

# MATERIALESAMLING

## CEMENT OG BETON A- OG B-NIVEAU.

### INDHOLD

Introduktion.....	1
Modul 1: Introduktion til cement og beton .....	4
Modul 2: Eksperimentelt arbejde.....	10
Modul 3: Færdiggørelse af forsøg og mere om betonfremstilling.....	11
Modul 4 og 5: Forberedelse til og gennemførelse af virksomhedsbesøg.....	17
Modul 6: Bestemmelse af chloridindholdet i cement og beton.....	18
Modul 7: Efterbehandling af virksomhedsbesøg og afrunding på forløbet .....	18
Bilag 1: Eksperimentelt arbejde .....	19
Bilag 2: Svarbazar til brug i modul 3.....	31

Materialet er udviklet af  
Sheela Kirpekar, KVUC og Åben Virksomhed

## Introduktion

I dette forløb skal I arbejde med cement og beton. I skal lære om, hvordan man fremstiller beton og kemien, der ligger bag.

Beton benyttes i mange sammenhænge; der er beton i stort set alt nybyggeri, i broer og også i mange møbler - både til indendørs og udendørs brug. Meget betonbyggeri har - med rette - fået et dårligt ry, men mange tænker måske ikke over, at mange velkendte bro- og bygninger er lavet af beton.

Nedenfor er vist et par klassiske og måske kendte eksempler på brugen af beton.



Holocaust mindesmærke i Berlin, Pixabay



Salginatobelbrücke i Schweiz. Billede fra betonhåndbogen, kapitel 1.3



### Sidney opera house. Fra "betonhåndbogen kapitel 1.3"

I Danmark bruges 9-10 millioner tons beton på årsbasis. Dette tal illustrer, at beton er et vigtigt byggemateriale.

I produktionen af beton indgår cement, som en meget vigtig bestanddel. Produktionen af cement giver anledning til en betragtelig CO<sub>2</sub> udledning, hvilket skyldes to forhold; fremstillingen kræver opvarmning til høje temperaturer, helt op til 1200-1400°C. Kalkbrændingen, hvor kridt, calciumcarbonat, omdannes til brændt kalk, calciumoxid, er en kemisk reaktion, hvor CO<sub>2</sub> frigives.

Af disse grunde arbejder såvel Aalborg Portland, hvor cementen fremstilles, som betonbranchen med at reducere energiforbruget og CO<sub>2</sub>-udslippet. Betonbranchen arbejder på at mindske forbruget af cement med materialer, som ikke har et så stort CO<sub>2</sub>-aftryk. Aalborg Portland har koblet deres produktion til fjernvarmenettet og forsyner ca. 45.000 husstande med fjernvarme. Derudover arbejdes der, i samarbejde med DTU, på et CarbonCapture-projekt, som har til formål at opsamle størstedelen af den CO<sub>2</sub>, som udledes ved kalkbrændingen. På sigt kan man forestille sig, at den opsamlede CO<sub>2</sub> kan benyttes i forbindelse med Power-to-X i produktionen af grønne brændstoffer.

# Modul 1: Introduktion til cement og beton

## Lektie til modulet

Læs introduktionen, samt afsnit 1 og 2 nedenfor, s 2-7.

### 1. Cement og beton

Beton fremstilles af cement, der blandes med forskellige andre materialer, herunder sten og sand sammen med vand. Cementen fungerer i denne sammenhæng som et bindemiddel, der bevirker en hærkning af de materialer, som betonen består af.

Når betonen først er blandet, skal den benyttes meget hurtigt - indenfor få timer. Af denne grund findes der beton- og betonelementfabrikker mange steder i landet, mens cement, der kan lagres i længere tid, udelukkende fremstilles af Aalborg Portland her i Danmark.

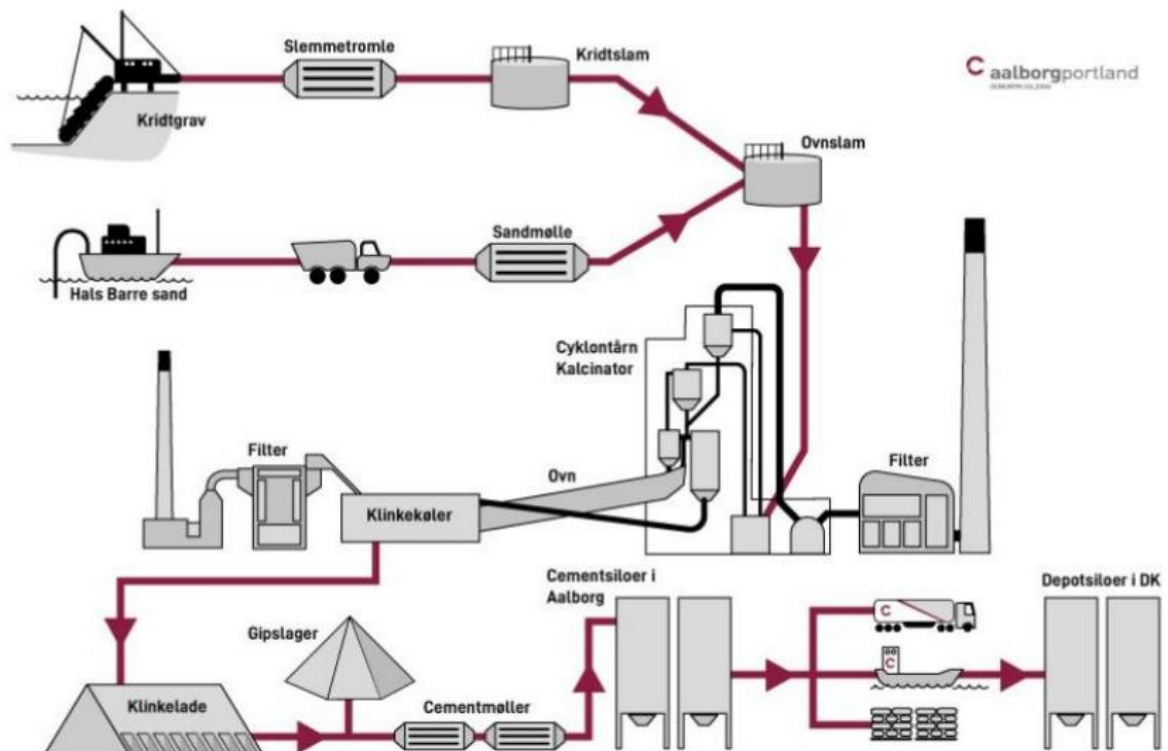
### 2. Kalkbrænding og cementfremstilling

Kalk, kridt eller med kemifagsprog, calciumcarbonat, er en ionforbindelse. Det er den vigtigste komponent i cementfremstillingen. Kalken fås fra kalkbrud, som findes flere steder rundt om i Danmark, herunder Faxe Kalkbrud. Aalborg Portland har, som Danmarks eneste cementfabrik, deres eget kalkbrud lige ved fabrikken.

Kalkbrændingen er en vigtig proces i cementfremstillingen. Der er ikke tale om en reaktion med dioxygen, som man måske kunne tro, men en omdannelse af kalk til calciumoxid og carbondioxid. Processen kaldes en dekomponering. Denne reaktion forløber ved ca. 900 °C.

Når man fremstiller cement, er det dog ikke rent kalk der brændes, men kalken brændes sammen med sand og andre materialer. Den præcise sammensætning afhænger af hvilken type cement, man ønsker at fremstille.

Nedenfor er vist en figur, der viser en oversigt over cementfremstillingen.



Figur 1: Oversigt over cementfremstilling. (Fra "Cement og Beton. Håndbog om cement, beton og mørtel).

På billede 1 nedenfor ses et kar med en kalkopslæmning, (kridtslam i figur 1).

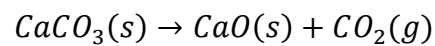


Billede 1: Kar med kalkopslæmning. Privatfoto fra besøg hos Aalborg Portland.

Før brændingen, blandes det opslæmmede calciumcarbonat (kridt eller kalk) med blandt andet fintformalet sand med vand - denne blanding kaldes ovnslam, se figur 1.

Ovnslammen skal nu brændes, det kan gøres ved at indføre den direkte i ovnen eller ved først at tørre den delvist og derefter brænde den. Tørringen og den efterfølgende kalcinering - frigivelse af carbondioxid fra calciumcarbonat sker i cyklontårnet, se figur 1.

Under kalkbrændingen forløber følgende proces:



Calciumoxid, CaO, kaldes brændt kalk.

I roterovnen sker en sintring - en sammensmeltning af mineralerne der brændes - når temperaturerne kommer over 1300 grader C. Efter brændingen får man, hvad der kaldes klinkermaterialet, som afkøles, se klinkekøler figur 1. Klinkermaterialet består blandt andet af calciumoxid-silikater, herunder  $3CaO \cdot SiO_2$ .



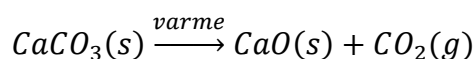
Billede 2: En del af en roterovn. Privatfoto fra besøg hos Aalborg Portland.

Afkølingen kan dels ske med luft, som bruges til at tørre ovnslammet med, eller med vand, som kan bruges til opvarmning af huse. Før klinkermaterialet knuses i cementmøllen tilsættes gips (calciumsulfat). Årsagen hertil er, at betonen vil hærde for hurtigt, hvis ikke det tilsættes. Gipsen, som tilsættes, er naturgips, det vil sige calciumsulfat-dihydrat,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  og calciumsulfat, der fås fra afsøvlingen af røggassen.

I forbindelse med knusningen i cementmøllen opstår friktionsvarme, som betyder, at calciumsulfat-dihydrat omdannes til calciumsulfat-hemihydrat. Når calciumsulfat opløses i vand i forbindelse med betonfremstillingen, er det ikke uden betydning, hvilken type gips, der er tilsat. Såvel opløseligheden af anhydrit, hemihydrat og dihydratet af calciumsulfat som hastigheden, hvormed de opløses er forskellige. Derfor har det stor betydning for afhærdningen af den færdige beton, hvilken form for gips, der findes i cementen. Vi ser på de forskellige former af gips i senere afsnit.

Blandingen af brændt kalk og sand formalet med gips kan bruges som cement, men tilsættes derudover ofte andre materialer. Dette kan være kalkfiller, det vil sige ubrændt finmalet kalk men også flyveakse, som indeholder siliciumoxid og en del aluminiums- og jernoxider.

I det følgende ser vi i første omgang på brændingen af ren kalk



Som man kan se af reaktionsskemaet, produceres der en del carbondioxid,  $\text{CO}_2$ , i kalkbrændingsprocessen. Der arbejdes i disse år intenst på at udvikle metoder til at fange, lagre og evt. genbruge denne carbondioxid. Den samlede proces kaldes CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) og forsøges knyttet til Power-to-X ideen.

### Gruppearbejde:

Find sammen i gruppe af 3-4 personer. Vælg et område af skolen eller udenfor skolen/i lokalområdet.

20 minutter: Gå rundt og find konstruktioner af enhver art, som er fremstillet af beton. Snak om i gruppen om betonen skal have særlige egenskaber - f.eks. skal den kunne tåle fugt, salt, og styrken af betonen. Er der mon tale om armeret beton?

Tag billeder undervejs, som I kan vise frem ved en præsentation.

15-20 minutter fælles i klassen: Hver gruppe præsenterer kort (2-4 minutter), hvad I har fundet.



Lav herefter – i grupperne – opgaverne nedenfor.

### Opgave 1. Kalkbrænding.

I DK brændes ca. 4 millioner tons kalk om året.

- a. Bestem molarmassen af kalk og beregn derefter stofmængden af brændt kalk.
- b. Argumentér ud fra reaktionsskemaet for kalkbrændingen, at stofmængden af dannet CaO og CO<sub>2</sub> er den samme som stofmængden af kalk, hvis al kalken omdannes.
- c. Beregn massen dannet CaO og CO<sub>2</sub>
- d. I DK udledes samlet ca. 60 millioner tons CO<sub>2</sub> pr. år<sup>1</sup>. Hvor stor en procentdel af DKs udledning udgøres af CO<sub>2</sub> fra kalkbrændingsprocessen?
- e. Beregn det volumen af CO<sub>2</sub>, der produceres ved kalkbrændingen, når trykket er 1,02 bar ved
  - i. temperaturen er 900 °C
  - ii. temperaturen er 15 °C, som er jordens gennemsnitlige temperatur<sup>2</sup>.

### Opgave 2. Kalkbrændingens minimum temperatur (Kun A-niveau)

- a. Bestem ved opslag i Databog Fysik Kemi /i din kemibog Standard Entalpitilvæksten ved kalkbrændingen – kommentér fortegnet.
- b. Bestem ved opslag i Databog Fysik Kemi/i din kemibog Standard Entropitilvæksten ved kalkbrændingen – kommentér fortegnet.
- c. Lav en graf, der viser  $\Delta G^0$  som en funktion af temperaturen og bestem den temperatur, hvor kalkbrændingsreaktionen forløber frivilligt.

---

<sup>1</sup> Her er tale om CO<sub>2</sub>-ækvivalenter. Det vil sige massen af drivhusgasser omregnet til masse af CO<sub>2</sub>.

<sup>2</sup> Middeltemperatur i perioden 1990-2010 Kilde: <https://www.dmi.dk/klimatemaforside-jordens-middeltemperatur/>

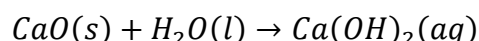


### Opgave 3. Læsket kalk

Læsket kalk er en opslæmning af den brændte kalk, det vil sige, der er tale om calciumoxid tilsat vand.

- a. Find opløseligheden af calciumoxid i vand (i g/100 g vand) og beregn herudfra stofmængdekonzentrationen i en mættet opløsning af CaO.

Reaktionen, som forløber når den brændte kalk reagerer med vand, er følgende:



- b. Find opløseligheden af Ca(OH)<sub>2</sub> i Databog Fysik Kemi eller et andet opslagsværk og omregn opløseligheden til mol/L. Sammenlign med resultatet fra a.

For at undersøge om en given opløsning af calciumhydroxid er mættet laves en titrering af 50,0 ml opløsning af Ca(OH)<sub>2</sub>. Titreringen foregår ved 20°C. Til titreringen benyttes 20,5 ml 0,100 M HCl.

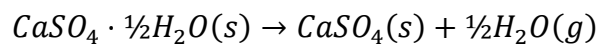
- c. Opskriv reaktionen som forløber under titreringen.
- d. Beregn stofmængdekonzentrationen af Ca(OH)<sub>2</sub> i opløsningen og afgør om, der er tale om en mættet opløsning.
- e. Beregn pH i opløsningen af calciumhydroxid før titreringens start.

Som nævnt i det indledende afsnit tilsættes gips til klinkermaterialet, når dette formales, se figur 1. Formålet med at tilsætte gips er at undgå øjeblikkelig størkning, når cementen blandes med vand og de øvrige materialer. Omdannelsen foregår under formalingen af klinkermaterialet. Gipsen kan findes på følgende former: CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O; calciumsulfat-dihydrat, CaSO<sub>4</sub>; calciumsulfat-anhydrit eller CaSO<sub>4</sub>·½H<sub>2</sub>O; calciumsulfat-hemihydrat

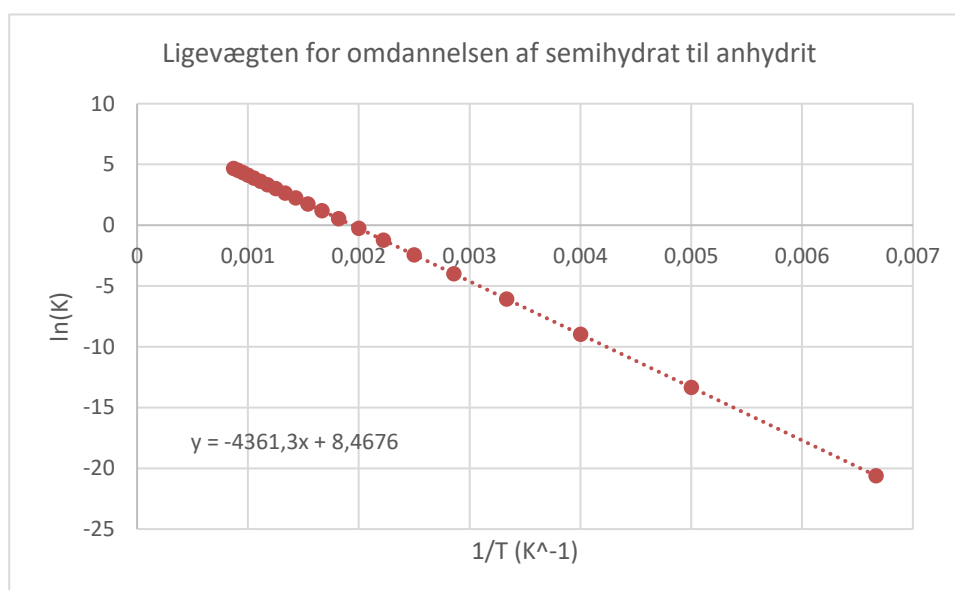
### Opgave 4. Omdannelse forskellige gipsformer. A-niveau.

- a. Opskriv et afstemt reaktionsskema for omdannelsen af naturgips, calciumsulfat-dihydrat til calciumsulphathemihydrat
- b. Beregn  $\Delta H^0$  samt  $\Delta S^0$  for denne proces og kommentér fortegnet på de to størrelser.
- c. Beregn ligevægtskonstanten for reaktionen ved 95°C.

Anhydrit dannes ud fra hemihydratet ved nedenstående reaktion:



I grafen nedenfor er vist  $\ln(K)$  som en funktion af  $1/T$  for reaktionen.



Graf: Sheela Kirpekar

- d. Bestem ligevægtskonstanten for omdannelsen af hemihydratet til anhydrit ved 95°C og ved 200°C.
- e. Sammenhold resultatet med svaret fra spørgsmål b. og c. og diskuter temperaturens betydning for indholdet af de tre former af gips.

## Modul 2: Eksperimentelt arbejde

### Lektie til modulet

Din lærer vil fortælle dig, hvilke forsøg, du skal forberede dig til.

## Modul 3: Færdiggørelse af forsøg og mere om betonfremstilling

### Lektie til modulet

Medbring dine noter fra forsøget fra sidste lektion. Læs afsnit 3 om betonfremstilling, samt afsnit 4 om betonens armering s.11-15. Du skal ikke lave opgaverne. Dette gøres i timerne.

### 3. Materialer til betonfremstilling

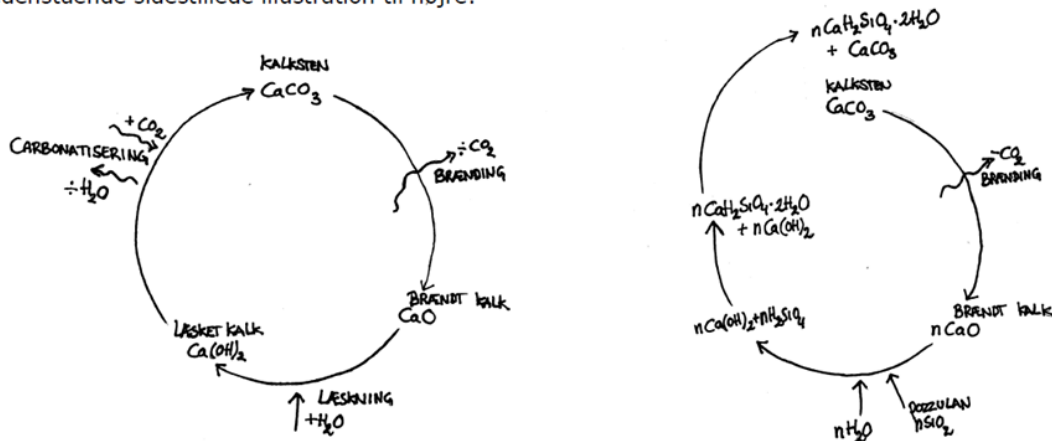
Selve betonen fremstilles ud fra cement tilsat forskellige materialer, kaldet tilslag. Et af disse materialer kan være flyveaske, hvis ikke cementen allerede indeholder dette. Flyveaske er fremkommet ved indfangning af aske fra kulfyring. Dette kan være fra kraftværker eller i forbindelse med kalkbrændingen og især sintringen, som foregår ved temperaturer på ca. 1300 °C. Flyveaske fra kul indeholder en stor mængde  $\text{SiO}_2$  samt  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

I takt med at kulfyring bliver udfaset og erstattet med biomasse (træpiller o.a.) kan der blive mangel på flyveaske. Der arbejdes dog med at bruge de depoter af flyveaske, som allerede eksisterer i forbrændingen af biomasse. Dette giver en bedre forbrænding og restproduktet af bio-kulflyveakse kan ligeledes benyttes i betonfremstillingen. En af flyveaskens egenskaber er at fungere som puzzolan. Det betyder, at det sammen med læsket kalk,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  får hydrauliske egenskaber: det størkner med vand. Figur 2 nedenfor illustrer forskellen på hærningen af den læskede kalk, hvis der kun er lufttilgang og ved tilsætning af et puzzolan.

Hvad er et puzzolan?

Et puzzolan er reaktivt med calciumhydroxid ved tilstedeværelse af vand, så der ved stuetemperatur dannes stoffer med hydrauliske egenskaber.

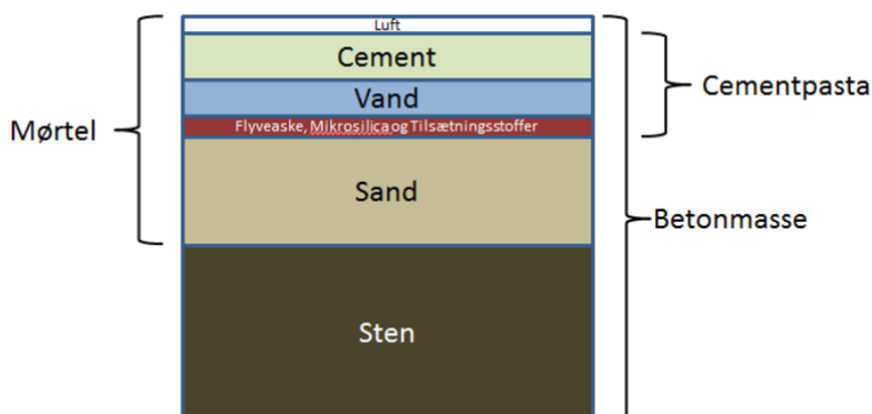
En lufthærdende kalk hærdner med kuldioxid, grafisk illustreret i nedenstående kalkcirkel til venstre i figuren (se i øvrigt betonhåndbogens kapitel 19.2). Ved tilsætning af et puzzolan vil hærdeningen ske med vand, se nedenstående sidestillede illustration til højre:



Figur 2: Puzzolan. Betegnelsen kommer af Puzzouli - en forstad til Napoli i det sydlige Italien, hvor askemateriale til betonstøbning findes. Fra "Betonhåndbogen, kapitel 1.2 Betonens historie":

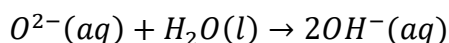
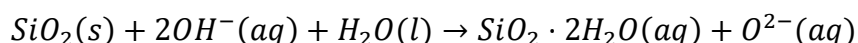
<https://betonhaandbogen.dk/>

Selvom cementen er vigtig i betonfremstillingen, vil man ofte ønske at bruge så lidt som muligt. Det skyldes dels, at cementen er dyr, dels at miljøbelastningen ved cementproduktionen er stor pga. den store CO<sub>2</sub>-udledning. Figur 3 nedenfor illustrer betonsammensætningen - i grove træk.

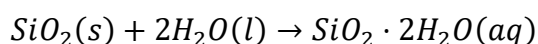


Figur 3: Model for sammensætningen af beton fra Betonhåndbogen kap. 6, <https://betonhaandbogen.dk/>

Andre tilslagsmaterialer, der ofte benyttes ved betonfremstillingen, indeholder  $\text{SiO}_2$ . Dette kan være porøse sten, sand eller mikrosilika, som er et biprodukt fra siliciumfremstilling. Motivationen for at tilsætte disse materialer er typisk at øge styrken og tætheden af den færdige beton. Man skal dog være opmærksom på, at  $\text{SiO}_2$ , når det findes på amorf form, (ikke-ordnet struktur) ved reaktion med calciumhydroxid vil nedsætte pH. En høj pH-værdi (pH= 11-13) er nødvendig for at beskytte armeringen mod rustdannelse. Reaktionerne som kan tænkes at forløbe er:



Samlet set kan reaktionen skrives som:



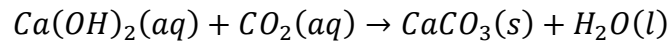
Hvis der tillige er alkali-ion-metaller som  $\text{Na}^+$  eller  $\text{K}^+$  opløst i porevæsken, det vil sige i mellemrummene mellem de faste stoffer i betonen, kan der dannes alkalisilikater som f.eks.  $\text{Na-SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Det er dannelsen af disse forbindelser, som får et større volumen end reaktanterne, der giver anledning til revnedannelse i betonen. Af denne grund er der ofte fokus på at reducere mængden af alkalimetaller i cement og tilslag. Desuden er der begrænsninger på, hvor meget af de typer af  $\text{SiO}_2$ -holdige materialer, som har et højt indhold af amorf siliciumdioxid, man må tilsætte betonen.

#### 4. Betonens armering, carbonatisering og chloridindholdets betydning for rustdannelse.

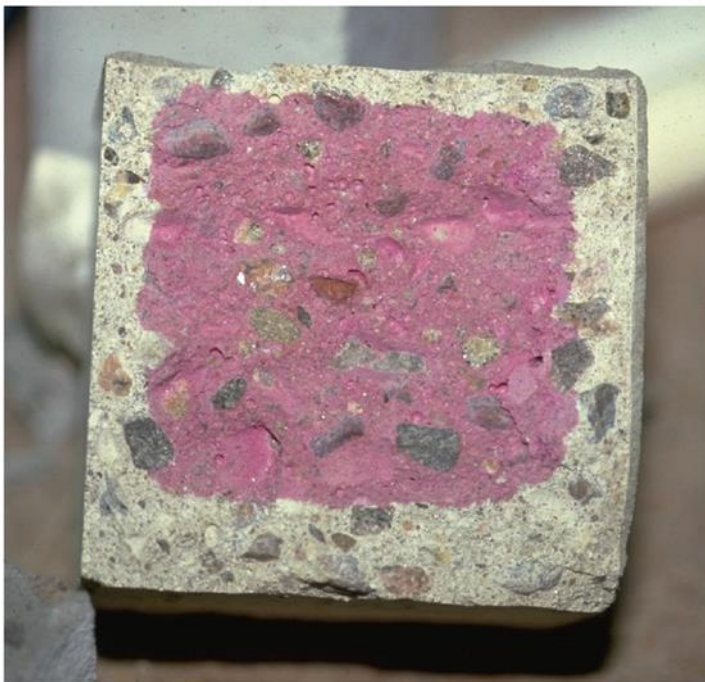
De fleste betonelementer er armeret, det vil sige indeholder en komponent af jern, for at give styrke til betonen. Dette kan være i tagkonstruktioner, i gulve og i elementer til broer. Da armeringen således er essentiel for betonkonstruktionens holdbarhed, er det vigtigt at undgå korrosion - rustdannelse.

Der er flere faktorer, som har betydning for korrosion af armeringen, herunder tilgængeligheden af dioxygen (ilt), samt graden af carbonatisering af betonen og det efterfølgende fald i porevæskens pH.

Carbonatisering er i princippet den modsatte proces af kalkbrændingen og læskningen - se figur 1, s. 5. Reaktionen som forløber er:



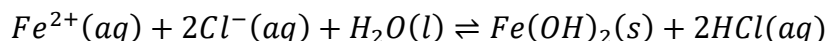
Korrosion af jern hæmmes ved høje pH-værdier, og da carbonatiseringen fjerner hydroxid fra porevæsken, vil indtrængende carbondioxid kunne øge korrosionshastigheden. Carbonatiseringen afhænger stærkt af betonens fugtindhold; på den ene side skal der være nok vand til at carbondioxid kan opløses, på den anden side vil der, hvis vandindholdet bliver for højt, ikke være en tilstrækkelig høj koncentration af carbondioxid til, at carbonatiseringen kan foregå. Figur 4 nedenfor illustrerer faldet i pH som følge af carbonatisering.



**Figur 4. Gennemskåret beton påført phenolphthalein - en syre-base indikator, som er pink pH-værdier over 10 og farveløs ved pH-værdier under 8,2 (figuren er fra Betonhåndbogen, kapitel 19.1: <https://betonhaandbogen.dk>)**

Derudover har chlorid-indholdet i porevæsken en stor betydning blandt andet for korrosion af armeringen. Af denne grund er der begrænsninger på det tilladte indhold af chlorid i cement og under fremstillingen af beton, skal man være opmærksom på andre kilder til chlorid, som eksempelvis procesvandet, som bruges til opblanding af cement med de øvrige materialer. Desuden kan sand, der er hentet fra kystnære områder indeholde store mængder chlorid, således at det er nødvendigt at vaske sandet inden det benyttes.

Hvis chlorider er til stede i porevæsken, vil der kunne forløbe følgende reaktion



Da jern(II)hydroxid er meget tungtopløseligt, vil reaktionen blive drevet af udfældningen af denne forbindelse.

### Opgave 5.

- Find, for eksempel ved brug af Databogen Fysik Kemi eller andet opslagsværk, en værdi for opløselighedsproduktet af jern(II)hydroxid.
- Beregn koncentrationen af hydroxid i en mættet opløsning af jern(II)hydroxid.
- Hvad kan pH-værdien højest være før der udfælder jern(II)hydroxid.

Når betonen skal fremstilles, gøres dette som nævnt tidligere enten på brugsstedet eller i betonblandere, som umiddelbart efter kører ud på brugsstedet. Hvis ikke der tilsættes gips til cementen vil hærdeningen foregå næsten øjeblikkeligt. Der er dog forskel på opløseligheden af de forskellige former af gips. I cementmøllen knuses klinker materialet sammen med gips og andet. Dette sker med mindre sten, som kører rundt sammen med materialet. Friktionen giver en betydelig opvarmning i cementmøllen. Naturgipsen vil derfor blive omdannet til calciumsulfat-hemihydrat, såfremt temperaturen når ca. 150°C. Det begynder at ske ved lavere temperaturer, men ud fra målinger har man på Aalborg Portland konstateret, at omdannelsen er fuldstændig ved denne temperatur. Anhydrit, CaSO<sub>4</sub>, dannes ved højere temperaturer end 150 °. Da det er vigtigt, at hver cementtype har den samme sammensætning hver gang, skal temperaturen i cementmøllen, som nævnt i kapitel 2, kontrolleres nøje.

### Opgave 6. Opløselighed og opløselighedsprodukt for gips

- Find i Databogen Fysik Kemi eller andet opslagsværk opløseligheden målt i g/100 ml vand af CaSO<sub>4</sub>·½H<sub>2</sub>O og af CaSO<sub>4</sub>.
- Beregn stofmængdekonzentrationen (i mol/L) af de to forbindelser (C)
- Opskriv opløselighedsreaktionen for de to former af gips og opskriv den tilhørende reaktionsbrøk (B og A)
- Beregn opløselighedsproduktet for calciumsulfat-semihydrat og for calciumsulfat-anhydrit. (B og A)



### Opgave 7: pH i beton

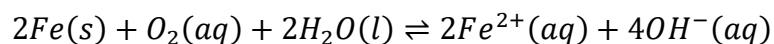
I figur 4, s. 14, ses processen og resultatet af carbonatiseringen af beton.

Når carbondioxid opløses i vand, dannes en smule carbonsyre (kulsyre).

- Opskriv reaktionsskemaet for reaktionen mellem carbondioxid og vand  
Carbonsyre er en svag syre og reagerer delvist med vand
- Opskriv reaktionen mellem carbonsyre og vand og brug denne reaktion til at forklare, hvorfor pH i porevæsken falder ved CO<sub>2</sub> indtrængning.
- Beregn den aktuelle koncentration af oxonium, [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>] ved pH = 8,2 og pH=10,0
- Beregn den aktuelle koncentration af hydroxid, [OH<sup>-</sup>], ved de samme pH-værdier.

### Rustdannelse i armeringen af betonen:

Rustdannelsen starter typisk med en oxidation af jern:



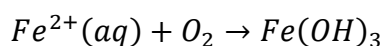
Efterfølgende er der flere mulige reaktioner, som alle involverer en yderligere oxidation af Jern(II), men hvor produktet afhænger af tilgængeligheden af opløst dioxygen samt pH-værdien af væsken omkring armeringen. Nogle mulige produkter er  $Fe(OOH)$ ,  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$  og  $Fe(OH)_3$

### Opgave 8: Rustdannelse

- Tildel oxidationstal for forbindelserne i oxidationen af jern ovenfor og redegør for, at redoxreaktionen er afstemt.
- Opskriv delreaktionerne for redoxreaktionen.

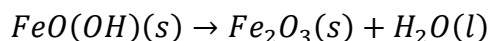
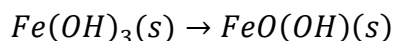
Rust er ikke én bestemt kemisk forbindelse, men kan blandt andre indeholde  $FeO(OH)$ ,  $Fe_2O_3$  og  $Fe(OH)_3$ . Hvilke samt den relative sammensætning afhænger af flere faktorer, herunder mængden af dioxygen tilstede samt af pH i væsken omkring armeringen.

- Færdiggør nedenstående reaktionsskemaer



(Redoxreaktion, basisk opløsning).

Hint: ikke al oxygen i jern(III)hydroxid kommer fra dioxygen



d. Hvilke af disse reaktioner kræver, at der er meget dioxygen til stede?

## Modul 4 og 5: Forberedelse til og gennemførelse af virksomhedsbesøg

### Aktiviteter før besøg - modul 4.

Undersøg, hvilken virksomhed I skal besøge og forbered besøget. Hvad vil I gerne vide noget om - eksempelvis:

- Hvordan arbejder virksomheden med bæredygtighed? (vandforbrug og genanvendelse), hvilke materialer anvendes i betonen osv.
- Er der bestemte krav til materialerne i lige netop den beton eller de betonelementer, som virksomheden fremstiller?
- Hvilken betydning har chlorid-indholdet i betonen for deres produkter – og hvordan håndterer de det?
- Hvem er deres kunder?
- Spørg - gerne på forhånd - om I må få en betonprøve med hjem. Det kan også være noget af den cement, de benytter. Sørg også for at få at vide hvilken type det - og om virksomheden kender chloridindholdet.

## **Modul 6: Bestemmelse af chloridindholdet i cement og beton.**

### **Lektie til modulet:**

Læs forsøgsvejledningen til forsøg 4: Bestemmelse af chloridindholdet i cement og beton.

## **Modul 7: Efterbehandling af virksomhedsbesøg og afrunding på forløbet.**

### **Lektie til modulet:**

Husk dine noter fra virksomhedsbesøget.

### **Opgave:**

I skal lave et lille produkt som afslutning på besøget. Det kan være en video, en poster eller en kort fremlæggelse af cirka 10 minutters varighed.

Produktet skal inddrage både svarene på de spørgsmål, som I har fået i forbindelse med virksomhedsbesøget, samt den viden om cement og beton, I har fået de sidste 4-5 moduler. Lidt inspiration kan være:

- Armering af beton - hvorfor er dette ofte nødvendigt og hvordan gøres det? Hvilke problemer kan der være i forbindelse med armeringen?
- Produktion af cement - hvordan gøres det? Hvilke råstoffer anvendes? Kan man forestille sig råstofmangel? Hvad gøres og hvad kan gøres for at undgå klimabelastning i forbindelse med cementproduktion
- Kemien i cement og beton; hvilke kemiske forbindelser findes i cement og i beton, kemiske formler, hvilke er nødvendige? Hvilke tilsætningsstoffer kan man bruge i betonen og med hvilket formål.

Fremlæg for hinanden i matrixgrupper, som I får præsenteret på dagen.

## Bilag 1: Eksperimentelt arbejde

### Forsøg 1: Kalkbrænding, læskning af kalk og carbonatprøve

#### Introduktion:

Kalkbrænding er centralt i produktionen af cement og dermed og af beton og mørtel.

I dette forsøg laves en kalkbrænding i en keramikovn eller anden ovn, hvor der kan opnås en temperatur på ca. 950 °C. Hvis der ikke mulighed for at benytte sådan en ovn, kan de efterfølgende forsøg fint laves med lidt vandfrit CaO (eller tørret CaO).

Den brændte kalk læskes - det vil sige opløses i vand, pH måles og varmeudviklingen bestemmes. Bemærk: da brændt kalk, CaO, er stærkt ætsende skal man undgå at indånde støv herfra. Benyt desuden sikkerhedsbriller. Kommer noget på huden, så skyl længe med rent vand.

#### Materialer og kemikalier:

Materialer:	Kemikalier:
Keramikovn eller tilsvarende	CaCO <sub>3</sub>
Porcelænsdigel eller porcelænsskål med låg	HCl 1M
Vægt (0,01 g nøjagtighed)	CaO
Reagensglas	Demineraliseret vand
Digeltang	
pH-elektrode eller indikatorpapir	
termometer	
Plastpipette	
Flamingobæger med låg	
Morter og pistil	

### Del 1. Kalkbrænding (kan udelades)

Udførelse:

- Afvej en stor porcelænsdigel eller en skål med 0,01g nøjagtighed, noter massen af diglen:
- Fyld diglen ca. halvt op med  $\text{CaCO}_3$  og vej den igen, noter masse af digel med indhold:
- Placér diglen i ovnen og tænd ovnen - sæt temperaturen på  $900^\circ\text{C}$
- Lad digel med indhold stå i ovnen i ca. 8 timer og sluk herefter for ovnen
- Når ovnen er nogenlunde afkølet, tages diglen ud (brug digeltang), og den afkøles med låg til omkring stuetemperatur.
- Tag låget af og vej igen digel med indhold, noter massen:

### Del 2. Carbonatprøve

Udførelse:

- Knus evt. 1-2 gram  $\text{CaO}$  i en morter. Undgå at indånde støv, så gør det under sug.
- Overfør en spatelfuld af den brændte kalk (eller noget tørt  $\text{CaO}$ ) til et reagensglas.
- Tilsæt ca. 1 ml 1M  $\text{HCl}$  og noter iagttagelser:
- Gentag punkt a og b med en spatelfuld knust kalk

### Del 3. Læsket kalk

Udførelse:

- Knus i en morter noget brændt kalk og afvej 0,1 gram heraf.
- Afmål 100 ml demineraliseret vand og overfør det til et flamingobæger.
- Mål temperaturen af vandet:  $T_{\text{start}}$
- Mål pH-værdien af vandet og notér den.
- Hæld det brændte kalk fra a. i vandet, rør grundigt og sæt et låg på med termometer igennem låget. Rør lidt og hold øje med temperaturen, noter den højeste temperatur, der nås indtil al  $\text{CaO}$  er opløst.
- Mål pH-værdien af opløsningen og noter den:

## Databehandling.

### Del 1. Kalkbrænding

A. Beregn massen af den afvejede kalk (kridt) og indsæt den i nedenstående skema.

	CaCO <sub>3</sub> (s)	→	CaO(s)	CO <sub>2</sub> (g)
Masse m	g		g	g
Molarmasse, M	g/mol		g/mol	g/mol
Stofmængde, n	mol		mol	mol

- B. Udfyld resten af skemaet ovenfor - altså beregn først molarmasserne ved opslag i det periodiske system, herefter stofmængden af kridt, stofmængden af CaO samt CO<sub>2</sub> og til sidst massen af CaO
- C. Beregn massen af rest-produktet og sammenlign med den teoretiske masse af CaO.

### Del 2. Carbonatprøve.

- A. Hvad observerer I, når den brændte kalk overhældes med HCl?
- B. Hvad observerer I, når kridtet overhældes med HCl?
- C. Prøv at forklare jeres observationer med et reaktionsskema, som I afstemmer.
- D. Hvorfor tror I, at denne prøve kaldes en carbonatprøve?

### Del 3. Læsket kalk

- A. Stiger eller falder temperaturen, når I tilsætter den brændte kalk til vandet? Hvis temperaturen stiger, er der afgivet varme til omgivelserne (vandet) og reaktionen kaldes exo-term, hvis temperaturen falder, er der optaget varme og reaktionen siges at være endo-term.
- B. Er der tale om en sur eller basisk reaktion?
- C. Opskriv den reaktion, som giver anledning til pH-ændringen.

## Forsøg 2: Opvarmning og omdannelse af gips

### Introduktion:

Calciumsulfat findes i forskellige former med varierende mængder af krystalvand; naturgips, calciumsulfatdihydrat,  $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ , som omdannes ved opvarmning ved temperaturer mellem 85°C og ca. 110°C til hemihydratet,  $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ . Opvarmes ved højere temperaturer - det sige over 150°C fås calciumsulfat-anhydrit,  $CaSO_4$ .

Under knusningen af den brændte kalk med naturgips, opvarmes blandingen, og der dannes varierende mængder af de forskellige former af calciumsulfat. De forskellige former af gips har forskellige opløseligheder i vand og opløses med forskellig hastighed.

### Formål:

Vi skal i dette forsøg opvarme calciumsulfatdihydrat ved to forskellige temperaturer og undersøge om, vi kan påvise omdannelserne fra dihydratet til henholdsvis hemihydratet og anhydrit.

Vi skal desuden undersøge opløselighederne af de forskellige gipsformer.

### Kemikalier og apparatur:

Gips - calciumsulfatdihydrat, ionbyttet vand

Porcelænsdigler, digeltang, vægt med 0,01 grams nøjagtighed

### Udførelse:

Indstil to ovne på 95°C hhv. 160°C og placer en rengjort porcelænsdigel i hver. Når ovnen er varmet op, skal diglen stå i yderligere 20 minutter, hvorefter den tages ud (brug en digeltang). Afkøl diglen, så I kan røre ved den og vej den herefter. Notér massen i skema 1.

Fyld nu diglen ca. 2/3 op med calciumsulfatdihydrat og vej den igen, massen noteres ligeledes i skema 1.

Sæt diglen/diglerne tilbage i ovnen, og lad dem stå natten over eller minimum 5-6 timer.

Tag de varme digler ud, lad dem afkøle og vej dem igen. Noter massen/masserne i skema 1.



**Skema 1. Resultater fra afvejning.**

Temperatur:		Temperatur:	
Masse af tom digel		Masse af tom digel	
Masse af digel + gips (før opvarmning)		Masse af digel + gips (før opvarmning)	
Masse af digel + gips (efter opvarmning)		Masse af digel + gips (efter opvarmning)	

**Efterbehandling:**

- Opskriv afstemte reaktionsskemaer for de to omdannelser, som antages at finde sted - det vil sige omdannelsen af calciumsulfatdihydrat til calciumsulfathemihydrat og omdannelsen af calciumsulfatdihydrat til calciumsulfatanhydrit
- Beregn massen af calciumsulfatdihydrat før opvarmning.
- Beregn stofmængden af calciumsulfatdihydrat
- Brug de afstemte reaktionsskemaer til at finde stofmængderne af calciumsulfathemihydrat samt calciumsulfatanhydrit og derefter beregne masserne af de to stoffer,
- Bestem nu massen af restproduktet i hver af de to digler. Sammenlign med masserne beregnet i d. Kommentér på evt. afvigelser. Hvad kan de skyldes?

### Forsøg 3: Calciumhydroxids opløselighed og opløselighedsprodukt

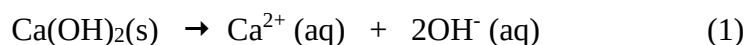
**Formålet** med forsøget er dels at bestemme calciumhydroxids opløselighedsprodukt, dels at finde opløseligheden af calciumhydroxid i demineraliseret vand og i en vandig opløsning af calciumchlorid.

#### Introduktion og teori:

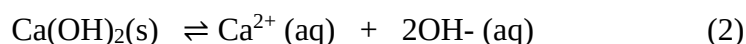
Vi fremstiller to opløsninger af calciumhydroxid:

- En mættet opløsning af calciumhydroxid i demineraliseret vand
- En mættet opløsning af calciumhydroxid i en 0,010M CaCl<sub>2</sub>

Når calciumhydroxid opløses i vand, forløber følgende reaktion:



Der anvendes overskud af calciumhydroxid og demineraliseret vand. Efter nogen tid bliver opløsningen mættet, dvs. systemet kommer i ligevægt:

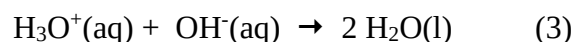


Nu har den mættede opløsning kontakt med det faste stof af calciumhydroxid.

Ved ligevægt er ionproduktet for calciumhydroxid lig med stoffets opløselighedsprodukt.

$$[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{OH}^{-}]^2 = K_{\text{op}} \text{ ved ligevægt}$$

Vi kan bestemme koncentrationen af OH<sup>-</sup> i opløsningen ved at titrere med en HCl opløsning:



Hvis opløsningen kun indeholder Ca(OH)<sub>2</sub>, kan vi ud fra reaktion (1) finde [Ca<sup>2+</sup>], når vi har målt [OH<sup>-</sup>], hvorefter vi kan beregne ionproduktet:

$$I = [\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{OH}^{-}]^2$$

Såfremt, der er tale om en mættet opløsning er ionproduktet lig med opløselighedsproduktet.

Vi kan desuden bestemme opløseligheden, der er defineret som det antal gram  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , der kan opløses pr. 100 mL vand.

Hvis opløsningen ud over  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  indeholder calciumchlorid, skal vi tage højde for dette ved at addere bidraget fra  $\text{CaCl}_2$  for at få den samlede koncentration af  $\text{Ca}^{2+}$ . Opløselighedsproduktet bør være det samme som i rent vand, da der er tale om en ligevægtskonstant, hvorimod opløseligheden må forventes at være mindre.

#### Apparatur:

Vægt, 100 mL måleglas, 250 mL og 500mL konisk kolbe, magnetomrører, magnetpind, tragt, filtrerpapir, burette og stativ.

#### Kemikalier:

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 0,100M HCl og bromthymolblåt,  $\text{CaCl}_2$  i vandig opløsning 0,010 M

#### Ekspérimentelt:

- 3g calciumhydroxid og 400 mL demineraliseret vand (stuetemperatur) blandes i en 500 mL kolbe en dag eller to inden forsøget. Denne opløsning markeres med "opløsning 1". Læg en magnetpind i kolben og placér kolben på en magnetomrører - lad kolben stå under svag omrøring i 1-2 dage
- 3g calciumhydroxid og 400 mL 0,010M  $\text{CaCl}_2$  (stuetemperatur) blandes i en 500 mL kolbe en dag eller to inden forsøget. Denne opløsning markeres med "opløsning 2". Læg en magnetpind i kolben og placer kolben på en magnetomrører - lad kolben stå under svag omrøring i 1-2 dage

Der udføres nedenstående med både opløsning 1 og opløsning 2:

En tragt med et foldet filtrerpapir placeres i et 100 mL måleglas. Noget af reaktionsblandingen hældes op i tragten. De første 20 mL af filtratet kasseres idet såvel papir og glasvarer binder nogle af ionerne.

Derefter opsamles præcis 50 mL, hvorefter tragten anbringes oven i kolben.

Den udtagne prøve (filtratet) hældes i en 250 mL kolbe. Derefter genoptages filtreringen af en ny prøve ved igen at filtrere præcis 50 mL over i måleglasset. Man skal bruge samme filtrerpapir under hele forsøget, selvom filtreringen bliver langsommere og langsommere.

- Burette med 0,100M HCl opstilles.

Mens prøve nr. 2 opsamles i måleglasset titreres prøve nr. 1 med 0,100M HCl med bromthymolblåt som indikator. I ækvivalenspunktet skifter farven fra blå til gul. Som sædvanlig forsøges bestemmes ækvivalenspunktet med én dråbes nøjagtighed. Notér det tilsatte volumen i skemaet. Foretag 3-4 titreringer og rens kolben med demineraliseret vand mellem titreringerne.

Resultatskema (opløsning 1):

Prøve nr.	Volumen 0,100M HCl	[OH <sup>-</sup> ]	[Ca <sup>2+</sup> ]	[Ca <sup>2+</sup> ] $\cdot$ [OH <sup>-</sup> ] <sup>2</sup>
1				
2				
3				
4				

Resultatskema (opløsning 2)

Prøve nr.	Volumen 0,100M HCl	[OH <sup>-</sup> ]	[Ca <sup>2+</sup> ]	[Ca <sup>2+</sup> ] $\cdot$ [OH <sup>-</sup> ] <sup>2</sup>
1				
2				
3				
4				

**Efterbehandling - opløsning 1:**

1. Anvend titrerresultaterne til at beregne  $[\text{OH}^-]$  i de udtagne prøver og indsæt disse i skemaet ovenfor.
2. Opløsningen består af calciumhydroxid og rent vand. Beregn nu  $[\text{Ca}^{2+}]$ . Husk ækvivalensforholdet. Notér i skemaet.
3. Beregn ionproduktet. Sammenlign med tabelværdi.
4. På grundlag af forsøgsresultaterne skal man angive en værdi for opløseligheden af calciumhydroxid ved stuetemperatur. Opløseligheden angives både i mol pr. liter og i g pr. 100 mL
5. Hvorfor skal opløsningen filtreres, inden man titrerer med saltsyre?
6. Hvilken betydning kan det have fået for forsøgsresultaterne, hvis man var påbegyndt filtrering og titrering umiddelbart efter, man havde blandet stoffet med vandet?

**Efterbehandling - opløsning 2:**

1. Anvend titrerresultaterne til at beregne  $[\text{OH}^-]$  i de udtagne prøver. Indsæt i skema ovenfor.
2. Opløsningen består af calciumhydroxid og rent vand. Beregn nu  $[\text{Ca}^{2+}]$ . Husk at tage hensyn til, at opløsningen allerede indeholder 0,010M  $\text{CaCl}_2$ . Indsæt værdierne i skemaet
3. Beregn ionproduktet. Sammenlign med tabelværdi.
4. På grundlag af forsøgsresultaterne skal man angive en værdi for opløseligheden af calciumhydroxid i  $\text{CaCl}_2$  ved stuetemperatur. Opløseligheden angives både i mol pr. liter og i g pr. 100 mL
5. Sammenlign værdierne for ionproduktet og opløseligheden med dem for rent vand og kommentér:

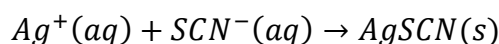
## Forsøg 4. Bestemmelse af chloridindholdet i beton.

### Indledning

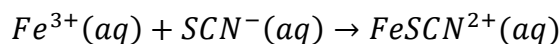
Metoden, der er beskrevet i denne vejledning, benyttes med nogle få modifikationer til at bestemme indholdet af chlorider, bromider og iodider i beton, cement og i procesvand fra beton- og cementproduktionen. Indholdet af disse ioner, primært chlorid har betydning for betonens egenskaber. Frie chlorider øger risikoen for rustdannelse af armeret beton.

Princippet i forsøget bygger på, at chlorider, bromider og iodider fældes med et overskud af sølvnitrat, som herefter tilbagesitreres med thiocyanat med jern(III) som indikator.

Titreringsreaktionen er:



Når alle sølv(I)ioner er opbrugt, vil der ved yderligere tilsætning af thiocyanat dannes det mørkerøde jern(III)thiocyanat kompleks;



I industrien arbejdes ofte med en kontrolprøve, som ikke indeholder beton. Dette er ikke gjort i denne vejledning.

### Apparatur

### Kemikalier

Burette 25 ml	Beton, cement eller procesvandsprøve.
Stativ	AgNO <sub>3</sub> 0,1 M
Buretteklemme	KSCN 0,1 M eller NH <sub>4</sub> SCN 0,1 M
Konisk kolbe 250 ml	Nonan-1-ol
Hammer/morter	Konc. salpetersyre

Magnetomrører	Indikator: $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ mættet opløsning i salpetersyre 1% alternativt $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ i salpetersyre.
Magnetpind	
Filterpapir	
Tragt til filtrering	

### Forsøgsudførelse:

#### 1. Forberedelse af betonprøve

Betonen tørres i op til 4 timer på  $105^\circ\text{C}$  i varmeskab. Betonens anses for at være tør, når massen af betonen er konstant med et udsving på 0,1%.

Betonen knuses til en kornstørrelse på ca. 2 mm - her kan man bruge en hammer til det grove og efterfølgende en morter. Der udtages ca. 15 gram knust beton til den videre prøvebehandling. Noter massen med en nøjagtighed på mindst 0,01 g. Hvis der laves analyser på cement og ikke beton, skal den blot afvejes.

#### 2. Behandling af betonprøve

Overfør analyse materialet (beton eller cement) fuldstændigt til en 250 ml konisk kolbe. Om nødvendigt skylles efter med en smule demineraliseret vand - i alt ca. 50 ml.

Placér kolben i stinkskalet.

Tag handsker på, afmål 10 ml konc. salpetersyre, der overføres til den koniske kolbe. (få evt. jeres lærer til at gøre dette). Ryst kolben forsigtigt, så indholdet blandes godt. Tag handskerne af og kassér dem. Lad kolben stå, indtil den er afkølet til stuetemperatur.

Tag et par nye handsker på tilsæt yderligere konc. salpetersyre 1 ml ad gangen med en plastpipette indtil, der ikke er mere gasudvikling. Vent lidt mellem hver tilsætning.

Nu filtreres den opløste prøve. Fold et filterpapir, så det passer til den anvendte tragt og placér det heri.



Fugt papiret med lidt fortyndet salpetersyre og filtrer opløsningen over i en ren konisk kolbe, vask filteret med fortyndet salpetersyre. Fjern tragten fra den konisk kolbe og tilsæt demineraliseret vand, så det samlede volumen er ca. 100 ml.

### 3. Fældning og titrering

Gør to buretter klar - det vil sige fyld og nulstil dem; den ene skal indeholde  $\text{AgNO}_3$  0,100M og den anden ammoniumthiocyanat (eller kaliumthiocyanat)

Tilsæt ca. 20 ml sølvnitrat indtil der ikke dannes mere bundfald. Notér det tilsatte volumen af sølvnitrat.

Tilsæt herefter 2-3 ml nonal-1-ol (brug plastpipette)

Tilsæt 1 ml ammoniumjern(III)sulfatopløsning og ryst. Sølvchlorid bør nu bundfældes helt.

Nu titreres under omrøring med thiocyanatopløsning indtil et blivende rødlig farve. Omkring ækvivalenspunktet - når farven kun skifter langsomt - tilsættes 1 dråbe titrator ad gangen.

Det tilsatte volumen af thiocyanatopløsning noteres.

#### Databehandling:

1. Beregn stofmængden af den tilsatte sølvnitrat benyttet til fældningen ved brug af det tilsatte volumen, samt den kendte koncentration af sølvnitrat.
2. Beregn stofmængden af tilsat thiocyanat ud fra det tilsatte volumen af  $\text{KSCN}$  (eller  $\text{NH}_4\text{SCN}$ ), samt den kendte koncentration.
3. Overskuddet af sølvnitrat, det vil sige den mængde af sølvnitrat, der ikke er brugt til fældningen af chlorider, er den samme som den tilsatte stofmængde af thiocyanat. Hvorfor er dette tilfældet?
4. Beregn nu den stofmængde af sølvnitrat, som er blevet brugt til at fælde chlorider - og evt. andre halogener. Opskriv fældningsreaktionen og argumentér for, at stofmængden af sølvnitrat er den samme som stofmængden af halogener (hovedsageligt chlorider).
5. Beregn massen af chlorid i betonen/cementen og herefter masseprocenten.
6. Sammenlign masseprocenten med den forventede ud fra de oplysninger, I har fået fra leverandøren.

## Bilag 2: Svarbazar til brug i modul 3.

SvarBazar - cement og beton.

Gå rundt til hinanden i klassen. Få og giv svar på nedenstående spørgsmål. Skriv navnet på svarene i sidste kolonne. Du kan sagtens stille flere det samme spørgsmål - måske får du et andet svar eller får uddybet et svar 😊

SPØRGSMÅL	SVAR	NAVN
Hvad er den vigtigste kemiske forbindelse i cement? Navn og kemisk formel.		
Hvad omdannes kalken til under brændingen - hjælp med et reaktionsskema.		
Hvorfor skal der også være gips i cement?		

<p>I cement- og betonbranchen bruges rigtig mange fagudtryk, som det kan være nyttigt at kende til - herunder hemihydrat og anhydrit; hvad dækker disse betegnelser over?</p>		
<p>Hvad er et puzzolan?</p>		
<p>Hvad betyder carbonatisering? Her må du gerne bede om reaktionsskemaer.</p>		
<p>Hvis du blander cement med vand og tilsætter f.eks. sten og sand - hvad får du så?</p>		

Tilslag - hvad er det nu det er?		
Der er nogle ioner, som er særligt problematiske i beton - hvilke og hvorfor?		
Hvad er pH typisk i porevæsken på beton?		
Hvorfor armeres rigtigt meget beton?		

<p>Hvorfor kan en udpræget grad af carbonatisering betyde, at armeringen lettere ruster?</p>		
<p>Hvad sker der - rent kemisk - når armeringen ruster?</p>		
<p>Sidst men ikke mindst, hvad er problemet med cementfremstillingen?</p> <p>Og hvad kan man gøre ved det?</p>		