfrostangreppet

8.2.1 Inverkan av saltkoncentration och typ av salt

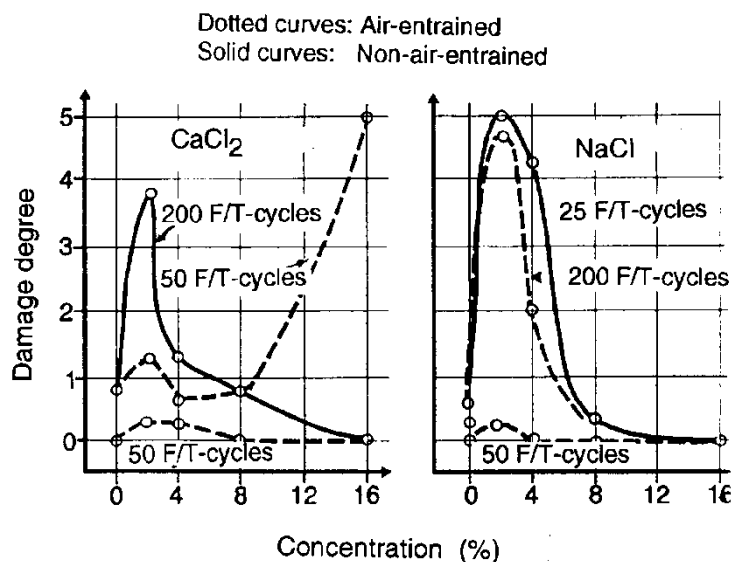
När ytan står i kontakt med en saltlösning i samband med frysning och betongen inte har hög frostbeständighet uppstår ofta en avskalning av ytan. För varje ny frostcykel ökar avskalningen. En allvarlig effekt av detta är att täcksiktet över armeringen gradvis reduceras, vilket påverkar skyddet mot armeringskorrosion.

Det visar sig att allvarliga skador sker redan vid låga saltkoncentrationer, medan höga koncentrationer kan vara ofarliga. Det spelar inte heller någon större roll vilken typ av salt som finns i lösningen. I Figur 42 visas resultatet av ett klassiskt försök där samma betong utsatts för 4 olika vattenlösningar i samband med cyklisk frysbelastning. I samtliga fall uppstår de största skadorna vid ca 3-4 % koncentration hos lösningen medan rent vatten och mera koncentrerad lösning är betydligt mindre skadliga.



Figur 42: Inverkan av olika lösningar på saltfrostangreppets storlek.
Verbeck&Klieger (1957).

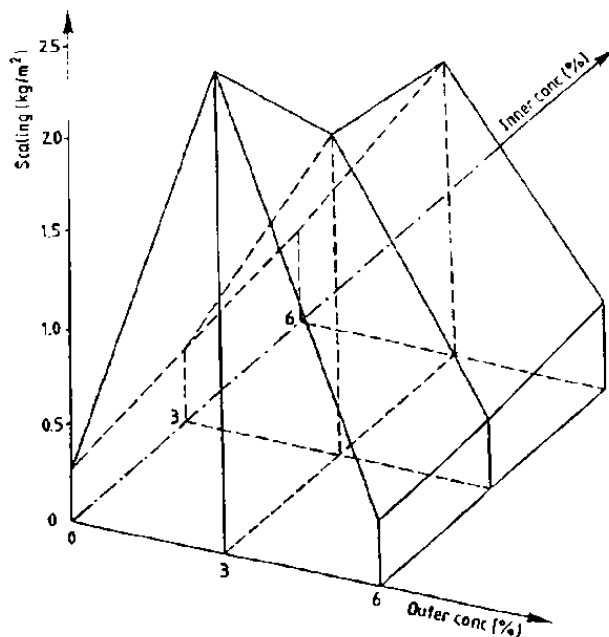
Ett annat exempel visas i Figur 43. I detta försök studerades även betong med luftinblandning. Denna hade en viss positiv effekt. Uppenbarligen var dock lufthalten för låg för att göra betongen helt beständig. Det är intressant att notera att kalciumklorid vid hög koncentration ger förvärrade skador. Detta är med all sannolikhet en effekt av kemiskt angrepp, se avsnitt 7.4.5.



Figur 43: Inverkan av saltkoncentration, typ av salt, luftinblandning och antal fryscykler på frostangreppet. Verbeck & Klieger (1957). Heldragen kurva: utan luftinblandning. Streckad kurva: med luftinblandning.

Den farligaste koncentrationen i försöket i Figur 43 tycks vara ca 2%. Andra mätningar har visat att den farligaste koncentrationen kan vara så låg som 1 %. Detta gäller vid mycket högvärdig betong; Lindmark (1995).

Det har även gjorts försök med prover som lagrats så lång tid i NaCl-lösning (3% och 6%) att porvattnet antagit samma salthalt som den yttre lösningen i vilken frysning sker. Därefter har proverna frysprovats i yttre NaCl-lösning av 3% eller 6% koncentration. Det visade sig även i detta fall att de allvarligaste skadorna uppstod vid 3% yttre saltkoncentration medan den inre saltkoncentrationen inte spelade så stor roll. Resultat visas i Figur 44.



Figur 44: Total avskalning efter 56 fryscyklar hos betong som har olika inre salthalt (NaCl) och olika yttre salthalt (NaCl) hos lösningen som omger provet. Lindmark (1995).

8.2.2 Förstörelsemekanism

Förstörelsemekanismen är inte helt klarlagd. Många hypoteser har förts fram men ingen är verifierad på ett övertygande sätt, se dock Lindmark (1998). Det är uppenbart att mekanismen är rent fysikalisk och inte kemisk. En möjlighet är att närvaron av saltvatten utanför betongytan medför att fukt anrikas i betongens ytparti. Vatten sugas upp till ytan från det inre av betongen beroende på olikheter i saltkoncentration mellan betongens yta och dess inre. Vatten-transport är snabbare än diffusion av saltjoner in i betongen vilket gör att enda sättet att utjämna koncentrationsskillnaden är att vatten transporteras mot saltlösningen. Mekanismen påminner om tjälskjutningsmekanismen.

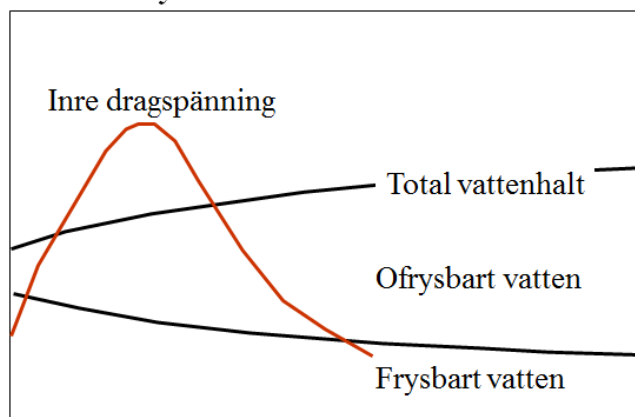
Under frysförloppet finns det alltid ofrusen lösning vid betongytan, även vid låg temperatur. Sannolikt kan även vatten från lösningen tas upp i betongens ytparti.

Båda mekanismerna skulle kunna medföra att den kritiska vattenhalten överskrids i ytan varför denna skalas av.

Orsaken till att ökad saltkoncentration över ett visst farligaste värde ger lägre angreppsgrad kan vara att saltet sänker frystemperaturen vilket medför att den

frysbara vattenmängden minskar med ökande salthalt hos porvattnet. Vid hög salthalt kan minskningen av den frysbara vattenmängden vara så stor att det inre trycket vid frysning minskar vid ytterligare ökad salthalt. Den föreslagna mekanismen åskådliggörs av Figur 45.

Vattenhalt i ytan



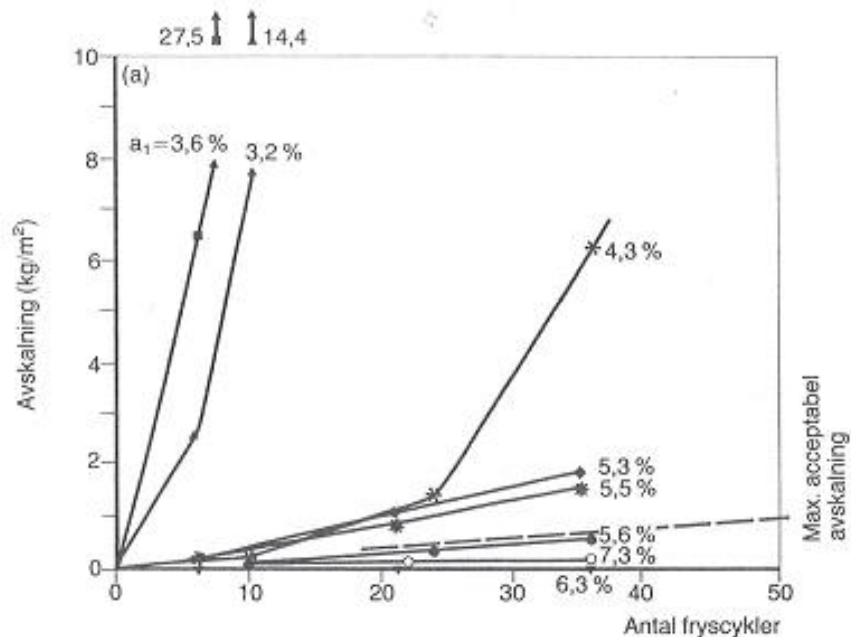
Yttre saltkoncentration

Figur 45: Hypotetisk inverkan av yttre salthalt på inre spänningar vid frysning av betong med ytan i kontakt med salt.

I en doktorsavhandling av Lindmark (1998) framförs en hypotes som i stort sett överensstämmer med teorin ovan. I avhandlingen genomförs även teoretiska analyser och experiment som visar att teorin kan vara riktig.

8.2.3 Inverkan av lufthalt och antalet fryscyklar

Figur 46 visar att skadorna ökar med ökande antal fryscyklar. För betong med låg saltfrostbeständighet är skadeutvecklingen accelererande med ökande antal fryscyklar, vilket gör att yttre delen av betongen kan falla sönder totalt med tiden. För god betong är skadeutvecklingen däremot retarderad. Gränsen mellan dessa båda typer av skadeutveckling tycks ofta gå vid en total ytavskalning av ca $0,5 \text{ kg/m}^2$ efter 28 dygnslånga fryscyklar.

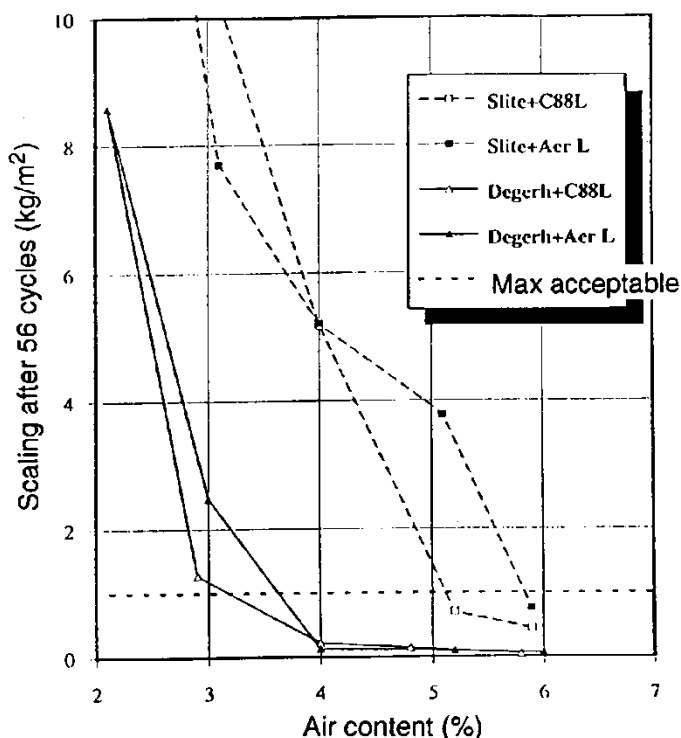


Figur 46: Resultat av en frysprovning i 3% NaCl-lösning. Inverkan av lufthalten på avskalningsförloppet. Fagerlund (1988). Maximalt tillåten avskalning är i detta fall satt till 0,5 kg/m² efter 28 cykler och 1 kg/m² efter 56 cykler. Betong med olika lufthalt, $a_1\%$.

8.2.4 Inverkan av cementtyp

Portlandcement

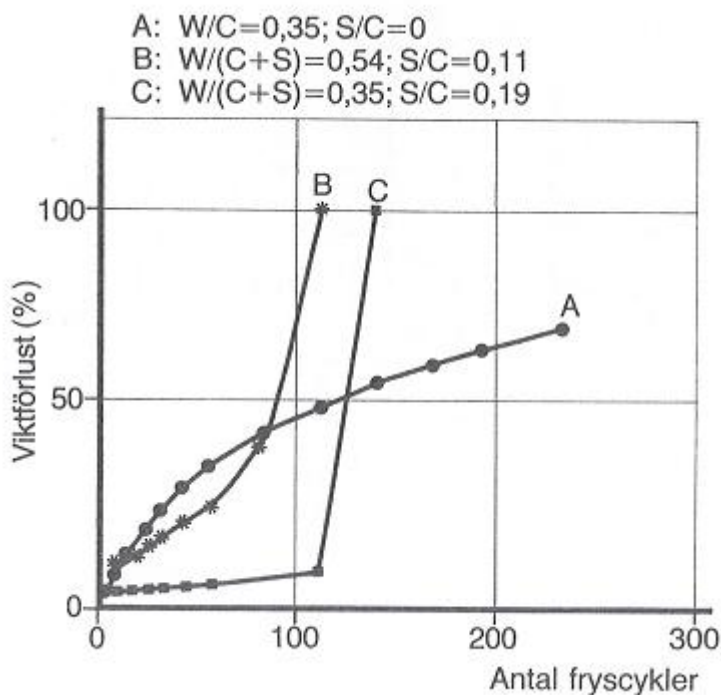
Cementets kemiska sammansättning har stor inverkan på betongens motståndsförmåga mot salfrostavskalning. Lågalkaliska cement har visat sig ge högst och säkrast frostbeständighet. Dessutom kräver de normalt lägre lufthalt än högalkaliska cement för att bli salt-frostbeständiga. Exempel på detta visas i Figur 47. Slite-cementet har en alkalitet räknad som Na₂O på ca 1,1% medan Anläggningscementets alkalihalt är ca 0,2%. För betong med Anläggningscement ger ca 3 à 4% luft tillfredsställande frostbeständighet medan betong med Slitecement kräver ca 6 % luft.



Figur 47: Inverkan av cementtyp, typ av luftporbildande tillsatsmedel (C88L, AerL) och lufthalt på saltfrostavskalning efter 56 frostcykler. Malmström (1990). Frysmetod är den s.k. Boråsmetoden där frysning sker med 3% NaCl-lösning vid betongytan.

Silikastoft

Vid inblandning av silikastoft har man noterat en accelererande avskalning när frostprovningsen pågått under någon tid. Exempel visas i Figur 48. Orsaken till detta fenomen är inte klarlagd. En hypotes är att luftporsystemet inaktiveras genom att fyllas med vatten. Luftporsystemet tenderar nämligen att bli finare när silikastoft blandas in. Vid minskad porstorlek går absorptionen i luftporsystemet snabbare, Fagerlund (2004).



Figur 48: Saltfrysprovning av betong med rent portlandcement (A) och med 11% resp. 19% silikastoft (B, C). Petersson (1986).

Fältförsök bekräftar att inblandning av silikastoft kan vara negativt, se Figur 49.

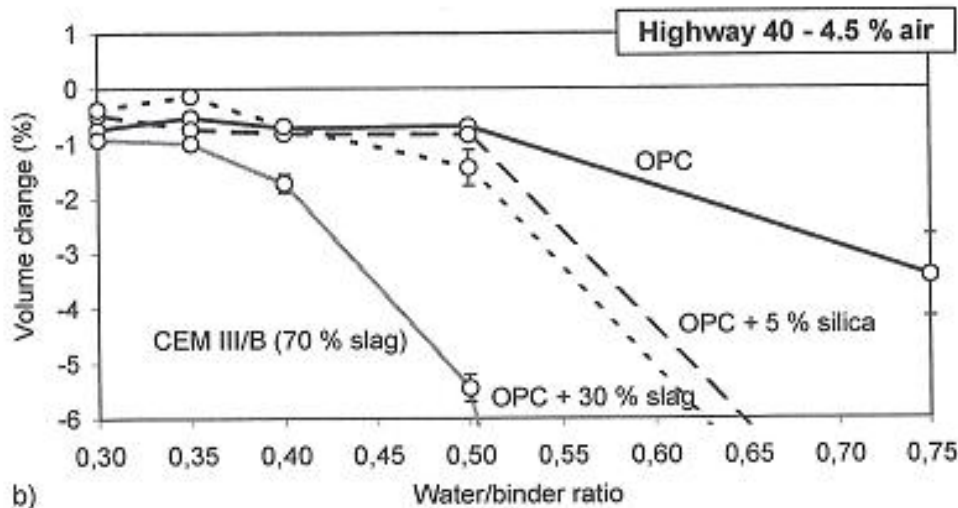
Flygaska

Flygaska innehåller alltid en viss mängd restkol och andra organiska föroreningar. Dessa absorberar en del av det luftporbildande medlet som tillsätts för att betongen skall bli frostbeständig. Detta gör att lufthalten minskar. Eftersom kolhalten i askan varierar kommer absorptionen att variera rätt kraftigt från betongsats till betongsats, varför det blir svårt att styra lufthalten under betongproduktionen. Följaktligen kommer även frostbeständigheten att variera. Detta var orsaken till att flygaska inte tilläts i betongen till Öresundsbron.

Masugnsslagg

All betong karbonatiserar i ytan. För betong med portlandcement blir ytan tätare vilket är gynnsamt med avseende på saltfrostbeständigheten. För betong med slaggcement blir det karbonatiserade skiktet av låg kvalitet och kommer att frysa loss. Detta gör att betong med slaggcement normalt får låg saltfrostbeständighet. Exempel på att så är fallet visas i Figur 49. Provkroppar har exponerats för vägsalt under ett antal år vid en fältprovplats vid en motorväg utanför Borås. Volymförlusten orsakad av avskalning mättes efter 7

års exponering. Slaggcement liksom cement med inblandat silikastoft fick klart större avskalning än portlandcementbetongen.



Figur 49: Volymminskning hos betongprover med olika bindemedel efter 7 års exponering för vägsalt. Utgenannt (2004).

Den bristande salt-frostbeständigheten hos slaggcementbetong kan vara orsaken till att den normalt goda beständigheten hos sådan betong mot havsvatten försämras när betongen även utsätts för frystemperatur.

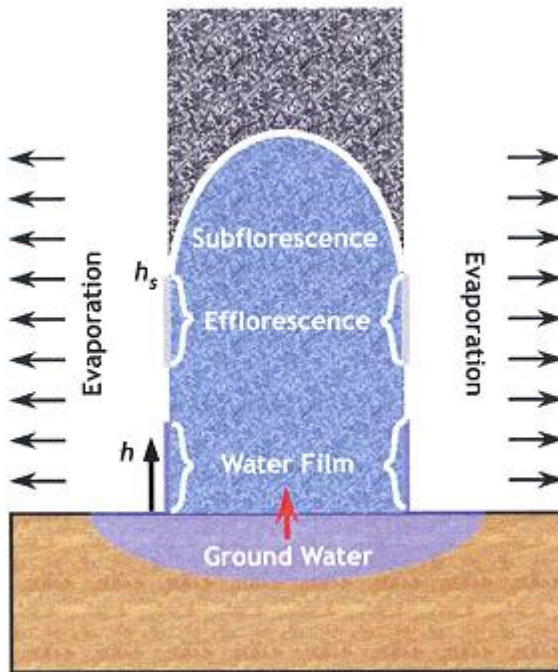
8.3 Kristallisationstryck-saltsprängning

När en betongkonstruktion står i kontakt med salthaltigt grundvatten eller havsvatten kan det salthaltiga vattnet sugas in kapillärt. Detta gäller främst betong med tämligen högt vct. Vid lågt vct vandrar såväl vatten som salt huvudsakligen in genom diffusion som är mycket långsam. Farligt kristallisationstryck kan då troligen inte uppkomma.

I betong där vatten och salt sugas in kapillärt sker avdunstning från betongytan ovanför vattenytan. I partiet närmast vattenytan, där kapillärsugningen är snabbare än avdunstningshastigheten, kommer avdunstningszonen att ligga i ytan. Saltet fälls då ut som en beläggning ovanpå denna. Skador uppkommer inte.

Längre upp i konstruktionen är kapillärsugningen långsammare än avdunstningshastigheten. Saltet fälls därför ut innanför ytan. Kristalltillväxt inne i porsystemet kommer därför att kunna ske. Under vissa betingelser kan de växande kristallerna skapa så stora inre spänningar att betongens draghållfasthet överskrids. Betongytan kan då sprängas sönder.

Principer för uppkomst av kristallisationstryck visas i Figur 50.



Figur 50: Konstruktion som suger upp saltvatten. "Efflorescence" är parti där salt fälls ut på ytan utan att ge skador. "Subflorescence" är part där avdunstningszonen befinner sig inne i betongen. Kristalltillväxt sker och kan ge så stora inre tryck att betongen skadas. Figur från Scherer (2004).

Exempel på saltsprängning av ett prov av kalksten vars bottenyta under 50 dygn stått i kontakt med en natriumsulfatlösning som sugits upp i stenen visas i Figur 51. Salt har fällts ut inne i stenen och stora delar av ytskiktet har skalat av.

Kristalltillväxt sker enbart om den uppsugna lösningen är övermättad, vilket den kan bli i samband med att lösningen avdunstar. Mekanismen och vilka tryck den kan ge upphov till har behandlats av flera författare, t.ex. Correns (1949), Scherer (2003), Thaulow&Sahu (2004). Correns (1949) var den förste som kvantifierade vilka tryck som kan uppkomma. Enligt honom är kristallisationstrycket:

$$P = 10^3 \cdot \frac{R \cdot T}{V_s} \cdot \ln \frac{C}{C_s} \quad (44)$$

Där P är trycket (Pa), R är allmänna gaskonstanten (J/mol·grad), T är absoluta temperaturen (grad), V_s är molarvolymen hos fast salt (l/mol), C är lösningens

koncentration (mol/l), C_s är koncentrationen vid mättnad vid aktuell temperatur (l/mol). 10^3 är antal liter/m³. Förhållandet C/C_s uttrycker graden av övermättnad.

Ekvationen visar att kristallisationsstrycket ökar med ökad övermättnad och ökad temperatur. Trycket kan bli stort vilket visas med följande exempel.

Exempel: Na₂SO₄ vid 20°C (293K). Övermättnad 10%. $V_s=0,053$ liter/mol.

$$P = 10^3 \frac{8,3 \cdot 293}{0,053} \ln 1,1 = 4,3 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 4,3 \text{ MPa}$$

Detta är av samma storleksordning som betongs draghållfasthet.

Olika salter ger olika övermättnad och därmed olika risk för stora kristallisationsstryck. Ett vanligt salt som orsakat skador framförallt hos natursten och murverk är natriumsulfat. Även klorider, t.ex. natriumklorid, anses kunna ge skador.



Figur 51: Avsprängning av ytskiktet på en sandstensprisma som sugit upp en 16-procentig lösning av Na₂SO₄ och vars yta torkat i 30% rf. Figur från Scherer (2004).

Skador orsakade av kristallisationsstryck är inte vanliga på betong. De har framförallt noterats på betongkonstruktioner i Mellersta Östern, och då på konstruktioner som grundlagts i mark med starkt salthaltigt grundvatten. Det hävdas också att skador uppkommit i vissa konstruktioner ovanför vattenlinjen i havsvatten.

Där skador av kristallisationstryck på betong uppkommit har betongen sannolikt varit ovanligt porös och stark kapillärsugande, eller skadad av andra orsaker t.ex. frostskadad. I högvärdig betong är skador osannolika.

9 Referenser

Arber, Vivian (1961): Carbonation as a means of inhibiting sulphate attack in mortar and concrete. Australian Journal of Applied Science, Vol. 12, No3.

Beijer (1979): Svåra skador på porbetong i havsvatten. Nordisk Betong, Nr 4.

Betonghandbok. Arbetsutförande (1990). Svensk Byggtjänst.

Biczók (1972): Concrete corrosion. Concrete Protection. Akadémiai Kiadó. Budapest.

Bijen (1989): Can we construct durable marine structures with neat concrete and can we repair durably? Delft University and Intron.

Bing, Cohen (2000): Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? Cement and Concrete Research. Vol. 30.

Bonavetti, Rahhal, Irassar (2001): Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cement. Cement and Concrete Research. Vol. 31.

Byfors (1980): Plain concrete at early ages. CBI Research, Fo3:80.

Byfors (1986A): Influence of silica fume and fly ash on chloride diffusion and pH-values in cement paste. CBI, opublicerat manuskript.

Byfors (1986B): Livslängdsbedömningar av betongkonstruktioner med hänsyn till armeringskorrosion. CBI Informationsdag. Sammanfattningar.

Cembureau (1978): Use of concrete in aggressive environments. Cembureau Recommendation, Paris.

Cordon (1966): Freezing and thawing of concrete - mechanisms and control. ACI Monograph Nr. 3. Detroit.

Correns (1949): Growth and dissolution of crystals under linear pressure. Discussions, Faraday Society, Vol. 5.

Crammond (2003): The thaumasite form of sulfate attack in the UK. Cement and Concrete Composite. Vol. 25.

Crank (1975): The mathematics of diffusion. Oxford University Press.

Diamond (1996): Delayed ettringite formation - Processes and problems. Cement and Concrete Composites. Vol. 18.

Fagerlund (1980): Fuktmekaniska egenskaper. Kap 8:6 i Betonghandbok. Material. Svensk Byggtjänst.

Fagerlund (1982): The influence of slag cement on frost resistance of the hardened concrete. CBI Report Fo 1.82.

Fagerlund (1983): Betong med flygaska. Ingår i Kiselstoft och flygaska. CBI Kursverksamheten.

Fagerlund (1988): Effect of air-entraining and other admixtures on the salt-scaling resistance of concrete. Ingår i "Durability of concrete. Aspects of admixtures and industrial by-products. Int. seminar, Chalmers, April 1986". BFR Document D1:1988.

Fagerlund (1994): Struktur och strukturutveckling. Kap 10 i Betonghandbok. Material. Svensk Byggtjänst.

Fagerlund (1997): Internal frost attack - State of the art. Ingår i RILEM Conference "Frost resistance of concrete". E&F Spon.

Fagerlund (2011): The threshold chloride level for initiation of reinforcement corrosion in concrete. Avd. byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-3159.

Fiskaa (1973): Betong I alunskiffer. Norges Tekniske Institut. Publikasjon Nr. 101.

Gjörv (1971): Long-time durability of concrete in seawater. ACI Journal, January 1971.

Halvorsen (1968): Kemisk nedbrytning av betong. Inst. Byggnadsteknik, avd. Byggnadsmaterial, LTH.

Harboe (1982): Longtime studies and field experiences with sulfate attack. ACI Publication SP77.

Hummel, Wesche (1956): Beton in Seewasser. Deutsche Ausschuss für Stalbeton, Heft 124. Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin.

Johannesson, Fagerlund (2003): Betong för lagring av flytande naturgas. Avd. byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-7174.

Khatri, Sirivivatnanon (1997): Role of permeability in sulphate attack. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 8.

Kuzel (1996): Initial hydration reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cements. Cement and Concrete Composites, Vol. 18.

Lawrence (1990): Sulphate attack on concrete. Magazine of Concrete Research, Vol. 42, No.153.

Lea (1970): The chemistry of cement and concrete. Edwin Arnold Ltd.

Lindmark (1995): Influence of testing conditions on salt scaling resistance of concrete. Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology, Report M2:05, Lund.

Lindmark (1998): Mechanisms of salt-frost scaling of Portland cement-bound materials: Studies and hypothesis. Avd. byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-1017.

Locher (1966): Zur Frage der Sulfatwiderstands von Hüttenzementen. Zement-Kalk-Gips. Vol. 19(9).

Locher (1968): Influence of chloride and hydrocarbonate on the sulphate attack. Proc. 5th Int. Symposium on the Chemistry of Cement. Part III. Tokyo.

Locher, Richartz, Sprung (1976): Erstarren von Zement. Teil I: Reaktionen und Gefügeentwicklung. Zement-Kalk-Gips. Vol29.

Malmström (1990): Influence of the cement type on the frost resistance of concrete. The National Swedish Test Institute, SP-Report 1990:07, Borås 1990.

Miller, Manson (1951): Long-time tests of concretes and mortars exposed to sulfate waters. Univ. of Minnesota, Agricultural Experiment Station. Technical Bulletin No. 184.

Nilsson (1980): Hygroscopic moisture in concrete-drying, measurements and related material properties. Avd. Byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-1003.

Page, Vennesland (1985): Pore solution composition and chloride binding capacity of silica fume cement paste. Materials and Structures, Vol. 16, No 19.

PCA (1965): Twenty-year report on the long-time study of cement performance in concrete. Portland Cement Association, Research Department Bulletin 175.

Peterson (1984): Chemical attack of strong chloride solutions on concrete. Avd. byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-3020.

Peterson (1992): The chemical effects on cement mortar of solutions of calcium magnesium acetate and sodium chloride. Avd. Byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-3049.

Peterson, Warris (1981): Reaction between blast-furnace slag and lime. Cementa, CM-rapport T 81018.

Petersson (1986): The influence of silica fume on the salt frost resistance of concrete. National Swedish Testing Institute, Technical Report 1986:32.

Powers (1962): Physical properties of cement paste. Ingår i "Proc. of the 4:th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Washington 1960". National Bureau of Standards, Monograph 43, Vol. II.

Powers, Copeland, Hayes, Mann (1954): Permeability of portland cement paste. ACI Journal, Proc. Vol. 51.

Rombén (1994): Betonghandbok. Material. Kap. 23. Kemiskt angrepp. Svensk Byggtjänst.

Romberg (1971): Einfluss der Zementart auf die Porengrößenverteilung im Zementstein. Tonindustrie Zeitung, Vol. 95.

Roosaar, Vessby (1962): Betongskador orsakade av kismineral i ballast. Nordisk Betong, Nr 3.

Sandberg (1993): Opublicerade resultat från det svenska projektet Beständighet Marin Betong (BMB). Avd. byggnadsmaterial, LTH.

Scherer (2004): Stress from crystallization of salt. Cement and Concrete Research. Vol. 34.

Schwiete, Ludwig (1966): Über die Bestimmung der offenen Porosität im Zementstein. Tonindustrie Zeitung, Vol. 90, Nr 12.

- Sellevoid, (1982): Silica fume cement paste - hydration and pore structure. Ingår i "Condensed silica fume in concrete". Inst. Bygningsmateriallære, NTH, Trondheim.
- Short (1984): Kloriddiffusionsmätningar utförda vid Univ. of Sheffield. Cementa CM Rapport T84103.
- Stark (1982): Longtime study of concrete durability in sulfate soils. Ingår i Portland cement Association. Publication SP-77.
- Taylor, Famy, Scrivener (2001): Delayed ettringite formation. Cement and Concrete Research. Vol. 31
- Thaulow, Sahu (2004): Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization. Materials Characterization. Vol. 53.
- Thomas, Bamforth (1999): Modelling chloride diffusion in concrete. Effect of fly ash and slag. Cement and Concrete Research. Vol. 29.
- Tuthill (1955): ASTM, Special Technical Publication Nr. 169.
- Utgenannt (2004): The influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete. Avd. byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-1021.
- Verbeck, Klieger (1957): Studies of the salt scaling of concrete. Highway Research Board, Bulletin 150.
- Winslow, Diamond (1970): A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in portland cement paste. J. of Materials, Vol. 5.
- Woods (1968): Durability of Concrete Construction. American Concrete Institute. Monograph No. 4. Detroit.
- Yang, Lawrence, Lynsdale, Sharp (1999): Delayed ettringite formation in heat-cured Portland cement mortars. Cement and Concrete Research, Vol. 29.
- Zhang, Gjörv (1991): Effect of silica fume on pore structure and chloride diffusivity of low porosity cement pastes. Cement and Concrete Research, Vol. 21.

ELFORSK

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se