

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgave 2016
30 stp

Pulver fra brannslukningsapparat som erstatning for sement i betong

Powder from fire extinguisher as a substitute for
cement in concrete

Sara Kikowska

Forord

Bakgrunnen for valg av oppgave er en kassetur til betongfabrikken Contiga i Moss. Der ble jeg inspirert av betong som materialet. Betong er spennende både med tanke på byggeteknikk og arkitektur. Mange av betongens egenskaper avhenger av hva den består av og herdeforhold, dermed kan vi mennesker, i stor grad påvirke betongens kvaliteter.

Oppgaven handler om å erstatte en del sementmengde i betongen med pulveret fra kasserte brannslukningsapparater. En slik oppgave virker veldig spennende fordi det er en mulighet til å revolusjonere betongen. Samtidig er det et miljøperspektiv i det å resirkulere pulver fra kasserte apparater, noe som allerede er en utfordring for bransjen. Oppgaven er også praktisk. Man må selv blande betongen og utføre tester for slump og fasthet. Praktiske oppgaver er alltid lærerike, og hjelper oss sivilingeniører, som kun har hatt teori på universitetet, få liten smakebit hvordan det er å jobbe fysisk ute på byggeplass.

Arbeidet i laboratoriet gikk ikke etter mine forventninger pga. sterk ammoniakklukt ved betongstøping, størkningsretarderende egenskaper til pulveret (forlenget størkningstiden i startfasen) og betydelig lavere fasthet i betongen som inneholdt pulveret. Ammoniakklukten kom overraskende, siden slik lukt oppstår ikke ved blanding av vanlig betong. Det var ingenting man kunne gjøre for å dempe lukten, bortsett fra å sørge for god ventilasjon. Den størkningsretarderende effekten var også ikke forventet fordi vanlig betong størkner etter 24 timer og kan tas ut av formen da. Betongen med pulveret størknet saktere enn vanlig betong, selv om temperatur i rommet var ca. 20° og alt ble utført i følge prosedyren. Jeg forventet at trykkfastheten skulle bli høyere enn trykkfastheten til vanlig betong, ellers ville jeg ikke ha begynt på denne oppgaven.

Jeg vil takke Einar Nathan og Iain Miller for hjelp med oppgaven, Yngve Stenstrøm for hjelp med kjemien og familien min for hjelp med prøver og tester i laboratoriet.

.....
Sara Kikowska

Sara Kikowska

10.05.2016

Sammendrag

Hensikten med denne oppgaven er å se om egenskapene til betong forandres når man erstatter sementen i betongen med pulver fra brannslukningsapparater. Betong er et materialet som var og blir brukt i bygg- og anleggsbransjen. Det er et veldig holdbart materiale. Brannpulveret er et problem for den bransjen som driver med kassering av brannslukningsapparater. Noe av pulveret blir brukt til brannøvelser, men en betydelig del av brannpulveret blir deponert, brukt som fyllmasse eller forblir liggende ubrukt. Pulveret er ikke regnet som farlig avfall i dag, men ingen vet hvilket konsekvenser dette har for miljøet i ettertid. Av denne grunn hadde det vært hensiktsmessig å erstatte sementen med brannpulveret i betongen og gjenbruke pulveret.

Problemstillingen er hvordan betong påvirkes ved innblanding av pulver fra kasserte brannslukningsapparater, med tanke på slump og fasthet. Hovedoppgaven er å sammenligne rent B30 betong med B30 betong hvor brannpulver erstatter henholdsvis 5%, 10%, 15% og 20% av sementen. Den praktiske delen av oppgaven består av betongstøping, slumpmåling og trykk- og strekkprøving etter henholdsvis 2, 7, 28, 56 og 91 dager.

Hvor sterk betongen blir avhenger, først og fremst av bindemiddelet som oppstår når sementen blandes med vann. Når sementen erstattes med pulver fra kasserte brannslukningsapparater blir bindemiddelet ødelagt og omdannet til ettringitt og forbindelser som ikke er bindende. Reaksjonene som oppstår mellom pulveret, sementen og vannet resulterer i dannelse av ammoniakk-gass, vann, syrer, sulfater, og fosfater i form av salter. Dette fører til at fastheten blir betraktelig mindre, størkningen tar lengere tid, slumpen blir større og v/c-tallet øker. Tidligfasthet utgjør kun 7% av tidligfastheten til vanlig betong. Etter 28 dager er fastheten til betong med 5% pulver, 95% av fastheten til vanlig betong, mens resten utgjør kun 40 %. I tillegg er ammoniakklukten under blandingen av betongen veldig ubehagelig, og svir i øynene, nese og munn.

På bakgrunn av overstående kan man konkludere med at pulveret påvirker betongen på en negativt måte og gjør at gjenbruk av pulveret i vanlig betong, laget av Portlandsement, ikke har noen hensikt. Selv om 5% ikke har så stor negativ påvirkning i denne oppgaven, er det risikabelt å tilsette noe som kan reagere med sementen på så mange måter og muliggjør nedbryting av betong.

Abstract

The purpose of this report is to see if the properties of the concrete are changed after a replacement cement in concrete with fire powder. Concrete is a material that was, is, and will be used in the construction industry. This is a very durable material.

The powder from the fire extinguisher is a problem for the industry engaged in disposal of fire extinguishers. Some of the powder is used for fire drills, but a significantly large portion fire powder is also deposited, used as landfill or is only stored unused. The powder is not considered hazardous waste today, but no one knows what consequences this has for the environment in retrospect. So it would be appropriate to replace the cement with fire powder in concrete while reusing the powder.

The issue is how concrete is influenced by mixing powder from discarded fire extinguishers, considering the slump and strength. The main task is to compare clean B30 concrete (0% fire powder) with B30 concrete where fire powder replaces respectively 5%, 10%, 15% and 20% of cement. The practical part of the thesis consists of mixing concrete, slump test, pressure and tensile testing after 2, 7, 28, 56 and 91 days.

How strong the concrete is depends primarily on the lime-based pasta, which occurs when the cement is mixed with water. When the cement is replaced with powder from discarded fire extinguishers, pasta is being destroyed and converted into ettringite and compounds which are not binding. The reactions that occur between powder, cement and water results in the formation of ammonia gas, water, acids, sulfates and phosphates in the form of salts. This causes that the strength becomes considerably lower, solidification takes longer time, slump is larger and water-to-cement ratio increases. Early strength represents only 7% of the early strength of ordinary concrete, while the 28-days strength of concrete with 5% powder represents 95% of the strength of ordinary concrete, while the rest represents only 40%. In addition, ammonia smell during mixing of the concrete and is very uncomfortable and irritates eyes, nose and mouth.

The conclusion is that the powder affects the concrete in a negative way. Reuse of the powder in conventional concrete, made of Portland cement, is without purpose. Although 5% did not have a negative influence in this task, it is risky to add anything that might react with the cement in so many ways and enabling degradation of concrete.

Innholdsfortegnelse

Forord	1
Sammendrag	2
Abstract.....	3
Innholdsfortegnelse	4
1 Innledning.....	7
1.1 Bakgrunn	7
1.2 Problemstilling.....	8
1.3 Mål og omfang.....	8
2 Teori.....	9
2.1 Betong.....	9
2.1.1 Betongens historie.....	10
2.1.2 Sement	10
2.1.3 Tilslag	12
2.1.4 Tilsetningsstoffer	16
2.2 Fersk betong - delmaterialets innvirkning på betongen.....	19
2.2.1 Støpelighet.....	19
2.2.2 Herding	24
2.3 Herdet betong	28
2.3.1 Mekaniske egenskaper.....	28
2.3.2 Bestandighet.....	34
2.4 Pulver.....	39
2.5 Skadelige kjemiske reaksjoner for betongen	41
2.5.1 Generelt om kjemiske reaksjoner i betongen	41
2.5.2 Sulfat- nitratangrep	45
2.5.3 Syreangrep	46
2.5.4 Økt v/c-tall	46
3 Laboratoriearbeid.....	47
3.1 Innledning.....	47
3.2 Siktekurver	47
3.2.1 Hensikt.....	47
3.2.2 Utstyr	48
3.2.3 Prosedyre.....	48

3.3	Betongstøping	49
3.3.1	Betongresepter.....	49
3.3.2	Utstyr	50
3.3.3	Prosedyre.....	51
3.3.4	Kommentar	53
3.4	Fersk betong – slumpmåling	54
3.4.1	Hensikt.....	54
3.4.2	Utstyr	54
3.4.3	Prosedyre.....	55
3.5	Herdnet betong – trykk- og strekkprøving	56
3.5.1	Hensikt.....	56
3.5.2	Utstyr	56
3.5.3	Prosedyre.....	56
3.6	Kjemidel	57
3.6.1	Hensikt.....	57
3.6.2	Metode	57
4	Resultater	58
4.1	Betongstøping	58
4.2	Slump	59
4.3	Trykkfasthet - Case1	60
4.4	Trykkfasthet - Case 2	60
4.5	Trykkfasthet - Case 3	61
4.6	Trykkfasthet - Case 4	61
4.7	Trykkfasthet - Case 5	62
4.8	Trykkfasthet - Case 6	62
4.9	Trykkfasthet - Case 7	63
4.10	Trykkfasthet - Case 8	63
4.11	2 dagers trykkfasthet	64
4.12	7 dagers trykkfasthet	64
4.13	28 dagers trykkfasthet	65
4.14	56 dagers trykkfasthet	65
4.15	91 dagers trykkfasthet	66
4.16	Strekkfasthet	67
4.17	Bilder	68
5	Diskusjon	69

6	Konklusjon	73
7	Videre arbeid	74
8	Referanser	75
9	Figurliste	77
10	Tabelliste	79
11	Vedlegg	80
11.1	Vedlegg 1 - Blanderesept	80
11.2	Vedlegg 2 - Siktekurve	82
11.3	Vedlegg 3 - Resultater	83
11.4	Vedlegg 4 - E-post fra Iain Miller	86

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Bedriftene som driver med kassering av brannslukningsapparater har fortiden et stort problem. Paragraf 5-2, i forskriften om brannforebyggende tiltak og brannsyn fra 5.juli 1990, laget av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, sier at alle boliger skal ha manuell slukningsutstyr tilgjengelig ved eventuell brann. Brannslukningsapparatet skal kontrolleres etter 5 år og skal til service etter 10 år. Dette utføres av sertifiserte bedrifter. Ved servicen er det selve apparatet som blir kontrollert, og det er først når det er noe galt med apparatet at pulveret skal kastes. Hvis apparatet ikke har noen feil eller mangler, føres samme pulveret tilbake til apparatet.

En utfordring er at veldig få er villig til å finne et sertifisert firma og betale for kontroll eller service. De kjøper heller et nytt, billig brannslukningsapparat, som er lett tilgjengelig. Gamle apparater leveres på en gjenvinningsstasjon, i butikker eller til sertifiserte firmaer som er pliktig til å ta imot disse. Resultatet er at mye pulver lagres ubrukt. Noe av pulveret brukes til brannøvelser, men det utgjør kun en liten andel av det ubrukte pulveret. Pulveret som blir gjenvunnet blir brukt i fyllmasser, men for mye av stoffet kan føre til overgjødning og dermed kan noen organismer streve med å overleve både i jord og vann.

Hvis brannpulveret kunne brukes til å forbedre egenskapene til betongen hadde det blitt et mindre problem for bransjen som kasserer brannslukningsapparater.

1.2 Problemstilling

Ved å erstatte en del av sementmengden med pulveret, vil man først og fremst undersøke slumpen, trykkfastheten og eventuelt strekkfastheten til betongen for å vurdere hvilke konsekvenser dette har på betongens kvaliteter. Hvis dette viser seg å forbedre disse egenskapene, kan man i tillegg undersøke flere egenskaper som densitet, luftinnhold, temperaturutvikling, osv. Problemstillingen i denne rapporten består av en hovedproblemstilling og tre underproblemstillinger:

Hvordan påvirkes betongen ved innblanding av pulveret fra kasserte brannslukningsapparater?

Blir slumpen påvirket av pulveret?

Hvordan blir fastheten til betongen ved innblanding av pulveret?

Oppstår det øvrige karakteristiske egenskaper i betongen?

1.3 Mål og omfang

Målet med oppgaven er å undersøke om delvis erstatning av sementen med brannpulver kan føre til sterkere bindemiddel, dermed mer trykkfast betong, og om pulveret endrer slumpen til betongen. Sementen blir erstattet med henholdsvis 5, 10, 15 og 20% pulver, men omhandler ikke pulveret som tilsetningsstoff i betongen som sådan. Egenskapene som undersøkes i denne oppgaven er betongens konsistens, trykkfasthet og strekkfasthet. Metoder som blir brukt til å undersøke disse egenskapene er slummåling, trykkprøving og strekkprøving. Mesteparten av undersøkelsene skal foregå på NMBU sitt betonglaboratoriet. Men fordi trykkprøvingmaskinen på NMBU er gammel, blir to betongprøver trykket på Høgskolen i Østfold for å se hvordan nyere trykkprøvingmaskin fungerer.

2 Teori

2.1 Betong

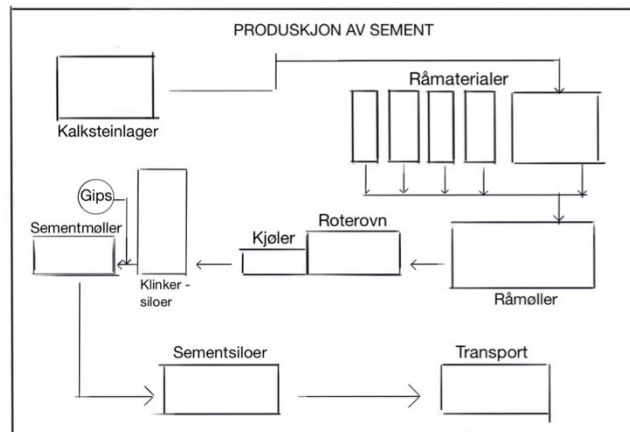
Betong består av sement, vann, tilslag og tilsetningsstoffer. Sement blandet med vann danner bindemidlet i betongen og fyller hulrommene mellom tilslaget som består av sand og pukk med gitte kornstørrelser. I våre dager brukes betong til bygg som bolig, kontorer og industri, men også til bruer, tunneler, plattformer og flyplasser. Materialet har blitt veldig populært som en del av arkitekturen og interiøret. I dag vil mange bygge hus av betong hvor rå betongvegger er synlig både utvendig og innvendig. Alt tyder på at betong også vil bli mye brukt i fremtiden. Formen avhenger av forskalingen som betongen fylles i. Det gjør materialet populært blant arkitekter, som stadig er ute etter nye, spennende former på bygg. Betong er et veldig sterkt materialet som trenger lite vedlikehold og er veldig holdbar. I dag dimensjoneres betong for 100 år. Dette gjør at betongen har en miljøvennlig side. Selv om det slippes ut mye CO₂ ved produksjonen av betongen blir dette neglisjert med tanke på holdbarheten. I tillegg vil betongen absorbere karbondioksid som fører til redusert CO₂-utslipp til atmosfæren (Byggutengrenser.no). Materialet tar opp store trykkrefter men tåler lite strekk. Strekkreftene blir tatt opp av stålstenger som støpes inn i betongen. I fasthetsklassetabellen kan man se store forskjeller mellom trykk-og strekkfasthet til ren betong. I underkapitler blir betongens historie og delmaterialer nærmere beskrevet.

2.1.1 Betongens historie

Betongens historie begynte for ca. 7600 år siden. Det første beviset på at betongen ble brukt tidligere, er funnet i det som før var Jugoslavia. Ved bredden av elven Donau fant man en hytte med et 25 cm tykk betongdekket. Forskerne mener funnet kommer fra 5600 år fr Kristus. Andre bevis finner man også i Egypt og Roma. Egypterne brukte gips som bindemiddel da de bygde pyramidene for 5000 år siden, mens romerne brente kalk og blandet den med vann, vulkansk aske og knust stein. Dermed fikk de vannbestandig betong som ble brukt til vannledninger og badeanlegg (Søpler 2004a). Det mest kjente eksempelet på bruk av betong er Pantheons kuppel i Roma, bygd 1400 år etter Kristus (SNL 2009). Mot slutten av 1800-tallet begynte man å bygge i armert betong, og etter andre verdenskrig, når byene i Europa skulle gjenoppbygges, ble betong det mest brukte materiale. Helt siden den gangen har mennesker prøvd å forbedre egenskapene til betongen.

2.1.2 Sement

Sement består av finmalt uorganisk materiale som danner et hydraulisk bindemiddel, en pasta som størkner og deretter herdner gjennom hydratiseringsreaksjoner. Etter herdning beholder sementen sin fasthet og stabilitet også under vann (Sørensen 2013). Pastaen er den dyreste og, bortsett fra vannet, svakeste delen av betongen. Derfor er det viktig med riktig v/c-tall og tilslag for å gjøre kostandene minst mulig uten å at kvaliteten blir dårligere. Det er viktig at sementen er tilpasset klima og byggeskikk på bruksstedet. I Norge bruker man nesten alltid portlandsement. Portlandsement som ble oppfunnet i 1894 av en engelsk murer i Leed som het Joseph Aspdin. Han brant kalksteinsmel og leire i ovn til det nesten smeltet. Da oppstod det sintring, små kuler, som han malte til pulver. Sementen i dag produseres i korte trekk ved at kalkstein knuses, deretter tilsettes det leire og denne blandingen brenner man i en roterende ovn ved 1250°C til blandingen er nær smelting. Produktet av brent blanding blir til klinker som tilsettes gips og males sammen til sementpulver. Man kan også tilsette pozzolan sammen med gipsen. Pozzolan øker fastheten til betongen. men den reduserer også pH-verdien i den hydratiserte sementen. Portlandcement i klasse CEM I består av minst 95% portlandklinker og gips (Søpler 2004b). Detaljert produksjon av sement er vist i figur 2.1



Figur 2.1 Produksjon av sement (inspirert av figur 4.2 i betongboka)

Sementens sammensetning påvirker egenskaper i betongen.

Klinkermineralene har stor betydning for egenskapene til den ferske og den herdende betongen. I tabell 2.1 er det vist typisk kjemisk sammensetning for portlandsement produsert i Norge.

Tabell 2.1 Kjemisk sammensetning av sement (oppført av Norcem)

CaO	Kalsiumoksid	62 %
SiO ₂	Silisiumoksid	22 %
Al ₂ O ₃	Aluminiumoksid	5 %
Fe ₂ O ₃	Jernoksid	4 %
SO ₃	Svoveltrioksid	3,5 %
MgO	Magnesiumoksid	2 %
K ₂ O	Kaliumoksid	1 %
Na ₂ O	Natriumoksid	0,5 %

Fordeling og egenskapene til mineralene, som klinker består av, avhenger av hvordan råmelet er sammensatt og brenneforholdene i roterovnen. Det er spesielt fire mineraler som er viktige for egenskapene til sementen (Søpler 2004b; Sørensen 2013):

C₃S - Trikalsiumsilikat (C₃S) er mest kalkrik klinkermineral. Den gir størst fasthetsbidrag og bidrar til høy slutfasthet og rask fasthetsutvikling. Varmeutviklingen går raskt (500 J/g).

C₃S består av 3CaO · SiO₂ og er sulfatbestandig.

C_2S - Dicalciumsilikat er mindre kalkholdig enn C_3S , og den bidrar til langsommere fasthetsutvikling, men gir høy sluttfasthet. Varmeutviklingen skjer langsommere (260 J/g). C_2S består av $2CaO \cdot SiO_2$ og er også sulfatbestandig.

C_3A - Trikalsiumaluminat reagerer hurtig ved kontakt med vann og gir rask fasthetsutvikling. Hydratiseringen i C_3A kan retarderes ved å tilsette gips under malingen. Varmeutviklingen skjer svært rask (900 J/g). C_3A består av $3CaO \cdot Al_2O_3$ og er ikke sulfatbestandig.

C_4AF - Tetrakalsiumaluminoferritt virker som katalysator i roterovnen, slik at temperaturen i ovnen kan holdes lavere. Det bidrar lite til sementens egenskaper. C_4AF består av $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ og gir sementen grå farge.

Det finnes følgende typer sement:

- Standard sement (uten flygeaske)
- Standard sement FA (med flygeaske som pozzolan)
- Industrisement (ekstra finmalt, brukes om vinteren og til prefabrikkerte betongelementer)
- Rapidsement (herdner raskere, høy tidlig betongfasthet, brukes om vinteren)

2.1.3 Tilslag

Tilslaget er en fellesbetegnelse for sand og stein, men også resirkulert uorganisk materiale som knust betong og tegl. Tilslaget utgjør mellom 65% og 75% av betongblandingen. Det er viktig at tilslaget er rent og fritt for forurensinger. Forurensing som sitter fast på stein eller sand kan hindre sementpasta i å hefte seg til tilslaget. Betongens egenskaper, kvalitet, kostnad og sementbruk er ofte avhengig av tilslagets egenskaper. Formen og overflaten til tilslaget har stor betydning for betongen, fordi det påvirker hulromprosenten og dermed både sement- og vannbehovet. Runde og glatte korn krever mindre vann og sement for å oppnå en viss bearbeidelighet (Maage 1998d). Flate (flisige) eller lange (stenglige) korn øker vannbehovet i betongen og mer sement må tilsettes for å opprettholde ønsket fasthet. Ujevnheter i overflaten har betydning for heften mellom tilslaget og betongen. Glatte korn reduserer behovet for vann og sement, men gir mindre heft.

Ujevn og robust overflate gir bedre heft, men øker pastamengden og dermed øker kostanden til betongen. Knust stein (pukk) gir bedre heft enn natursingel pga. mer robust overflate.

Det finnes tre regler som gjelder for tilslaget som man ofte bruker i praksis:

- Runde korn er bedre enn avlange
- Kubiske korn er bedre enn avlange
- Avrundede korn er bedre enn skarpkantete

I dag er det mulig å produsere tilslag med bestemt kornform ved å styre knusing av steinmaterialet (Søpler 2004c).

Tilslaget deles inn etter kornstørrelse, og størrelsen oppgis i mm.:

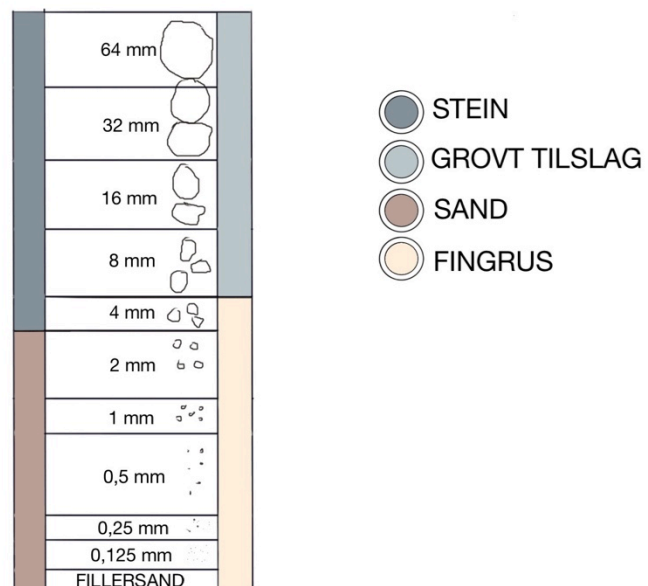
- *Grovt tilslag* består av bergartmaterialer (8-64 mm)
- *Stein* er enten pukk (knust materiale) eller singel (naturlige forekomster) (4-64mm)
- *Sand* er tilslag som er mindre enn 4mm (0-4mm)
- *Fingrus* er tilslag som er mindre enn 8mm og inneholder svært fine korn som har sine benevnelser:

Fillersand < 0,125mm

Filler < 0,074mm

Silt mellom 0,002 og 0,06

Leire minst 30% korn < 0,002



Figur 2.2 Tilslagsinndeling (inspirert av figur 4.10 i Betongboka)

Hver inndeling består av flere fraksjoner. Med fraksjon menes størrelsesintervall på kornene i tilslaget. Variasjoner i størrelsen av kornene i et tilslag kalles gradering. Optimal betongtilslag består av jevnest mulig gradering, dvs. relativt like mengder fra alle fraksjoner. Da pakker kornene seg best mulig, og det blir lite hulrom mellom kornene som reduserer nødvendig pastamengde i betongen, og kostanden blir rimelige (SINTEF Byggforsk 2012). Dette blir diskutert videre i kapittel 2.2.1.1.

Tilslaget deles inn i fraksjoner ved å gjennomføre en sikteanalyse. Til analysen brukes man en siktesats som består av sikter med standardiserte maskevidder. Til fingrus brukes sikter med maskevidder på 0,065, 0,125, 0,250, 0,500, 1, 2, 4 og 8mm. Til stein brukes 16mm og 32mm maskevidder. For å få gode resultater må tilslaget være overflatetørt for å unngå at kornene klumper seg sammen. Det er vanlig å sikte 1 kg fingrus og ca. 10 kg stein.

Fremgangsmåten er veldig enkel, alle siktene stables oppå hverandre i riktig rekkefølge og satsen helles i den øverste sikten. Da ristes hele satsen i 2-4 min. Dermed er tilslaget delt inn i fraksjoner. Mengden av fraksjonen veies og beregnes i % av den totale massen.

Tilslutt tegner man en siktekurve. Sikterestene i % settes langs y-aksen og maskevidden settes langs x-akse. God kornfordeling gir en kurve uten framtrædende knekker øverst eller nederst. Tilslagets korngradering blir ofte karakterisert med dets finhetsmodus, FM. Få å beregne finhetsmodusen må man summere halve siktresten på sikten 0,125 og siktresten til siktene med større maskevidder. Så divideres summen med 100.

Finhetsmodusen til det samlede tilslaget finner man på følgende måte (Søpler 2004c):

Finhetsmodul for fingrus: FM_{Fg}

Finhetsmodul for stein: FM_{St}

Finhetsmodul for samlet tilslag: FM_T

$$FM_{Fg} \cdot Fg \% \cdot \frac{1}{100} + FM_{St} \cdot St \% \cdot \frac{1}{100} = FM_T \quad (2.1.1)$$

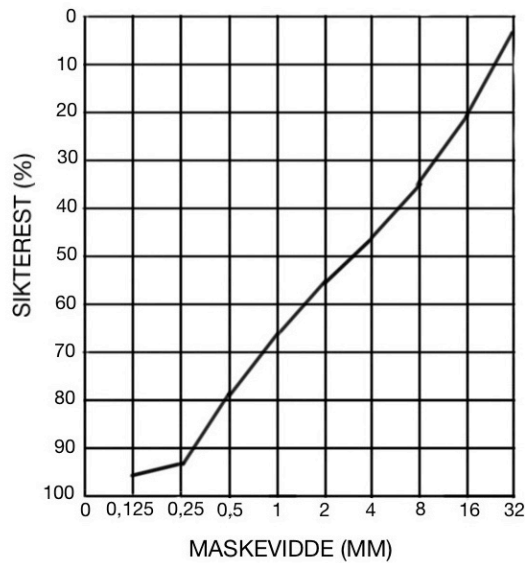
Vanlig finhetsmodul for fingrus ligger mellom 2 og 4, og for stein mellom 6 og 8.

Det er korngraderingen til fingrusen som har størst betydning for kvaliteten til betongen.

Hvor mye fingrus det skal være i betongblandingen, avhenger av hvor grov eller fin grusen er.

Hvis grusen er fin, brukes det lite grus i forhold til steinmengde, og hvis grusen er grov, velges grusmengden i forhold til steinmengden (Søpler 2004c).

Hovedmålet er å blande fingrusen og steinene slik at man får best mulig sammensatt tilslag som gir en siktekurve med jevnt forløp, se figur 2.3.



Figur 2.3 Siktekurve for samlet tilslag (inspirert av figur 4.21 i betongboka)

Fuktighet i tilslaget har stor påvirkning for konsistensen av betongen og må tas hensyn til. Særlig sandfraksjonen kan binde mye vann, og derfor er det viktig å ta med fuktigheten i sanden i betongresepten. Først finner man vanninnhold i sand:

$$w = \text{vanninnhold}(\%) = \frac{\text{vekt fuktig sand} - \text{vekt tørr sand}}{\text{vekt fuktig sand}} \cdot 100\% \quad (2.1.2)$$

Deretter korrigerer man betongresepten:

$$\text{Vekt sement} = s$$

$$\text{Korrigert vekt vann} = \frac{v}{c} - \text{tall} \cdot s - \frac{w}{100} \cdot \text{vekt sand} \quad (2.1.3)$$

$$\text{Korrigert vekt sand} = \text{vekt sand} + \frac{w}{100} \cdot \text{vekt sand} \quad (2.1.4)$$

Helt tørt tilslag suger vann fra den ferske betongen og gjør at konsistensen blir fort tørr og betongen blir vanskelig å jobbe med.

2.1.4 Tilsetningsstoffer

Tilsetningsstoffer tilsettes betongen i små mengder, normalt mindre enn 5% av sementmengden, for å få frem eller forbedre spesielle egenskaper i fersk eller herdet tilstand. Tilsetningsstoffene består av forbindelser i fast eller flytende form, og organiske og uorganiske salter som løser seg i vannet. I dag er tilsetningsstoffer en bestanddel av betongresepter, på lik linje med sement, tilslag og vann. Uten tilsetningsstoffer vil man ikke kunne tilfredsstille dagens krav til betongkvalitet. Det som ikke regnes som tilsetningsstoffer er mineralske pulvertilsetninger som pozzolaner, slagg og kalkfiller (SINTEF Byggforsk 2010). Tilsetningsstoffene må alltid kontrolleres for homogenitet, farge, virksomme bestanddeler, densitet, tørrstoffinnhold, pH-verdi, virkning på størkning ved første anbefalte dosering, totalt kloridinnhold, alkaliinnhold og korrosjonsegenskaper (Søpler 2004c). Egenskapene som kan modifiseres ved hjelp av tilsetningsstoffer er:

Fersk betong:

- bearbeidelighet
- flyteegenskaper

Størkning/herding:

- forkorte eller forlenge tiden før størkning
- akselerere fasthetsutviklingen

Herdet betong:

- slutfasthet
- tetthet
- frostbestandighet
- redusert svinn

Det finnes følgende typer tilsetningsstoffer:

Plastifiserende og superplastifiserende stoffer

Disse er den største gruppen av tilsetningsstoffer, og består av organiske langkjedede polymerer løst i vann. De to typene som er brukt mest er:

- polykarboksylater
- lignosulfonater

Hensikten med å bruke disse stoffene er å øke støpbarheten til fersk betong uten å øke vannmengden, eller opprettholde støpbarheten ved å redusere vannmengden. V/c-tallet blir redusert, materialkostnaden reduseres, og fastheten og tettheten økes.

Hovedfunksjonen til P- og SP-stoffer er å fordele sementkornene i vannet ved å dempe de små partiklenes polaritet. Polaritet gjør at massen klumpes, og vann stenges inne og bearbeiding blir utilgjengelig (Sørensen 2013). SP-stoffer gjør det mulig å framstille en svært bløt, nærmest flytende, betong, som ikke separerer seg. Betongen som er tilsatt SP-stoff heter selvkompimerende betong, SKB. Fordelen med SKB er at den har spesielt gode flyteegenskaper, dvs. at den fyller formen bedre enn vanlig betong, og støpearbeider blir betydelig lettere fordi det er unødvendig å vibrere betongen.

Lufttilførende stoffer

Lufttilførende stoffer består som regel av syntetiske tensider, som ligner på såpe, men det brukes også treharpikser oppløst i vann. Uønskede, store, naturlige luftbobler oppstår i betongen pga. blandingsprosessen, men disse vibreres bort. Tilsatt luft, med L-stoff, er små luftbobler som tilsettes betongen for å oppnå ønsket kvalitet iht. frost i herdet tilstand og bedre støplighet i fersk tilstand. Det er viktig å huske på at for hver prosent økning i luftinnholdet, reduseres fastheten med omtrent 5%. For å kompensere for dette fasthetstapet må v/c-tallet reduseres. L-stoff har også positiv påvirkning på plastisk svinn fordi den reduserer vannets overflatespenninger. Undertrykket i kapillærporene, som oppstår når den nystøpte betongoverflater tørker ut, reduseres.

Akselererende stoffer

Det finnes to typer akselererende stoffer. Den ene er størkningsakselererende, og den andre er herdingsakselererende. Den første består i hovedsak av kalsiumnitrat, mens den andre består av natriumhiocyanat. Ofte er disse stoffene blandet sammen noe som gjør at produktene akselerer størkningen og herdingen. Tidligere ble kloridsalter brukt som akselerator i betongen, men nå er det forbudt på grunn av faren for korrosjon i armeringen. Bruken av akselerator øker reaksjonshastigheten i sementhydratiseringen og medfører at varmen produseres tidligere ved størkning, eller raskere ved herding. Langtidsfastheten blir ikke påvirket av akselererende stoffer, med mindre akseleratoren inneholder store mengder alkalier, eller at man bruker for mye av stoffet.

Størkningsakseleratorer brukes for å:

- gjøre det mulig å pusse overflater tidligere
- redusere hydraulisk trykk i høye støpeformer ved at nedre del størkner først
- få heft mellom sprøytebetongen og veggen eller taket.

Herdingsakseleratorer brukes for å:

- kunne rive forskaling tidligere
- kompensere for langsom herdeutvikling påvirket av store mengder pozzolaner i bindemiddelet.

Størkningsretarderende stoffer

Disse kan deles i følgende klasser: organiske forbindelser og uorganiske salter.

Størkningstiden styres best ved bruk av uorganiske salter som glukonater og fosfater.

Bruken av retardere gjør at reaksjonshastigheten i sementhydratiseringen blir langsommere og medfører forlengelse av størkningstid, langsommere fasthetsutvikling eller begge deler.

Varmen under hydratiseringen av sementen produseres senere ved størkningsretarderende eller langsommere ved herdingsretarderende. Kort oppsummert har retardere omvendt effekt av akseleratorer. Retardere påvirker i liten grad varmen og fastheten i senere utvikling av betongen, og forlenger kun størknings- og brukstiden. Derfor brukes disse for å:

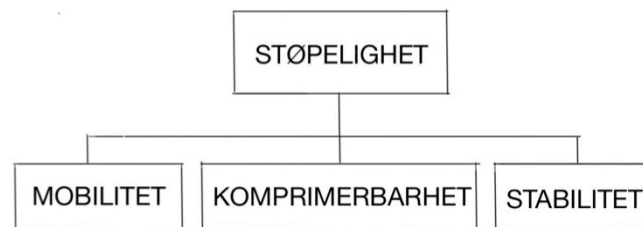
- muliggjøre lange transporter
- unngå rask størkning i varmt vær
- få bedre heft mellom flere lag med betong ved større betongarbeider.

Det fins ingen herdingsretardere på markedet i dag.

2.2 Fersk betong - delmaterialets innvirkning på betongen

2.2.1 Støpelighet

Når man har blandet sammen betongen, er det ønskelig å få plassert betongen i forskalingen på en enkel måte, men samtidig at betongen blir homogen, tett og får en fin overflate. Konsistensen er betegnelsen på hvordan betongen lar seg håndtere under transport og støpningen. Det påvirkes av hvilket delmateriale man velger, og hvordan de er sammensatt. Reologi er betegnelsen på betongens deformasjon, flyting og stabilitet i fersk tilstand, men i praksis snakker man ofte om betongens støplighet. Det er ikke noe man kan sette tall på. Støpligheten deles ofte i tre begreper:



Figur 2.4 Hovedegenskaper ved støpelighet

Mobilitet er betongens evne til å fylle ut støpeformen og legge seg tett rundt armeringen. Komprimerbarhet er betongens evne til å bli pakket, dvs. hvor lett vil betongen slippe ut innestengt luft. Og stabilitet er betongens evne til å flyte ut, samt opprettholde en jevn masse slik at massen ikke blir separert.

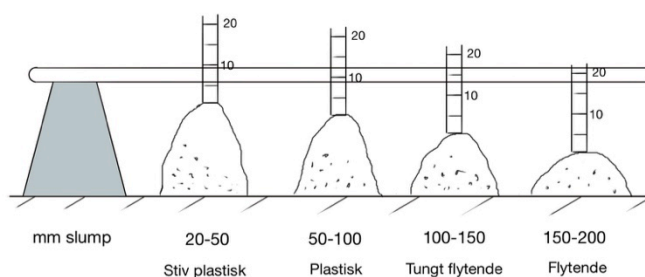
2.2.1.1 Mobilitet

For å måle betongens mobilitet bruker man slumpemetoden, med bruk av synkkjegle.

Kjeglen er 300mm høy, øvre diameter er 100mm og nedre diameter er 200mm.

I følge Statens vegvesens håndbok 014 Laboratorieundersøkelser (14.622) foregår måling av slump på følgende måte:

1. Kjeglen plasseres på et plant Brett som ikke suger vann (stålplate eller plastfolie)
2. Formen fylles med 3 tykke lag betong og stikker 25 ganger gjennom alle lagene med en 16mm glatt stålstang.
3. Kjeglen løftes forsiktig opp i løpet av ca. 5 sekunder.
4. Deretter måles det hvor mye betongen siger (se figur 2.5)



Figur 2.5 Konsistens på betongen (inspirert av figur 5.2 i betong boka)

Synkmål deler betongen etter følgende egenskaper:

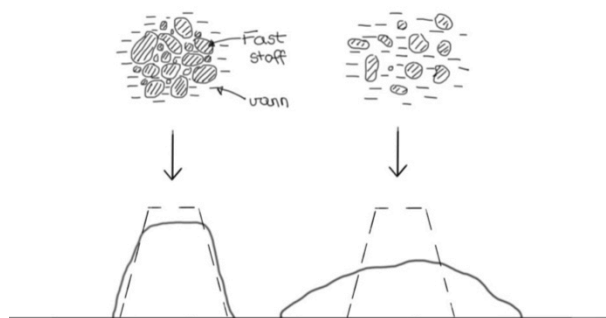
Stiv konsistens (20-50mm) brukes til vegger, gulv og uarmerte konstruksjoner. For å fylle ut forskallingen må man vibrere betongen, mens armeringen gjør vibreringen vanskelig.

Plastisk konsistens (50-100mm) brukes til konstruksjoner med åpen armering, for. Eks plater, åpne bjelker. Betongen bearbeides ved vibrering eller for hånd.

Tungflytende konsistens (100-150mm) brukes til uarmerte eller armerte konstruksjoner, som vegger, gulv og ringmurer. Betongen bearbeides for hånd eller med forsiktig vibrering.

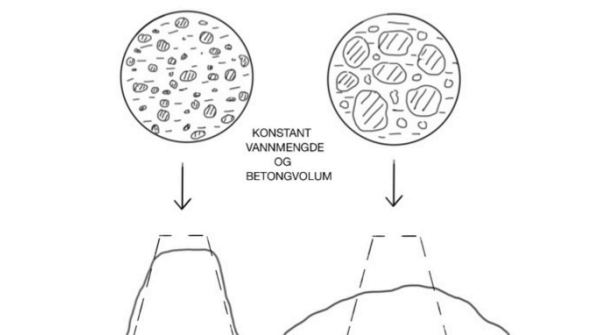
Flytende konsistens (150-200mm) brukes til tett armerte, tynne vegger hvor vibreringen er umulig, og det er viktig at betongen flyter ut og fyller hele forskalingen.

Som nevnt tidligere er betongen mye bløtere i dag pga. tilsetning av plastifiserende stoffer for å oppnå dagens krav. Men hvis man ser på ren betong uten noen tilsetningsstoffer, er vannmengden brukt i blandingen et direkte mål på betongens konsistens. Stiv konsistens gir lav vanninnhold og høy kvalitet på betongen. Når vannmengden økes, uten at alt annet forandres, blir avstanden mellom partiklene større, og partiklene flyter lettere om hverandre. Dermed blir slumpen større (se figur 2.6) (Maage 1998d).



Figur 2.6 Effekt av total vannmengde på støpeligheten av betongen (inspirert av figur 24 i Praktisk betongteknologi (3))

Når vannmengden blir konstant, er det kornstørrelser, siktekurve og form som påvirker støpeligheten på en indirekte måte; det er betongens vannbehov som virkelig blir påvirket. Når man øker kornstørrelsen i et konstant betongvolum med konstant vannmengde, vil den samlede overflaten til tilslaget være mindre. Da trengs det mindre vann til å dekke alle overflatene og fylle alle hulrom, og dermed blir det mer vann til overs som gjør betongen bløtere. En slik betong får større slump (se figur 2.7).



Figur 2.7 Effekten av tilslagets kornstørrelse på støpeligheten (inspirert av figur 25 i Praktisk betongteknologi kap.3)

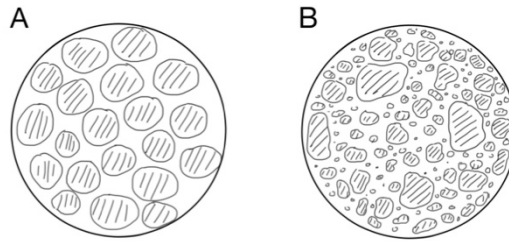
Vannbehovet er et mål på konsistensen til betongen, men bestemmer også sementmengden, og er dermed et mål på lønnsomheten. Nødvendig trykkfasthet krever bestemt masseforhold og mye vann krever mye sement som kan føre til store kostnader. To hovedfaktorer som bestemmer betongens støpbarhet er:

- Betongens vannbehov/sementlimmengde
- Sementlimets konsistens

For at betongen skal ha god støpelighet, skal den være plastisk eller flytende. For at så skal være tilfelle må sementlimet fylle alle hulrom mellom tilslaget. Hvor mye sementlimmengde det er behov for, avhenger av hvordan delmaterialer er satt sammen.

Delmateriallets påvirkning på betongens støpelighet blir forklart med partikkel-matriksmodellen. Modellen deler delmaterialene i to grupper etter de reologiske egenskapene deres. Matriksfasen blir den flytende delen som består av vann, tilsetningsstoffer og materialer med partikkelstørrelser mindre enn 0,125mm. Partikkelfasen består av tilslaget med partikkelstørrelsen større enn 0,125mm.

Matriksen er en tungtflytende væske, dens strømningsegenskapene finner man ved å måle strømmen gjennom et rør med trang utløpsåpning. Strømningsmotstanden til matriksen sammenliknes med strømningsmotstanden til en ideell væske. Flytemotstanden til en ideell væske er satt til 0, og verdien øker jo mer tungtflytende væsken blir. Motstanden økes ved å øke partikkelmengden i matriksen. Dette kan gjøres ved å bruke mer finmalt sement, øke fillermengden eller ved å senke masseforholdet (Søpler 2004d). Hvor mye matriksmengde det er behov for i betongen avhenger av størrelsen og prosentandelen av hulrom i tilslaget. Dårlig pakningsgrad består av tilslag med få kornstørrelser som gir mange hulrom, dermed må matriksmengden være stor for å fylle alle hullene (se figur 2.8A). God pakningsgrad består av velgradert tilslag med omtrent lik mengde av alle kornstørrelser, og gir optimal matriksmengde og dermed god støpbarhet og redusert kostand (se figur 2.8B).



Figur 2.8 (A) Dårlig pakningsgrad og (B) god pakningsgrad av tilslag (inspirert av figur 5.5 i betongboka)

Følgende regler gir god støpbarhet:

- øke tilslagets steinstørrelse til størst kvalitetsmessig og praktisk mulig
- mer enn 50% stein gir ofte separasjon av betongen
- finhetsmodulen til fingsus og sand bør være 3 eller høyere
- mengden av korn under 0,25mm bør være mindre enn 10%
- når grusen er fin, bruker man mindre fingsus i forhold til steinmengden for at vannbehovet ikke blir for stort
- når grusen er grovere, øker man fingsusmengden

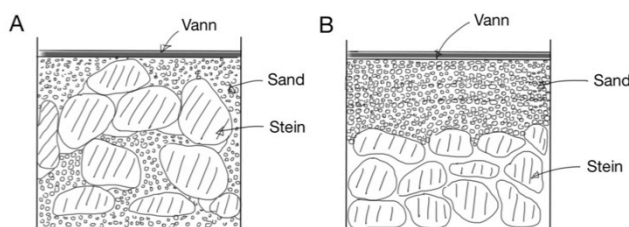
Mer om hvordan tilslag påvirker betongen, se kapittel 2.1.2.

2.2.1.2 Komprimerbarhet

I blandingsprosessen oppstår det naturlige, store luftporer i betongen. Disse er uønskede, og vibreres derfor bort for å få sterk og stabil betong med fin overflate. Hvis betongmassen er for tørr i forhold til komprimeringsutstyret, vil det alltid finnes innestengte luftporer i massen, uansett hvor godt vi prøver å komprimere betongen. Selvkomprimerende betong trenger ikke vibreres.

2.2.1.3 Stabilitet

Separasjon fører til dårlig betongkvalitet. Det finnes to typer av separasjon: vannseparasjon og mørtelseparasjon (se figur 2.9).



Figur 2.9(A) Vannseparasjon og (B) Mørtelseparasjon (inspirert av figur 3 i praktisk betongteknologi kap. 6)

Betong består av delmaterialer med ulikt vekt. Luft og vann veier mye mindre enn sement og tilslag. Ut fra tyngdeloven vet vi at tyngre partikler vil synke til bunns mens lette partikler vil flyte til topps.

Når vannet flytter til toppen, oppstår det *vannseparasjon*. Det gir høyt v/c-tall og dårlig betongkvalitet i overflaten. Betongen blir litt svakere fordi det oppstår vannlommer under tilslaget, og armeringen blir angrepspunkt for nedbrytning og korrosjon.

Vannseparasjon kan motvirkes ved å:

- benytte mer sement, men dette gir økt kostnad
- tilsette mer filler i sanden
- benytte P/SP-stoffer som er vannreducerende

Mørtelseparasjon oppstår når det groveste tilslaget synker til bunns i støpeformen. Dette vil gi ujevn betongkvalitet. Grunnen til denne typen separasjon er at det ofte mangler noen fraksjoner i tilslaget derfor kan man motvirke dette ved å rette opp tilslagssammensetningen slik at siktekurven blir jevn (Maage 1998a).

2.2.2 Herding

Herding er en prosess hvor fastheten i betongen utvikles. Fersk, bløt betong blir til fast, hardt materiale. Størkning er tiden fra bløt blanding frem til at betongen ikke er plastisk lenger, og er en del av herdingen. Herdingen avhenger av hydratiseringen og herdebetingelsene.

2.2.2.1 Hydratisering

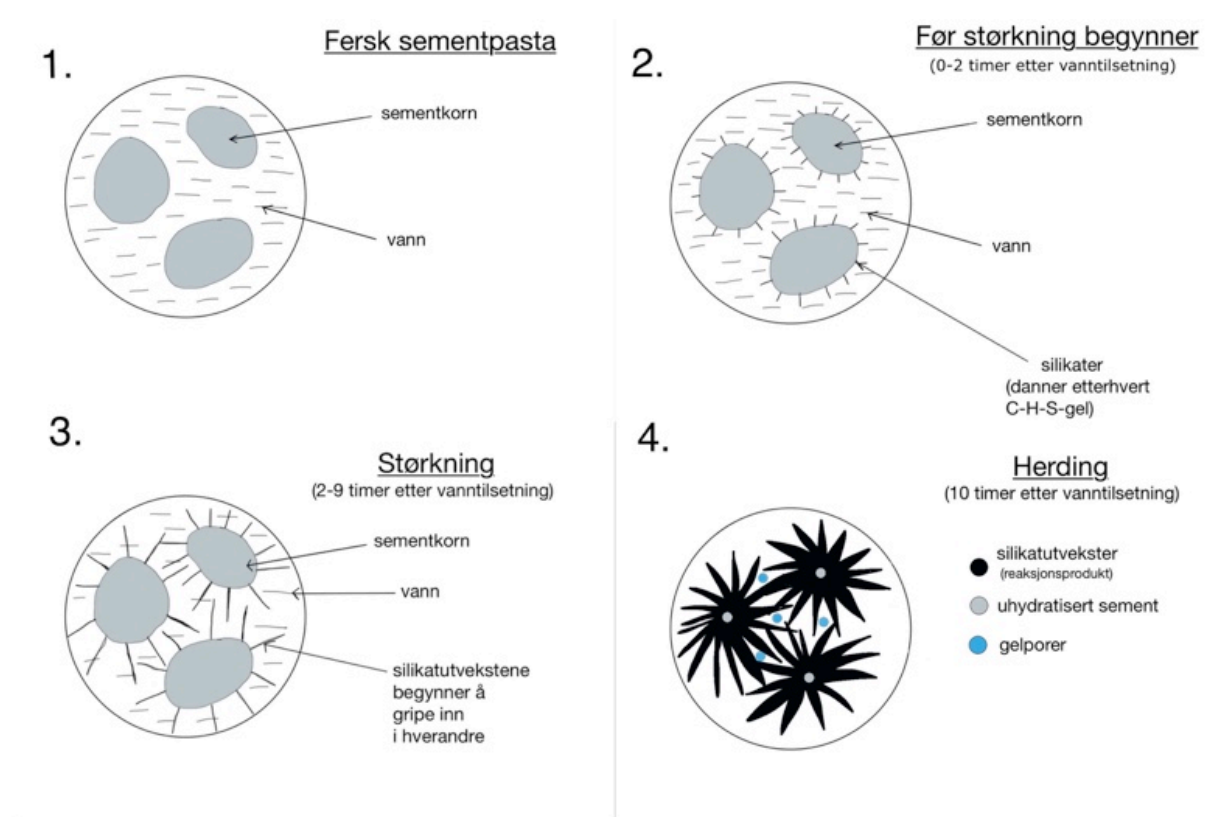
Når sement kommer i kontakt med vann, starter en kjemisk reaksjon. Å si at betongen tørker, er feil. Det oppstår en kjemisk reaksjon kalt hydratisering der sement reagerer med vann og danner sementgel. Under hydratiseringen utvikles det varme.

Hydratiseringen starter med at det vokser ut nåleformet silikater fra sementkornoverflaten.

Størkningstiden begynner når reaksjonsproduktet, silikatutvekster, starter å gripe inn i hverandre. Betongen stivner og størkningstiden er over når utvekstene får feste seg godt inn i hverandre. Da starter herdningen. Silikatutvekstene binder sammen partikler til en masse.

Massen er ofte kalt sementgel eller CSH-gel. Den består av Calsium-Silisium-Hydrater ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) som gir betongen styrke, bestandighet og stivhet. I tillegg til sementgel oppstår det også noen gelporer og krystaller av kalsiumhydroksid $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Disse bidrar ikke til fastheten i betongen, men gjør den er svært basisk, dvs. at betongen har pH-verdi rundt 13 og bidrar dermed til å sikre armering mot korrosjon.

I figur 2.10 kan en se hele forløpet til hydratiseringen. Etter hvert blir sementgelandelen større og den uhydratiserte sementandelen blir mindre.



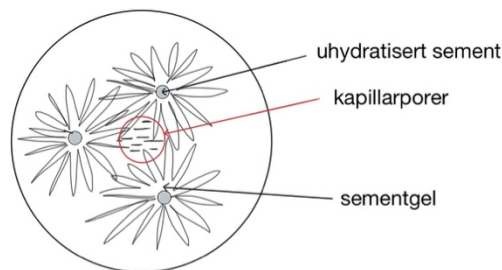
Figur 2.10 Hydratisering (inspirert av figur 3 i praktisk betongteknologi kap. 3)

I den kjemiske reaksjonen mellom sement og vann blir vannet brukt på to måter:

- vann som utgjør 25% av sementvekten ($v/c = 0,25$) blir kjemisk bundet og blir til CSH-gel
- vann som utgjør 15% av sementvekten ($v/c = 0,15$) blir fysisk bundet til overflaten av reaksjonsproduktet, sementgelen, som gelvann.

Begge måtene å bruke vann på skjer samtidig i hydratiseringsprosessen. Under vanlige klimatiske forhold kan noe av gelvannet fordampe og etterlate gelporer. Dette resulterer ofte i uttørkningsvinn (se 2.3.1.4)

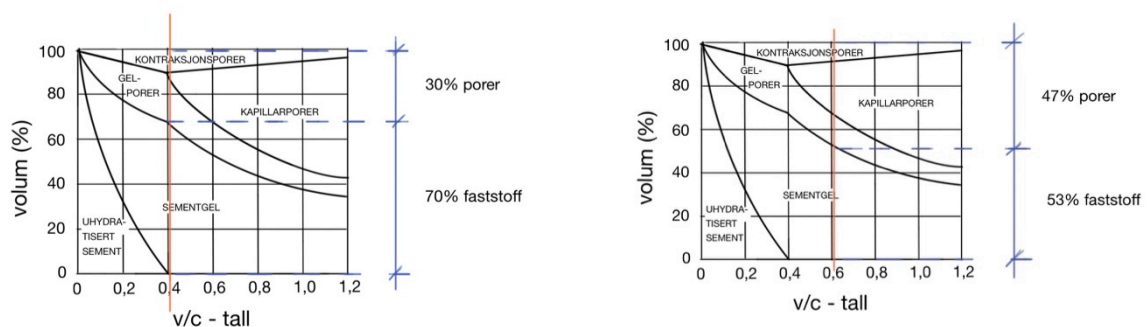
Når forholdet mellom vann og sement blir større enn det som trengs til hydratiseringen, dvs. $v/c = 0,25$ til kjemisk reaksjon og $v/c = 0,15$ til gelvann som til sammen gir $v/c = 0,4$, vil vannet som er til øverst danne relativt store kapillarporer se figur 2.11 (Maage 1998d).



Figur 2.11 Kapillarporer

Sementpasta med $v/c = 0,4$ vil gi ca. 70% faststoff og ca. 30% porer (se figur 2.12A)

Øker man v/c tallet til 0,6 vil faststoff bli redusert til 53%, og volumet til porer vil øke til 47% (se figur 2.12B). Jo flere porer i betongen, jo svakere blir betongen.



(A)

(B)

Figur 2.12 Fordeling av fast stoff og porer i fullstendig hydratisert betong (inspirert av figur 5 i praktisk betongteknologi kap. 3)

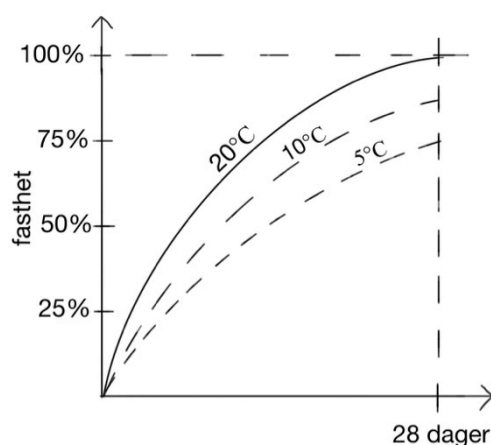
2.2.2.2 Herdebetingelser

Fasthetsutviklingen til betongen avhenger av sementtype, tilslag, masseforhold, herdebetingelser og eventuelle tilsetningsstoffer eller tilsetningsmaterialer. Tidligere i kapitlene ble alle disse variablene forklart bortsett fra herdebetingelser. Herdebetingelser virker inn på betongens endelige kvalitet. Tre følgende variabler har innvirkning på herdingen i betongblanding:

- tid
- fuktighet
- temperatur

For at betongen skal kunne brukes til konstruksjoner må den ha god kvalitet som sikres ved at betongen etterbehandles på riktig måte. For å oppnå god slutfasthet er det viktig at betongen får gode herdebetingelser i den første tiden etter utstøpingen.

Norsk standard NS EN 206:2013+NA2014 (5.5.1.2) sier at betongen skal trykkprøves etter 28 døgn. Gjennom standardisert prøving har man funnet ut at betongen oppnår full trykkfasthet etter 28 døgn når temperatur er rundt 20°C (se figur 2.13). Standardisert prøving går ut på å utføre prøver i 100x100x100mm støpeformer. Prøvene lagres i vann ved 20°C fram til prøvetidspunktet. Det er vanlig måle fastheten også etter 2, 7, 56, og 91 dager.



Figur 2.13 Fasthetsutvikling

Ulike sementtyper gir ulikt fasthet i tidligfasen. Ved å erstatte Norcem standardsement med Norcem industrisement som er mer finmalt, vil tidligfasthet øke.

Det trengs vann for at sementen skal hydratisere. Ved utstøpingen er vannmengden ofte stor nok til at hele sementmengden skal hydratisere, men det forutsetter at vannet beholdes i betongen. Som nevnt tidligere, når sementen reagerer med vann oppstår det varme som kan få vannet i betongen til å fordampe, som igjen kan føre til uttørkingssvinn. I tillegg vil transporten av fuktighet opp til overflaten bli vanskeligere etter hvert som sementpastaen blir tettere. Dette kan føre til at herdeprosessen stopper, samt at betongen blir svak på overflaten. Det er derfor viktig av man forhindrer vanntap fra betongoverflaten. På denne måten blir herdingen god og betongen godt etterbehandlet (Søpler 2004e; Sørensen 2013).

2.3 Herdet betong

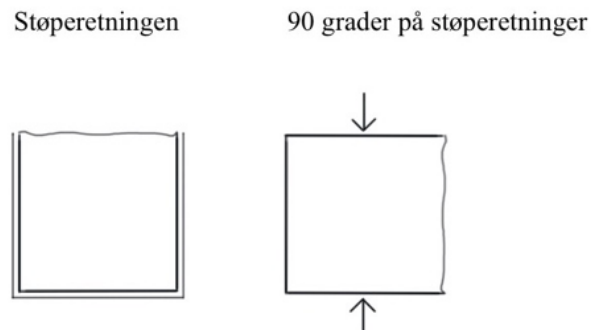
2.3.1 Mekaniske egenskaper

Materialets reaksjoner på ytre mekaniske krefter angir hvor godt det egner seg som konstruksjonsmaterialet. De viktigste mekaniske egenskaper bruddfasthet, elastisitetmodul, flytegrense og slagseighet. Betongens mekaniske egenskapene er trykkfasthet, strekkfasthet, elastisitet, svinn, kryp og temperaturkontraksjon. Disse vil utdypes i underkapitler. For de som prosjekterer og dimensjonerer betongkonstruksjoner, er det disse egenskapene for herdet betongen som det dimensjoneres ut i fra. Alle disse mekaniske egenskapene er tatt med i prosjekteringsstandarden for betongkonstruksjoner NS EN 1992-1-1:2004+NA2008.

2.3.1.1 Trykkfasthet

Den viktigste egenskapen for betong er trykkfasthet. Fastheten er spenningen, dvs. kraft per flateenhet, og trykkfasthet er den største trykkraften per flateenhet som betongen kan tåle før den bryter sammen. Trykkraften som må til for å knuse et prøvestykke, kalles bruddlasten og oppgis i SI-systemet. Normalt oppgis man bruddlasten i newton (N) eller kilo-newton (kN). Trykkfastheten er spenningen, dvs. at bruddlasten må divideres med trykkflaten. Den oppgis i megapascal (MPa) som er det samme som N/mm^2 . For å bestemme trykkfastheten, støpes det prøvestykker i form av en terning med dimensjoner 100x100x100mm. Prøvestykket tas ut av formen etter 24 timer og lagres i et vannbad ved temperatur 20°C. Etter 28 døgn blir prøvene trykt i en trykkpresse til de blir knust (Søpler 2004b; Maage 1998b). Terningen plasseres i trykkprøvingsmaskin 90 grader på støperetningen, fordi overflaten der hvor betongen ble fylt i formen er ujevn og hadde man lagt trykk på den overflaten ville trykket blitt ujevnt.

Ved å snu terningen 90 grader på støperetningen er overflaten jevn og trykket blir fordelt jevnt, se figur 2.14 (Statens Vegvesen 1996).



Figur 2.14 Støperetningen og trykkretningen

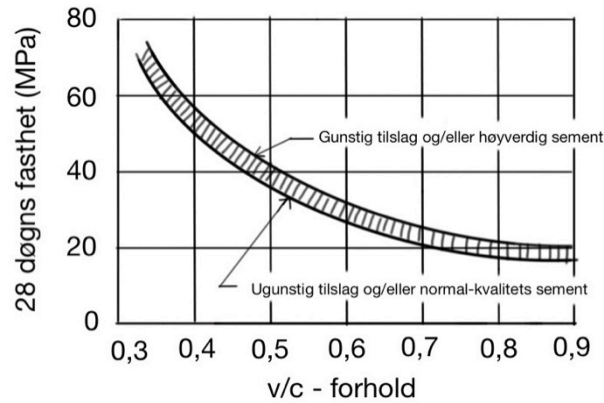
Tabell 2.2 viser trykkfastheten til forskjellige fasthetsklassene som er angitt i NS EN 1992-1-1:2004+NA2008 (tabell 3.1)

Tabell 2.2 Trykkfasthet gitt etter NS EN 1992-1-1:2004+NA2008 (tabell 3.1)

Fasthetsklasse i NS	B12	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B60	B70	B80	B90
Karakteristisk terningfasthet $f_{ck,cube}$ (MPa=N/mm ²)	15	25	30	37	45	55	67	75	85	95	105

I Norge er det vanlig at fasthetsprøving utføres på en terning, men i andre land kan man også bruke en sylinder med diameter 150 mm og høyde 300mm. Kravene til sylindere er lavere enn for terninger siden høyden i sylindere er den dobbelte av diameteren, og oppnådd fasthet blir mindre når høyden øker i forhold til diameteren. Sylindere er grunnlaget for beregningene og formlene i standarden. Derfor må man huske på å gjøre om sylinderfastheten til terningsfastheten og omvendt. Sylinderfastheten er ofte ca. 20% av terningsfastheten.

Trykkfastheten som betongen kan oppnå er avhengig av vann/sement-forholdet og av sementtypen. Trykkfastheten betongen oppnår avhenger av herdeforholdene og komprimeringsgraden. Tilslaget egen mekaniske styrke har også stor betydning for betongen, samt tilslaget overflate og kornform. Figur 2.15 viser sammenhengen mellom trykkfasthet og vann/sement-forhold.



Figur 2.15 Forhold mellom trykkfasthet og v/c-tall (inspirert av figur 1 i praktisk betongteknologi kap. 4)

For å vurdere om betongen tilfredsstillende krav til trykkfasthet, bestemmer man kritisk fasthet for hver sammensetning, hvis man har brukt ulike materialsammensetninger.

Karakteristisk fasthet f_{ck} beregnes ut fra middelveien av prøvefasthetene og standardavviket med formelen:

$$f_{ck} = f_{cm} \cdot w \cdot s \quad (2.3.1)$$

f_{ck} – karakteristisk fasthet

f_{cm} – middelveien av sylindrefastheter

w har verdier:

Antall prøver	3	4-5	6-10	11-20	>20
w	2,5	2,0	1,7	1,5	1,4

s – standardavviket

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - x_m)^2}{n - 1}} \quad (2.3.2)$$

x_i – de enkelte målingene

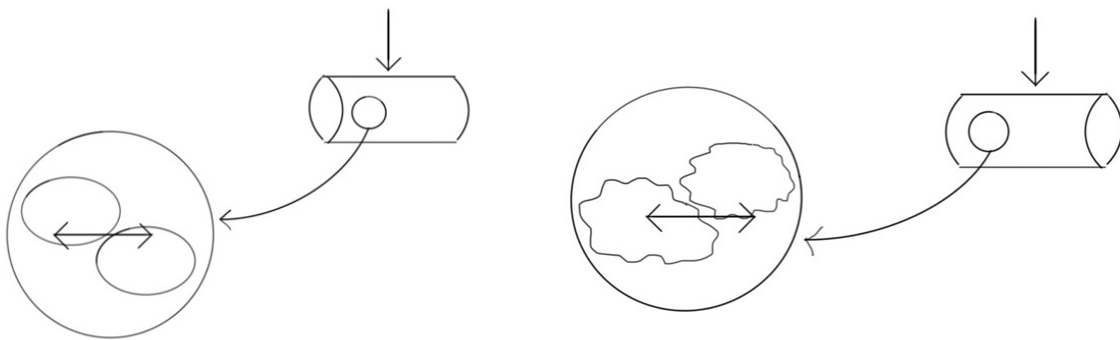
x_m – middelveien av alle målingene

n – antall målinger

For at prøvene skal tilfredsstillende krav til karakteristisk fasthet må alle de enkelte prøvene ha minst 80% fasthet av kravet som er oppgitt i tabell 2.1.

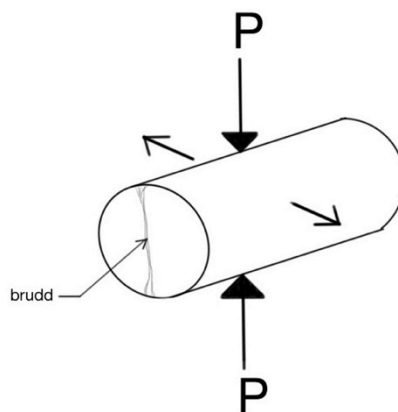
2.3.1.2 Strekkfasthet

Betong er et sprøtt materiale, og dermed blir strekkfastheten til betongen veldig dårlig (se figur 2.16) Strekkfastheten er ca. 10-20% av trykkfastheten, og blir litt større ved bruk av pukk enn ved bruk av singel. Den lave strekkfastheten er årsaken til at man bruker armering i betongkonstruksjoner. Armering vil ta alle strekkreftene, mens betongen tar trykkreftene i konstruksjonen.



Figur 2.16 Strekkspenninger - singel vs. pukk

Strekkfastheten måles ved at sylindertesten settes liggende inn i en trykkprøvemaskin og belastes på to motstående sider i lengderetningen. Trykkreftene skaper strekkspenninger normalt på kraftretningen (se figur 2.17)(SINTEF Byggforsk 2015).



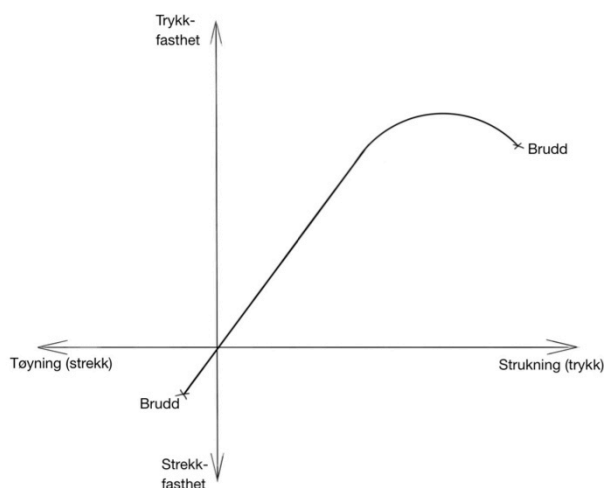
Figur 2.17 Strekkprøving av betong

2.3.1.3 Elastisitet

Elastisitet er uttrykk for materialets stivhet. Elastisitetsmodulen er forholdet mellom spenningen materialet er belastet med, og de deformasjoner materialet får som følge av gitt belastning.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\text{spenning}}{\text{tøyning (stukning)}} \quad (2.3.3)$$

Helning av arbeidsdiagrammet til materialet forteller oss om E-modulen er høy eller lav (se figur 2.18).



Figur 2.18 Arbeidsdiagram betong

En bratt kurve forteller oss at E-modulen er høy, mens slak kurve betyr lav E-modul.

Betongen har relativt bratt kurve, dermed kan man si at E-modulen er høy. For betongen er $E = 30\,000$ MPa. Dette er en høy E-modul sammenlignet med gummi ($E=10$), men lav sammenlignet med stål ($210\,000$). Man kan likevel si at betongen er et stivt materiale som får små deformasjoner, som følge av høy E-modul.

Elastisitetsmodul er en viktig egenskap mht. deformasjoner og nedbøyningen materialet vil få (Maage 1998b; Søpler 2004b).

2.3.1.4 Svinn og kryp

Når betongen tørker ut vil den forsøke å trekke seg sammen. Dersom spenningene som oppstår ved uttørking blir større enn strekkstyrken til betongen vil sprekker dannes. Dette kalles uttørkingssvinn. Svinnet er spesielt uheldig for betongen pga. den lave strekkfastheten. Uttørkingen skjer når vannet i gelporene fordampes, derfor er det veldig viktig å velge riktig sammensetning av betongen for å unngå unødvendig vannmengde i blandingen.

Faktor som styrer vannmengden i betong og har indirekte innflytelse på svinnets størrelse, er: tilslagets korngradering. Jo mer finkornet tilslaget er, desto mer vann trengs det for å oppnå riktig konsistens, som øker uttørkingssvinnet. Det er også viktig å holde betongen våt etter utstøpingen slik at den får tid til å opparbeide seg styrke før den tørker ut, da er sannsynligheten for å få svinn mindre.

Kryp er en deformasjon forårsaket av en belastning over lang tid. Da vil sammentrykking av betongen oppstå. Når lasten fjernes i ettertid, vil en del av langtidsdeformasjonen forsvinne igjen. Dette kalles reversibelt kryp (Søpler 2004B; Maage 1998b).

2.3.1.5 Temperaturkontraksjon

I følge Maage (1998b) og Søpler (2004b) vil betongen utvide seg ved oppvarming og trekke seg sammen ved avkjøling, som alle andre materialer. Når sement reagerer med vann, vil varme utvikles. For massive konstruksjoner kan temperaturforskjellen mellom overflaten og kjernen bli stor. Overflaten vil utvide seg mindre enn kjernen, og dermed vil den holde igjen temperaturkontraksjon i kjernen og betongen vil bli påført strekkspenninger. Da vil betongen kunne sprekke.

2.3.2 Bestandighet

En bestandig betong er en riktig dimensjonert og prosjektert betong, som er riktig oppført, med materialer tilpasset det miljøet betongen skal befinne seg i. Da blir betongen holdbar og beholder styrken og utseende uten kostbart vedlikehold.

For å oppnå god bestandighet er det viktig at betongen er støpt, komprimert og herdet på en riktig måte. Tette materialer er de mest bestandige, derfor må sementpastaen ha liten porøsitet. Betong må derfor ha lavt vann-sement forhold (Maage 1998c; Søpler 2004b).

2.3.2.1 Armeringskorrosjon

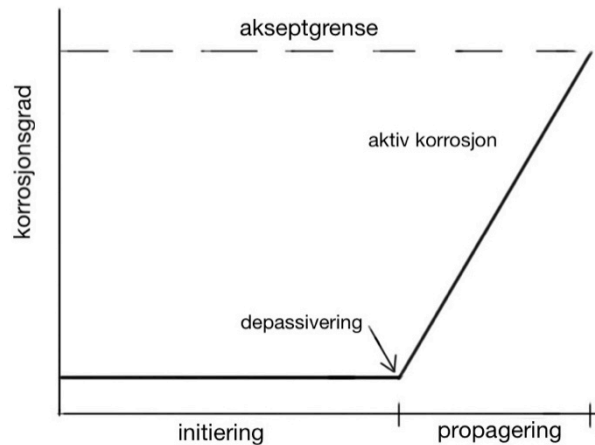
Årsaken til de fleste store skader på betong er korrosjon på armeringen som er støpt inn i betongen for å ta opp strekkrefter. Det finnes flere måter for å utsette armeringskorrosjon.

Porevannet i betong har en høy pH-verdi. Grunnen til dette er at herdet betong inneholder mye kalsiumhydroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) som er løselig i vann. Porevannet inneholder da basiske hydroksylioner OH^- som gir pH-verdi på 12,5. I tillegg finner man lettløselig NaOH og HOH i betongen som dannes av alkalier-, natrium- og kaliumforbindelser i sementen. Stor mengde oppløst OH^- gir svært høy pH-verdi i porevannet, opp mot 14. Høy pH beskytter armeringen mot korrosjonen ved at det dannes et usynlig og svært tynt (5-10nm) oksidsjikt på armeringsoverflaten. Dette skjer ved en kjemisk reaksjon mellom jern, vann med høy pH og oksygen. Oksidsjiktet gir beskyttelse mellom stålet og omgivelsene, og kalles ofte passivfilmen. Hele denne kjemiske reaksjonen heter passivering.

Nedbrytingen av passivfilmen skjer når pH-verdien i porevannet faller til en verdi mellom 8-9, eller når porevannet inneholder for mye kloridioner. Nedbrytingen av passivfilmen heter depassivering. Etter at passivfilmen er brutt ned er stålet utsatt for aktiv korrosjon, der korrosjonshastigheten er høyere enn passiveringen.

Korrosjonsforløpet skjer i to trinn(se figur 2.19):

- initiering. Det er tiden frem til depassivering.
- propagering. Det vil si tiden etter depassivering, når aktiv korrosjon begynner.



Figur 2.19 Korrosjonsforløpet (inspirert av figur 1 i praktisk betongteknologi kap. 5)

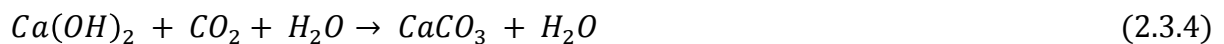
Levetiden til armering i betongkonstruksjoner kan forlenges ved å forlenge initieringsperioden, dvs. utsette tidspunktet for depassivering, eller ved å forlenge propageringsperioden, dvs. senke korrosjonshastigheten.

Tiltak for forlengelse av levetiden følger i underkapitlene.

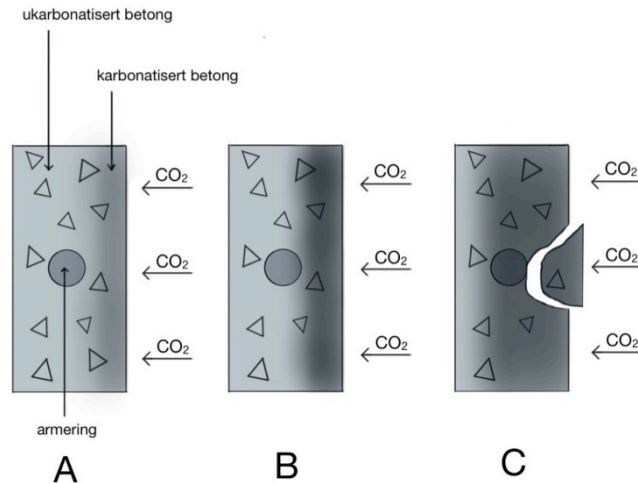
2.3.2.2 Karbonatisering

Karbonatisering er en kjemisk prosess og oppstår når betong reagerer med CO_2 i luften. Når sementen reagerer med vannet i herdeprosessen, dannes det blant annet kalsiumhydroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) som også kalles lesket kalk. Luft inneholder 0,038% CO_2 som trenger innover i betongen og reagerer med porevannet. I resultatet blir pH-verdien i porevannet senket til 8-9. Slik kan er reaksjonen beskrives.

base + syre + vann = kalsiumkarbonat + vann



Syre gjør at pH-verdien synker og H_2O nøytraliserer porevannet ved å endre konsentrasjonen av H^+ - ioner som fører til lavere pH i betongen.



Figur 2.20 Karbonatisering (inspirert av figur 11 i byggforskserien 520.061)

Når pH reduseres til ca. 8,3, blir ikke armeringen lenger vernet av passivfilmen, og stålet vil korrodere.

For å forlenge initieringsperioden kan man doble betongoverdekningen som vil firedoble tiden det tar for karbonatiseringen å nå armeringen, eller kan karbonatiseringshastigheten dempes.

Karbonatiseringshastigheten påvirkes av faktorer som v/c-tall, sementmengde og type, CO₂-konsentrasjon, relativ fuktighet og temperatur.

Vann-sement-forholdet har størst betydning for karbonatiseringshastigheten fordi dette avgjør hvor porøs betongen blir. Blir v/c-tallet høyt, blir poremengden større, og CO₂ transporten inn i betongen blir lettere.

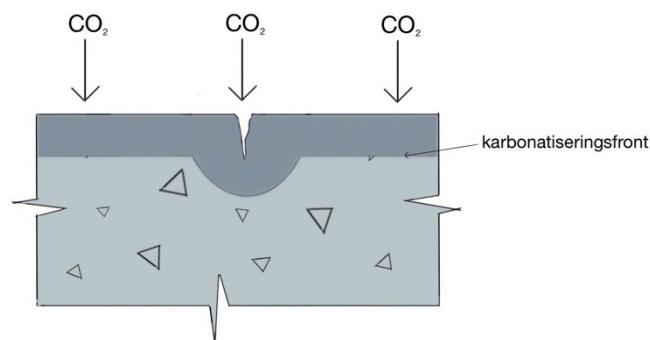
Karbonatiseringshastigheten blir lavere, jo større sementmengden blir. Med sementmengder øker mengden av kalsiumhydroksid. For at karbonatiseringsfronten skal kunne bevege seg innover i betongen, må all kalsiumhydroksid forbrukes i den kjemiske reaksjonen.

Hastigheten til karbonatiseringen øker med økende CO₂-konsentrasjon og temperatur.

Karbonatiseringen foregår ikke i helt tørr eller helt våt betong. Når betongen er våt, er porene fylt med vann og CO₂ transporteres ikke inn i betongen. Mens når betongen er tørr, trenger CO₂ lett i betongen pga. åpne porer med det er ikke noe vann som den kan reagere med. Karbonatiseringshastigheten er størst ved relativ fuktighet mellom 50-70%. Under 50% relativ fuktighet stopper reaksjonen opp pga. vannmangel i porene, mens over 70% blir reaksjonen ufullstendig pga. for mange vannfylte porer.

Karbonatiseringen resulterer i redusert pH-verdi i betongen som igjen fører til armeringskorrosjonen, men samtidig gjør betongen stivere, sterkere og tettere ved at reaksjonsproduktet CaCO_3 vokser inn i porene.

CaCO_3 som vokser inn i porene har mindre volum enn utgangsmaterialet, og det vil derfor oppstå svinn som kalles karbonatiseringssvinn. Svinnet har samme størrelse som uttørkingssvinn og oppstår i tillegg til uttørkingssvinn. På grunn av volumreduksjonen vil det dannes riss i betongoverflaten, og det fører til større lokalt karbonatiseringsfront, se figur 2.21.



Figur 2.21 Riss gir dypere karbonatiseringsfront (inspirert av figur 344 i byggforskserien 520.061)

Karboniseringsdybden kan måles ved å dusje en fersk bruddflate av betongen i en pH-indikator som inneholder 0,5l vann, 0,5l ren etanol og 0,1g fenolftalein. Den ukarboniserte delen av betongen vil få en sterk rosa-rød-farge mens karbonisert betong vil beholde sin grå farge. Denne testen sier ingenting om hvor mye Ca(OH)_3 som blir omdannet til CaCO_3 (SINTEF Byggforsk 2009; Maage 1998c).

2.3.2.3 Kloridinntrengning

Det finnes to eksterne kilder til klorider: veisalt (CaCl_2) og sjøvann (Natriumklorid NaCl). Disse er lettløselige i vann. Tidligere fantes en intern kloridkilde i tilsetningsstoffene, men i dag er alle tilsetningsstoffene er kloridfrie.

Når store mengder klorider kommer i kontakt med armeringsstål, vil passivfilmen på armeringen blir ødelagt, og korrosjon vil oppstå. Kloridkorrosjonen har større hastighet enn karboniseringskorrosjonen fordi den foregår i et avgrenset område på ståloverflaten.

Følgende grenseverdier for total kloridinnhold gjelder for betong laget av standardsement og armering av kamstål:

Tabell 2.3 Grenseverdier for totalt kloridinnhold i betongen
(inspirert av figur 473 i Byggeforskserien 520.061)

Kloridinnhold (% av sementvekt)	Korrosjonsrisiko
< 0,4	svært liten
0,4-1,0	liten
1,0-2,0	stor
> 2,0	svært stor

For å redusere kloridinntrengningen kan man doble betongoverdekningen. Det vil firedoble tiden det tar for store kloridsalter å nå armeringen. Man kan også behandle betongoverflaten med vannavvisende-lag, alternativt konstruere detaljer slik at vannet ledes bort fra betongen.

2.4 Pulver

Det finnes flere forskjellige brannslukningsapparater, men den mest effektive, og mest brukte i dag, er pulverapparatet. Sammenlignet med andre slökkemidler har pulverapparat høy slokkeeffekt ved bruk av liten mengde pulver. Pulverapparatet består av mange veldig små pulverkorn. Det gir en stor overflate som binder opp den frigjorte varmeenergien og stanser den kjemiske forbrenningsprosessen. I tillegg har pulveret i stor grad en kvelende effekt på brannen fordi den benytter store mengder av sin varmeenergi til å spalte pulveret. Det spaltede pulveret går over i dampform som fortrenger oksygen tilførselen (Trygg og sikker 2002)

Pulverapparater kan deles inn ulike kategorier i henhold til pulvertyper de benytter:

- *ABC*

Egner seg til alle typer branner men bør ikke benyttes på steder med kostbar elektronisk utstyr. Består av ammoniumfosfat ($(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$) og ammoniumsulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).

- *BC*

Består av kalsium (Ca), natriumbikarbonat (NaHCO_3), kaliumsulfat (K_2SO_4), kaliumbikarbonat

Forklaringen på de forskjellige bokstavene er:

- A: Brann i tre, papir, tekstiler og lignende
- B: Bensin, olje, lakk, maling og lignende
- C: Gasser samt elektriske anlegg inntil 1000 Volt.

Pulveret i seg selv er ikke helsefarlig, men kan føre til irritasjon og tørrhet på slimhinner i øye, luftveier og mage-tarmkanaler. Innånding av større mengder pulver kan ha en kvelende effekt og øker risiko for lungeødem.

Selv om pulveret har stor effekt på brannslukning har den også noen ulemper. Den største praktiske ulempen er at pulverkorn sprer seg i hele rommet ved slokking, noe som gjør at store deler av innbo må rengjøres. Ofte er det veldig problematisk å bli kvitt pulveret, og rengjøringen kan koste mer enn selve brannskaden. I tillegg kan pulveret skade elektronisk utstyr. Dette er noe å tenke på når det ikke er livsfare. Her er det snakk om små branner, men er det fare for at liv skal gå tapt, så er ikke materialskadene viktige.

En annen ulempe er hvis pulveret kommer i kontakt med fuktighet fordi det kan være korrosivt for metaller, som igjen kan føre til materialskader. Generelt er ikke pulveret klassifisert som miljøskadelig, men større utslipp av pulver i vannmiljø fører ofte til overgjødning som resulterer i redusert biologisk mangfold og oppblomstring av giftalger (GPBM Nordic AS 2011).

Brannslukningsapparatet som inneholder pulver må kontrolleres hver 5. år, og apparatet må på service hver 10. år. Det som blir kontrollert er skader på apparatet og trykket inni. Ved service blir pulveret sugd ut av apparatet og oppbevart i en tank, mens beholderen blir sjekket veldig nøye. Hvis beholderen er i god stand, uten noen skader, blir det samme pulveret ført tilbake til beholderen, og apparatet er godkjent for de neste 10 årene. Er beholderen skadet, skal pulveret kasseres og apparatet erstattes med et nytt.

I Norge importeres det ca. 30 000 stk. pulverapparater hvert år. Det finnes ingen tall på hvor mange tonn pulver som er liggende ubrukt. Man kan anta at ca. 80 % av disse 30 000 er pulver som blir liggende etter kasseringen, siden apparater skal serviseres hver 10. år.

Det blir da 240 000 apparater. Hvis man kunne forbedre betongegenskapene med pulveret kunne man brukt ca. 140 tonn med pulver hver år. 240 000 apparater, hver apparat har 6 kilo pulver i gjennomsnitt, det gir 144 000 kilo eller 140 tonn.

Ca. 80% av 240 000 apparatene nevnt ovenfor kunne serviseres istedenfor kasseres. Dermed blir ca. 20 000 ($24\ 000 \times 0,8 = 19\ 200$) apparater kassert hvert år, selv om de kunne blitt brukt om igjen. Det utgjør 120 tonn pulver som kunne vært gjenbrukt.

2.5 Skadelige kjemiske reaksjoner for betongen

2.5.1 Generelt om kjemiske reaksjoner i betongen

I betong oppstår det mange kjemiske reaksjoner, de fleste ble beskrevet med ord i teorikapitlet (kap.2.1.2 og 2.2.2.1) i sammenheng med hydratiseringen. Noen reaksjoner er viktigere enn andre, og derfor er det lurt å se på disse nærmere i en kjemisk sammenheng.

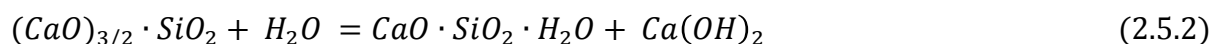
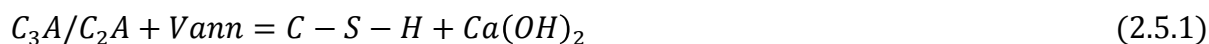
Hydratisering oppstår når sement reagerer med vann og utvikler fastheten.

Klinkermaterialer i sementen reagerer med vann og danner silikater som vokser ut og gjør at betongen blir hard (se kap. 2.2.2.1).

I denne oppgaven har klinkermaterialer C_3S (Trikalsiumsilikat)/ C_2S (Dikalsiumsilikat) og C_3A (Trikalsiumaluminat) størst betydning.

Kjemiske reaksjoner som oppstår under hydratiseringen er følgende:

Hydratiseringsreaksjon: C_3S og C_2S



C-S-H er kalsium–silikat–hydrater også kalt C-S-H gel, og denne gir styrke/fasthet til betongen og er hovedlimet.

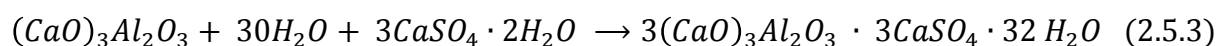
$Ca(OH)_2$ kalsiumhydroksid er også kalt lesket kalk, og er viktig i forhold til betongbestandighet

(Sørensen.C. (2013))

Hydratiseringsreaksjon: C_3A

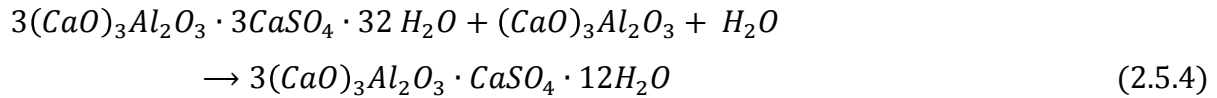
Trikalsiumaluminat har lynrask hydratiseringshastighet, hydratiseringen skjer sekunder etter at vann blandes med sement, som ikke er ønskelig. Derfor tilsetter man gipsen ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) som er kalsiumsulfat for å dempe hydratiseringshastigheten. Gipsen legger seg på kornene til C_3A og bremser reaksjonen, samt som ettringitt dannes.

$C_3A + \text{vann} + \text{gips} = \text{ettringitt}$



Noen timer senere, når all gipsen blir brukt opp, blir det mangel på sulfat og ettringitt vil forme monosulfat

Ettringitt + C₃A + vann = monosulfoaluminathydrat



Her er det lett å merke seg at C₃A reagerer veldig lett med sulfater og lar seg påvirke av disse. (Myrdal.R. (2015))

Fra kapitlet 2.1 vet man også at sementen består av blant annet 62% kalsiumoksid (CaO) hvorav en viss andel fri kalk, 2% magnesiumoksid (MgO), 1% kaliumoksid (K₂O) og 0,5% natriumoksid (Na₂O) (se kap. 2.1.2). Disse komponentene, selv i små mengder, kan bety mye for betongegenskapene. Når disse reagerer med vann, oppstår det veldig basiske løsninger, som gjør pH til betongen høy.

Her er reaksjoner når disse blandes med vann:



Til nå ble det kun beskrevet reaksjoner som oppstår i vanlig betong. Disse reaksjonene gjør betongen sterk, bestandig og med høy pH som beskytter armeringen mot korrosjon.

Men i tillegg oppstår det kjemiske reaksjoner som er viktig for denne oppgaven. Det er når pulveret blandes inn i betongen at det skjer reaksjoner som ikke lenger gjør betongen like sterk og bestandig. Sammensetningen av pulveret og sementen gjør at betongen blir utsatt for sulfat- og nitratangrep, syreangrep, dannelse av blant annet gips og andre salter i betongen og økt v/c-tall.

Når man blander inn pulveret fra brannslukningsapparatet i betongen er det stor sannsynlighet for at den vil reagere med sementen og danne mange mulige kjemiske reaksjoner mellom pulveret, sementen og vannet. Nedenfor vil man finne noen reaksjoner som kan oppstå i betongblandingen med pulveret.

Pulveret består av:

- ammoniumfosfat ((NH₄)₃PO₄)
- ammoniumsulfat ((NH₄)₂SO₄).

Siden sementen er veldig basisk, kan den lett gi fra seg OH⁻ - ionet som ammonium i pulveret veldig gjerne vil ta i mot for å danne ammoniakk-gass:

Ammonium + OH⁻ = ammoniakk-gass + vann



Løsninger som avgir OH⁻ - ionet først er de som løser seg lettest i vannet. Dermed vil løsningen 2KOH og 2NaOH reagere med pulveret først, men siden kalium utgjør 2% av sementen og Na utgjør kun 0,5% av sementen vil de fort bli ”brukt opp”. Etterpå kommer Ca(OH)₂ og Mg(OH)₂. Eksempel på reaksjonen hvor OH⁻ - ionet blir avgitt:



Når ammoniakk-gassen er dannet, står man igjen med resten av pulveret og basisk løsning som blir til:

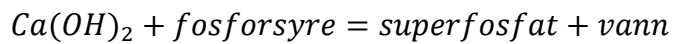


Under innblandingen av pulveret i betongen er det også stor sannsynlighet for at det skal dannes svovelsyre (H_2SO_4) og superfosfat ($CaHPO_4$).

Svovelsyre:



Superfosfat:



Fosforsyre oppstår på samme måte som svovelsyre



I tillegg vil det kunne oppstå reaksjoner som inneholder nitrogen (N) fra lufta. Luft inneholder ca- 70% nitrogen. I teorikapitlet ble det beskrevet at under blandingen av betongen vil det oppstå luftporer i betongen (se kap. 2.2.1.2) som skal vibreres bort, men noen ganger blir vibreringen ikke helt bra og noen luftporer blir igjen i betongen.

Når betongen hydratiserer, dannes det varme og dermed kan det også dannes nitrogenoksid i luftporene NO , og igjen løser det seg i vann og danner salpetersyre HNO_3 :



2.5.2 Sulfat- nitratangrep

Sulfater og nitrater ødelegger betongen ved å angripe klinkematerialet i sementen C₃A. C₃A er ikke sulfatbestandig i motsetning til C₃S og C₂S. Sulfater og nitrater reagerer med C₃A og danner ettringitt (se fig. 2.5.3) ved å binde mye vann. Dette resulterer i bestandig økning av volumet som fører til at betongen ”sprenger” fra innsiden.

I tabell 2.4 er det oppgitt en liste over mulige sulfater og nitrater og deres angrepsgrad for denne oppgaven. Generelt finnes det flere mulige sulfater og nitrater som angriper betongen.

Tabell 2.4 Angrepsgrad for aggressive salter

Salter			
Navn	Kjemisk formel	Angrepsgrad	Ligningnr.
Natriumsulfat	Na ₂ SO ₄	sterkt angrep	2.5.16
Kalsiumsulfat	K ₂ SO ₄	sterkt angrep	2.5.17
Ammoniumsulfat	NH ₄ SO ₄	meget sterkt angrep	pulver
Magnesiumsulfat	MgSO ₄	meget sterkt angrep	2.5.13
Kalsiumsulfat	CaSO ₄	sterkt angrep	2.5.11
Superfosfat	CaHPO ₄	middels angrep	2.5.21

I følge Statens Vegvesens rapport utarbeidet av Kjersti K. Dunham i 2007 virker magnesiumsulfat (MgSO₄) (se fig. 2.5.13) annerledes enn andre sulfater. Den oppfører seg mer som en syre i tillegg at den er et sulfat. Magnesiumsulfat reagerer med C₃S, C₂S og C₃A. Den ødelegger kalsium-silikat-hydratene (CSH-gel) og danner magnesium-silikat-hydrater (MSH) som ikke er bindende, i tillegg kan den danne ettringitt sammen med C₃A (Statens Vegvesen 2007)

2.5.3 Syreangrep

Syrer angriper betongen på en helt annen måte enn det sulfater og nitrater gjør. Syrer vil angripe hovedlimet i betongen, dvs. C_3S og C_2S som gir styrke og fasthet i betongen. Betong framstilt av vanlig Portlandsement (se kap.2.1.2) har dårlig motstandsevne mot syrer (lav pH). Klinkermaterialer, C_3S og C_2S , blandet med vann gir, som nevnt tidligere, veldig basiske løsninger (høy pH). Syrer kan derfor angripe betongen og forårsake nedbryting. Jo lettere en syre vil løse seg i vann, jo fortere vil nedbrytingen skje. Bindemidlet i betongen vil bli omdannet til nye kjemiske forbindelser som ikke er bindende. I tabell 2.5 er det oppgitt en liste over mulige syrer og deres angrepsgrad for denne oppgaven. Generelt finnes det flere mulige syrer som angriper betongen. (NORCEM).

Tabell 2.5 Angrepsgrad for syrer

Syrer			
Navn	Kjemisk formel	Angrepsgrad	Ligningnr.
Svovelsyre	H_2SO_4	sterkt angrep	2.5.20
Salpettersyre	HNO_3	meget sterkt angrep	2.5.22
Fosforsyre	H_3PO_4	Svak angrep	lik som 2.5.20

2.5.4 Økt v/c-tall

Fra ligningen 2.5.9 er det mulig å observere at når ammonium, som pulveret består av, reagerer med OH^- fra basiske løsninger, dannes det ammoniakkgas og vann. Dette vannet som oppstår øker v/c-tallet, og dermed blir betongen mer flytende og får mindre fasthet (se kap. 2.2.2.1).

3 Laboratoriearbeid

3.1 Innledning

Laboratoriearbeidet ble stort sett utført på betonglaboratoriet på NMBU, og gikk ut på å tegne tilslagets siktekurve, støping av betong, trykkprøving og strekkprøving av betongen. Noen av trykkprøvene ble utført på betonglaboratoriet på Høyskolen i Østfold, for å sammenligne resultater fra en eldre trykkprøvmaskin på NMBU med en nyere maskin som er styrt med datamaskin.

I tabell 3.1 er det vist fordeling av oppgaven i 8 forskjellige case. Hver case har sin farge som kommer til å dukke opp i flere tabeller og figurer.

Tabell 3.1 Case-fordeling

Case nr.	Betegnelse	Beskrivelse
Case 1	A	Betong med 100% sement og 0% pulver (med 10% SP-stoff)
Case 2	B	Betong med 95% sement og 5% pulver (med 10% SP-stoff)
Case 3	C	Betong med 90% sement og 10% pulver (med 10% SP-stoff)
Case 4	D	Betong med 85% sement og 15% pulver (med 10% SP-stoff)
Case 5	E	Betong med 80% sement og 20% pulver (med 10% SP-stoff)
Case 6	A+	Betong med 100% sement og 0% pulver uten SP-stoff
Case 7	B+	Betong med 95% sement og 5% pulver uten SP-stoff
Case 8	E+	Betong med 80% sement og 20% pulver uten SP-stoff

Alle metodene som ble brukt i oppgaven er nærmere beskrevet i underkapitler.

3.2 Siktekurver

3.2.1 Hensikt

Hensikten med siktekurver er å se tilslagets kornfordeling. Har tilslaget god korngradering, synker sementbehovet i betongen (les mer i kapittel 2.1.2). Som skrevet tidligere tegner man en siktekurve for pukkk 11-16 og en for sand 0-8. Metoden er hentet fra forelesningsnotatene (konstruksjonsfag) og Statens vegvesens sin håndbok 14.432 Kornfordeling ved sikting fra 2005.

3.2.2 Utstyr

- Vekt med kapasitet 10 kg med nøyaktighet 2 g
- Kokeplate
- Ileggerskje
- Målebeger
- Liten spadde
- Sand 0-8
- Siktesatser (200mm diameter og 50mm dype) med følgende maskevidder: Bunn, 0,125mm, 0,25mm, 0,5mm, 1mm, 2mm, 4mm, 8mm, 16mm, 31,5mm og lokk
- Siktemaskin
- Pukk 11-16

3.2.3 Prosedyre

1. Ca. 2/5 kg sand/pukk veies. Jo mer tilslag jo bedre blir resultatene når det gjelder fingerusen.
2. Sanden stekes til den blir helt tørr, deretter avkjøles sanden.
3. Mens sanden avkjøles, veies hver siktesats og vekten noteres.
4. Alle siktesatsene stables oppå hverandre med minste maskevidde på bunnen og største maskevidden øverst.
5. Avkjølt tilslag helles forsiktig i satsene.
6. Tårnet med siktesatsene settes oppå en siktemaskin og ristes i ca. 4 minutter.
7. Ved å riste en av satsene over et hvitt ark kan det sjekkes om prøven er ferdig ristet.
8. Alle satsene veies nå på nytt med innholdet for å finne vekten til fraksjonene i hver sats.
9. Resultatene føres inn i en tabell
10. Siktekurven genereres av et regneark på bakgrunn av sikting.



Figur 3.1 Våt sand, tørr sand og siktemaskin

3.3 Betongstøping

3.3.1 Betongresepter

Fra en generell resept for B30M60 betong kan man regne ut resept for bestemt antall prøveterninger med gitt vanninnhold i sanden.

Tabell 3.2 Original resept for 1m³ B30M60 betong.

Delmaterialer	Leverandør	Vekt (kg)
Tilsatt vann	rent vann	202,2
Sement	Norcem	350
Sand 0-8	Franzefoss Pukk AS/Norcem	890
Pukk 11-16	Franzefoss Pukk AS/Norcem	805
SP-stoff	Mapei	1

Hvordan skal en regne om original resept til x stk. prøveterninger:

1. Original resept gir ca. 1m³ betong.
2. En prøveterning har dimensjoner 0,1x0,1x0,1m som gir 0,001 m³ og som er 1/1000 av 1m³.
3. Delmaterialets vekt må derfor enten ganges med 0,001 eller deles på 1000. Da får en vekt til delmaterialet i kg per terning.
4. For å få vekten per terning i gram, må en gange med 1000 (1kg=1000g).
5. Når en trenger å støpe x terninger er det bare å gange vekten i gram med x.

Tabell 3.3 Endelige betongresepter for ulike case

Menge i gram for 17 former ved:									
Delmaterialet	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %	0% uten SP	5% uten SP	20% uten SP	tilslag 5 %
Vann	3150	3150	2756	2756	2968	2967	2967	2967	2938
Sement	5950	5653	5355	5058	4760	5950	5653	4760	5950
Pulver	0	298	595	893	1190	0	298	1190	298
Pukk 11-16	13685	13685	13685	13685	13685	13685	13685	13685	13685
Sand 0-8	15130	15130	15130	15130	15130	15614	15614	15614	15130
Sp-stoff	2	2	2	2	2	0	0	0	2
w (vanninnhold)	1,9	1,9	4,51	4,51	3,1	3,2	3,2	3,2	3,3
Avvik sand i g	287,5	287,5	682,4	682,4	682,4	0,0	0,0	0,0	499,3
masse- forhold (v/c-tall)	0,53	0,53	0,46	0,46	0,50	0,50	0,50	0,50	0,47

3.3.2 Utstyr

- Pukk
- Sand
- Sement
- Vann
- Pulver
- Murebøtte 60L
- Stor spade
- Målebeger
- Stålstang (600mm lang, ø16mm, avrundede ender)
- Ileggsskje
- Liten spade
- Vekt med kapasitet 100 kg med nøyaktighet 50 g
- Vekt med kapasitet 10 kg med nøyaktighet 2 g
- Blandemaskin, tvangsblender med lokk

3.3.3 Prosedyre

1. Vanninnholdet bestemmes ved å veie ca. 1 kg fuktig sand. Sanden stekes til alt vannet fordampes, og sanden er helt tørr. Sanden veies på nytt.

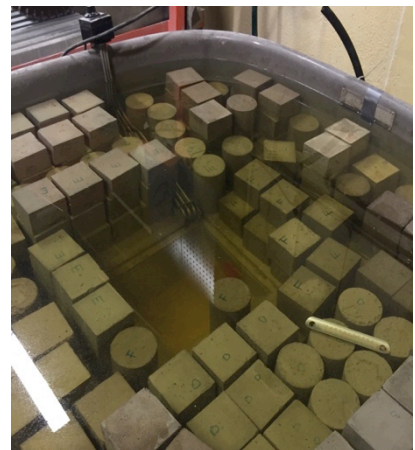
$$w = \text{vanninnhold}(\%) = \frac{\text{vekt fuktig sand} - \text{vekt tørr sand}}{\text{vekt fuktig sand}} \cdot 100\%$$

2. Vann og sand korrigeres i betongresepten:

$$\text{Korrigert vekt vann} = \text{vann (før)} - \frac{w}{100} \cdot \text{vekt sand}$$

$$\text{Korrigert vekt sand} = \text{vekt sand (før)} + \frac{w}{100} \cdot \text{vekt sand}$$

3. Når betongresepten er klar, kan en begynne å blande betongen
4. Formene skal settes sammen og smøres med rapsolje.
5. Tvangsblander fuktes med våt klut.
6. Pukk, sement, pulver og sand veies opp i riktig mengde ut fra resepten.
7. Delmaterialene legges inn i blandemakinen i rekkefølgen gitt over og tørrblandes i ca. 60 sekunder
8. Vann og evt. SP-stoff veies opp i riktig mengde.
9. Vannet tilsettes i løpet av 30 sekunder blandetid.
10. Så tilsettes Sp-stoffet i løpet av 30 sekunder blandetid.
11. Alt blandes i 90 sekunder.
12. Konsistensen måles senest 5 minutter etter at blandingen er avsluttet. (se 3.4 slumpmåling)
13. Formene fylles ut med betongblandingen, og slås 25 ganger med stålstang. Fin og jevn overflate på betongen fås ved å slå murskje på formkantene.
14. Formene dekkes med plastpose og settes på hylle til herding.
15. Etter 48 timer tas betongterningene ut av formen og settes i et vannbad.



Figur 3.2 Prosedyre for betongstøping i bilder

3.3.4 Kommentar

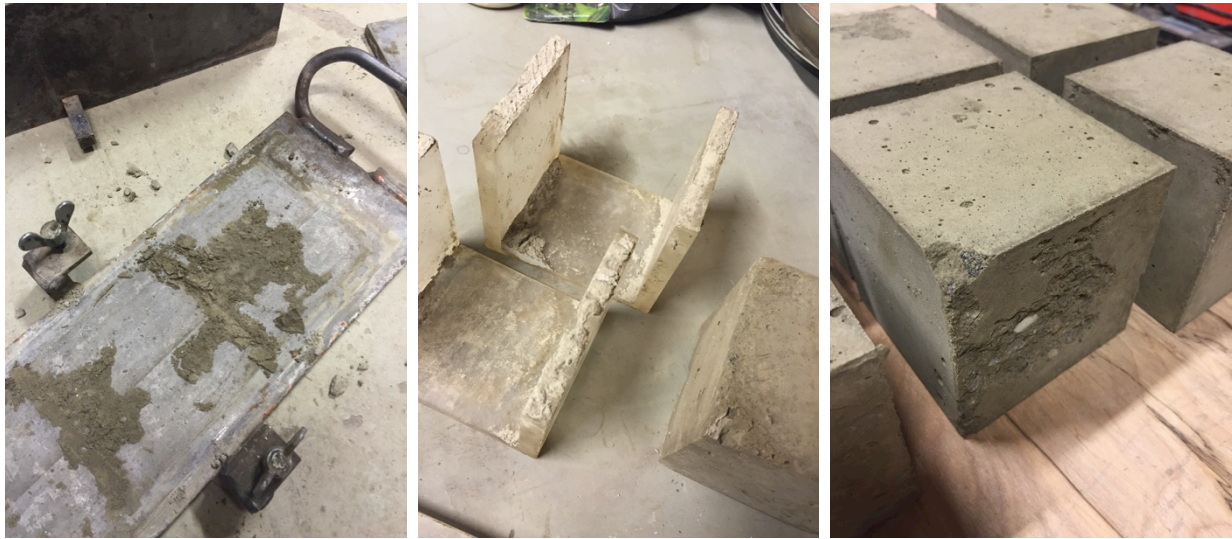
En regnefeil gjorde at det kun ble tilsatt 12% av faktisk SP-stoffmengde. Ved omregning fra original resept til resept for 17 terninger ble 1kg delt på 1000 og ganget med 17, men jeg glemte å gange med 1000 for å få SP-stoffmengde i g (se beregning i underkapitlet 3.3.1). Resultatet ble 0,017. Men dette ble i kilo og ikke i gram som tenkt. 0,017 virket veldig lite derfor ble det bestemt å bruke 2g istedenfor. Vekten som ble brukt har nøyaktighet på 2g, det vil si at vekten starter på 2g og det er det minste en kunne veie. SP-stoffet gjorde ikke betongen synlig mer flytende, men siden det var første gangen en blandet betongen fra grunne med bruk av SP-stoffet ble det bestemt at slik skal det være.

Feilen ble oppdaget ved litteraturstudie. Betong med SP-stoff kalles selvkomprimerende og klassifiseres ofte med utbredelsesmål. Ved slump testen ble det også målt utbredelsesmål men det var for små verdier får å kunne klassifisere betongen etter Norsk Standard. I NS startet verdiene fra 550mm mens den største målte verdien var 290mm. Det betydde at noe var feil. Større utbredelsesmål-verdier måtte gi større slump og tynnere konsistens av betongen. Derfor måtte det være noe med resepten. Alle verdiene i resepten ble regnet på nytt og feilen ble oppdaget. Siden samme mengde SP-stoff ble brukt i case 1-6, ga det ingen utslag i resultatene. Det ble likevel gjort tre blandinger til (case 7,8,9), helt uten SP-stoff for å kunne sammenligne prøvene uten SP-stoff og med 12% SP-stoff.

Siden case 1-6 ble utført før litteraturstudie, for å klare 91-dagers test før levering av oppgaven, ble sandmengden i betongblandingene i case 1-6 litt feil. Det ble brukt samme mengde fuktig sand uansett vanninnhold i sanden. Når vanninnholdet ble lagt inn i regnearket med betongresepten ble vannmengden endret til riktig mengde i forhold til vanninnholdet i sanden, men sandmengden ble ikke endret. Både vanninnholdet i prosent og avviket i sangmengden i gram er oppgitt i tabell 3.3. Siden avviket ble relativt lite, og pulveret hadde dårlig påvirkning på betongens fastheten uansett, ble det bestemt at nye prøver ikke skal støpes. I case 7-9 er sandmengden riktig, men vannmengden måtte bli lik vannmengden pluss vanninnholdet i sanden pga. tørr konsistens i case 8 og 9. Siden jeg ville sammenlikne case 7-9 med hverandre, ville jeg ha samme masseforhold i alle 3 case-ene.

I teorien skal betongterninger tas ut av formene etter 24 timer. Men siden minste mengde av pulveret virket størkningsretarderende valgte jeg å ta betongen ut av formene etter 48 timer istedenfor 24. Større mengde pulver hadde så stor størkningsretarderende effekt at til og med

48 timer i formene var for lite. Det var problematisk å ta betongen ut av formene uten at noe ble igjen i formen (se figur 3.3)



Figur 3.3 Størkningsretarderende effekt av pulveret

3.4 Fersk betong – slumpmåling

3.4.1 Hensikt

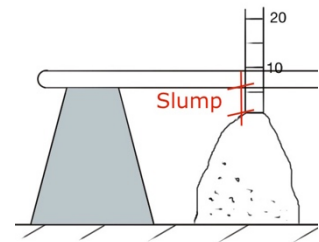
Hensikten med slumpmåling er å bestemme konsistensen til betongen. Slump er et mål på betongens mobilitet, se underkapittel 2.2.1.1. Metoden er hentet fra forelesningsnotatene og Statens Vegvesens sin håndbok 14.622 Konsistens; synkmål, vebetall og utbredningsmål fra 2005.

3.4.2 Utstyr

- Synkkjegle (øvre diameter 100mm, nedre diameter 200mm)
- Flat underlag (kryssfiner)
- Ikke absorberende underlag (svarte poser)
- Stålstang (600mm lang, $\varnothing 16$ mm, avrundede ender)
- Metermål
- Fersk betong

3.4.3 Prosedyre

1. Kryssfinerplater legges på gulvet og dekkes med svart plastpose.
2. Innsiden av synkkjeglen og underlaget fuktes med våt klut.
3. Kjeglen plasseres på underlaget.
4. Synkkjeglen holdes fast mot underlaget ved at en person står på de to fotstøttene.
5. Kjeglen fylles med tre lag betongblanding, hvert lag utgjør 1/3 av høyden til kjeglen. Etter hvert lag skal betongen komprimeres med 25 støtt med stålstang. Støttene skal foregå kun i et lag.
6. Etter at synkkjeglen er fylt med betong skal den løftes rett opp i løpet av 5s. Det er veldig viktig at kjeglen løftes vertikalt opp, uten noen sidebevegelser. Hele prosedyren fra fylling av betong til oppløfting av kjeglen skal ikke ta mer enn 150s.
7. Når synkkjeglen er fjernet, skal synkmålet måles, og resultatet registreres. Synkmålet er differansen mellom synkkjeglehøyden og høyeste punktet på betongen (se figur 3.5)



Figur 3.4 Måling av slump



Figur 3.5 Slumpmåling i bilder

3.5 Herdnet betong – trykk- og strekkprøving

3.5.1 Hensikt

Hensikten med trykk- og strekkprøving av betongen er å måle fastheten til betongen. Dette er beskrevet i underkapittel 2.3.1.1 og 2.3.1.2. Metoden er hentet fra forelesningsnotatene og Statens vegvesen sin håndbok 14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder fra 1996.

3.5.2 Utstyr

- Trykkprøvingsmaskin
- Betongterninger /sylinder

3.5.3 Prosedyre

1. Terningene tas ut av vannbadet ca. en halvtime før prøvene skal testes. Terningene skal ikke ha fritt vann på overflaten, men skal fortsatt være overflatefuktig. Terningene kan ikke være tørre under prøving. Er terningen våt, har den mørkgrå farge, mens tørr terning har lysgrå farge.
2. Terningen plasseres midt på trykkflaten i trykkprøvemaskinen (se figur 3.6 (2))
Sylindren plasseres liggende i trykkprøvemaskinen (se figur 3.6 (3))
3. Terningen plasseres slik at trykkretningen er vinkelrett på støperetningen
4. Terningene trykkes til bruddet.
5. Bruddlasten leses av og noteres.



Figur 3.6(1) Terninger og sylinder tatt ut av vannbadet (2) trykkprøving av terning (3) trykkprøving av sylinder

3.6 Kjemediel

3.6.1 Hensikt

Allerede etter første støping med bruk av pulveret, og første trykkmåling ble det tydelig at det oppsto noen kjemiske reaksjoner i betongen. Det var derfor viktig å finne ut hvilke reaksjoner som oppsto i betongen.

3.6.2 Metode

1. Sammensetningen av sementen og pulveret skal finnes
2. En kjemiker kontaktes og møtetidspunktet avtales
3. På møte med kjemikeren skal det diskuteres forskjellige reaksjoner som kan være mulig.
4. Mulige kjemiske reaksjoner velges ut fra opplevelser fra laboratorium.
5. Reaksjoner bekreftes av kjemiker.

4 Resultater

4.1 Betongstøping

Betongstøpingen resulterte med sterkt ammoniakklukt, som svidde i øyene og gjorde det vanskelig å puste.

I tillegg hadde pulveret størkningsretardende effekt på betongen. Vanligvis tar man betongen ut av formen etter 24 timer og legger terningene i et vannbad. Når pulveret var innblandet i betongen, holdt det ikke med 24 timer i formen. Det var nesten umulig å ta terningene ut av formen fordi betongen var for våt og kunne miste sin form. Hvis betongterningene mister form, kan det ha konsekvenser for trykkprøving. Ujevn belastning ved trykkprøvingen gir dårlige og unøyaktige resultater.

Siden 24 timer ble for kort tid for at betongen kunne størkne ble terningene tatt ut av formen etter 48 timer.

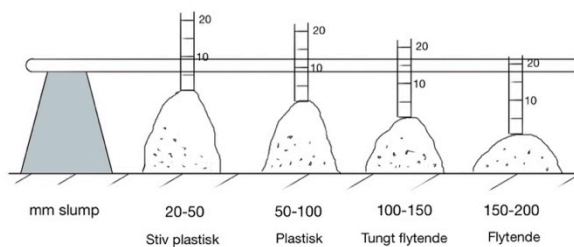
For case 4 (15%) og 5 (20%) var 48 timer litt lite. Etter at terninger fra case 4 og 5 ble tatt ut av formene etter 48 timer ble noe av betongen igjen på sideveggene av formen (se figur 4.1)



Figur 4.1 Pulverets størkningsretardende effekt på betong

4.2 Slump

Casenr.	Type	Synkmål (cm)
Case 1	A	17
Case 2	B	16,5
Case 3	C	17,5
Case 4	D	12
Case 5	E	18
Case 6	A+	10
Case 7	B+	4
Case 8	E+	13



Figur 4.2 Synkmål oppgitt i cm



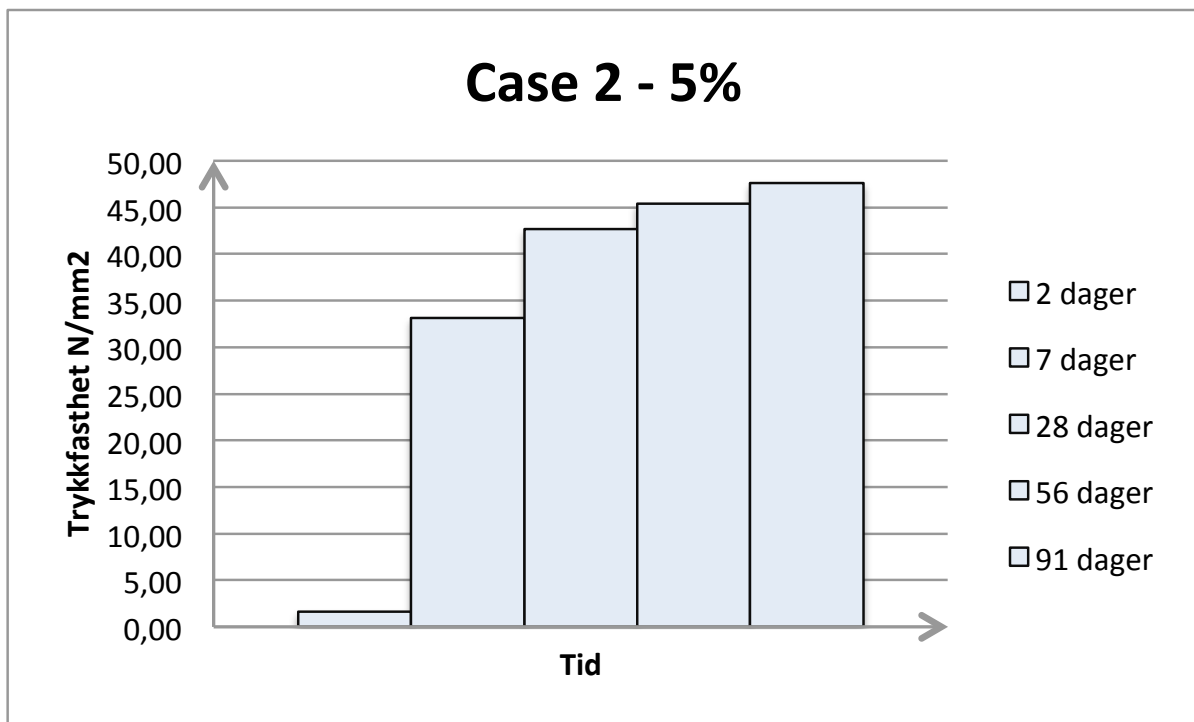
Figur 4.3 Synkmåling

4.3 Trykkfasthet - Case1



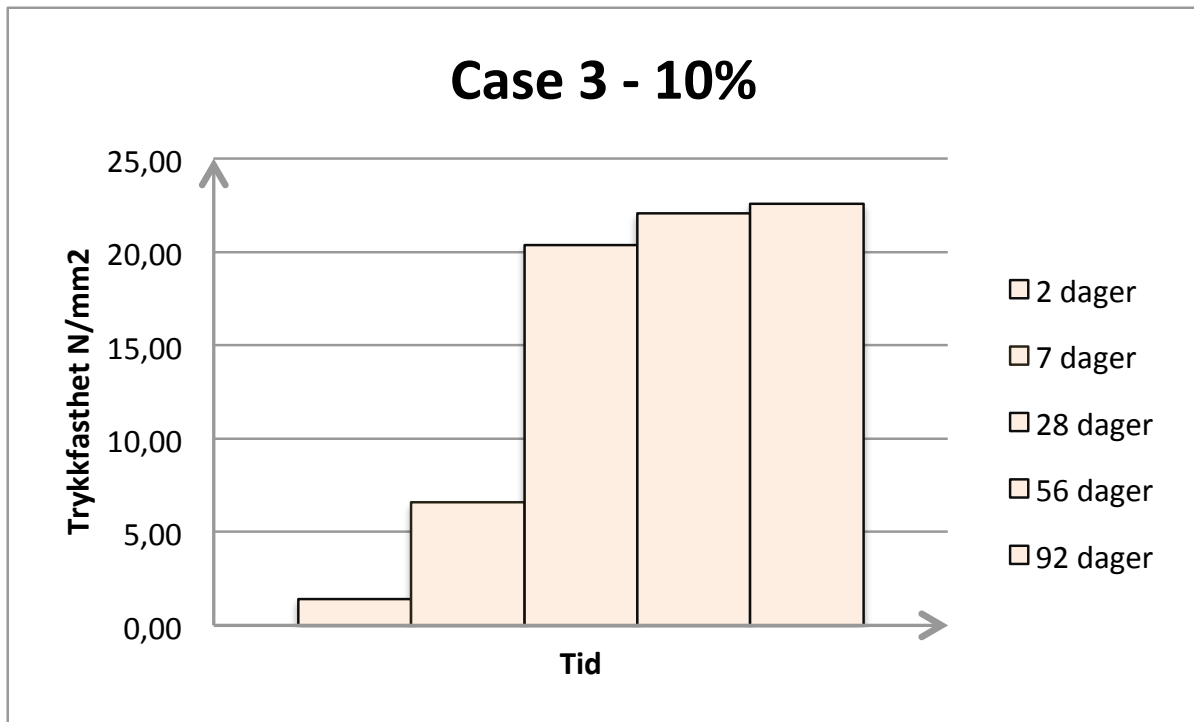
Figur 4.4 Ren B30 betong med 0% pulver og 100% sement

4.4 Trykkfasthet - Case 2



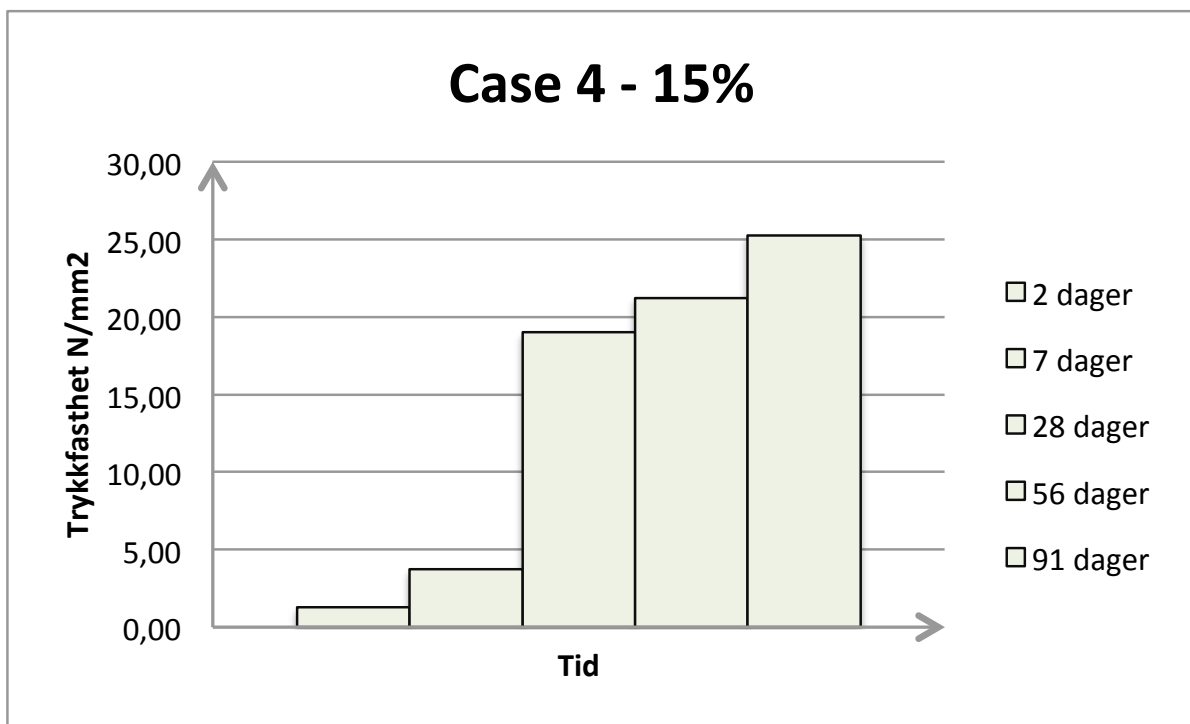
Figur 4.5 B30 betong med 5% pulver og 95% sement

4.5 Trykkfasthet - Case 3



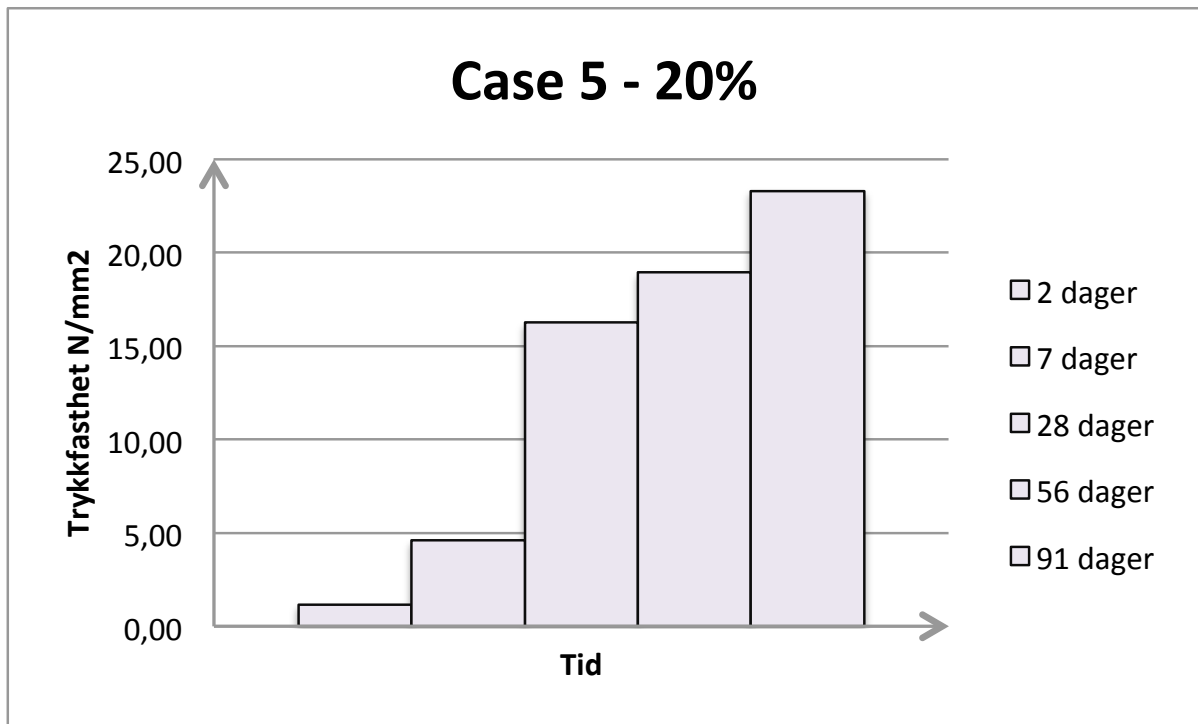
Figur 4.6 B30 betong med 10% pulver og 90% sement

4.6 Trykkfasthet - Case 4



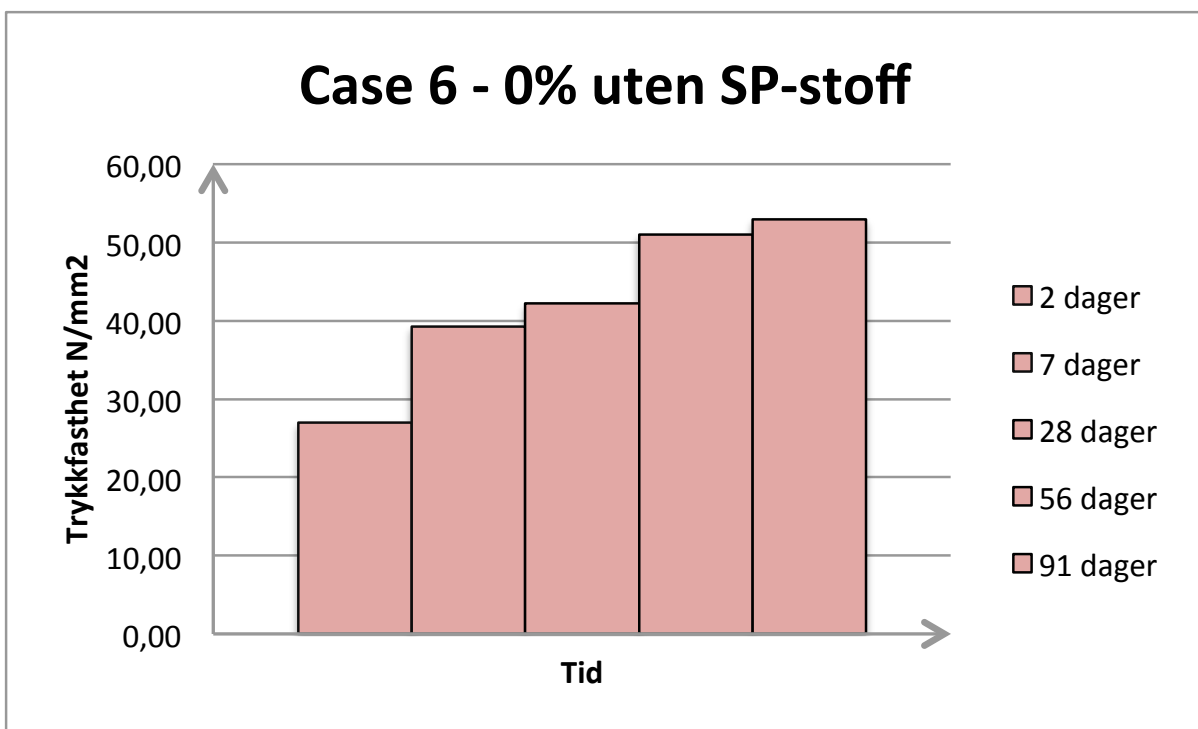
Figur 4.7 B30 betong med 15% pulver og 85% sement

4.7 Trykkfasthet - Case 5



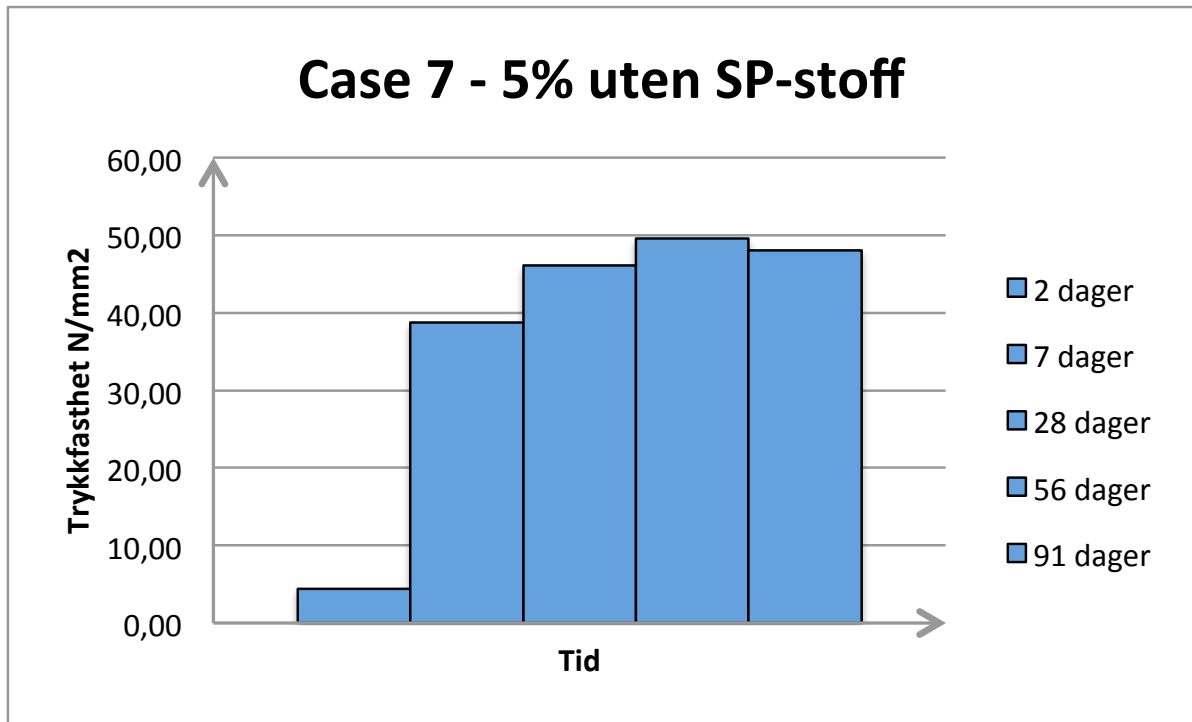
Figur 4.8 B30 betong med 20% pulver og 80% sement

4.8 Trykkfasthet - Case 6



Figur 4.9 Ren B30 betong med 0% pulver 100% sement uten SP-stoff

4.9 Trykkfasthet - Case 7



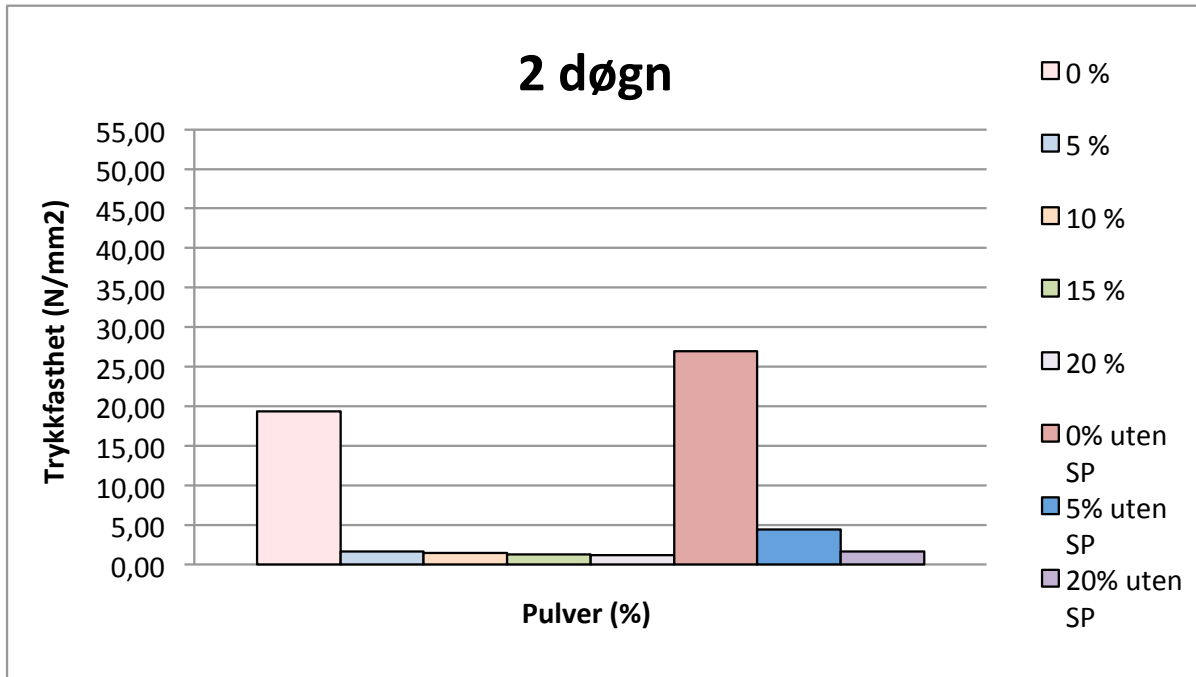
Figur 4.10 B30 betong med 5% pulver og 95% sement uten SP-stoff

4.10 Trykkfasthet - Case 8



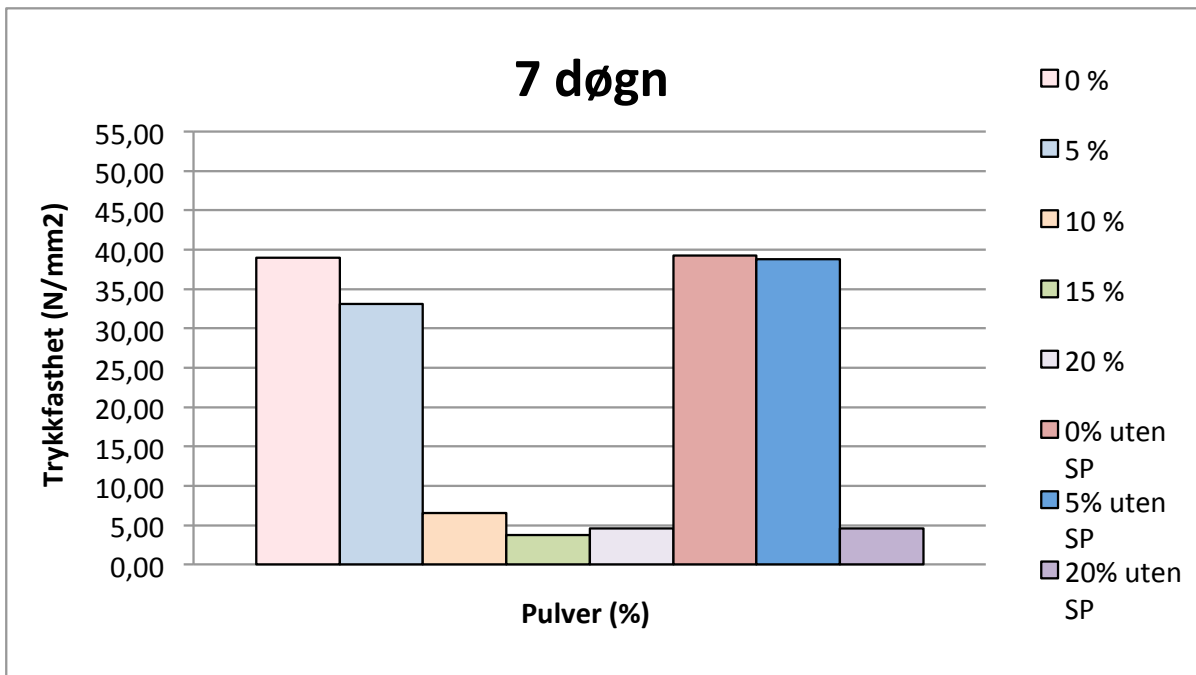
Figur 4.11 B30 betong med 20% pulver og 80% sement uten SP-stoff

4.11 2 dagers trykkfasthet



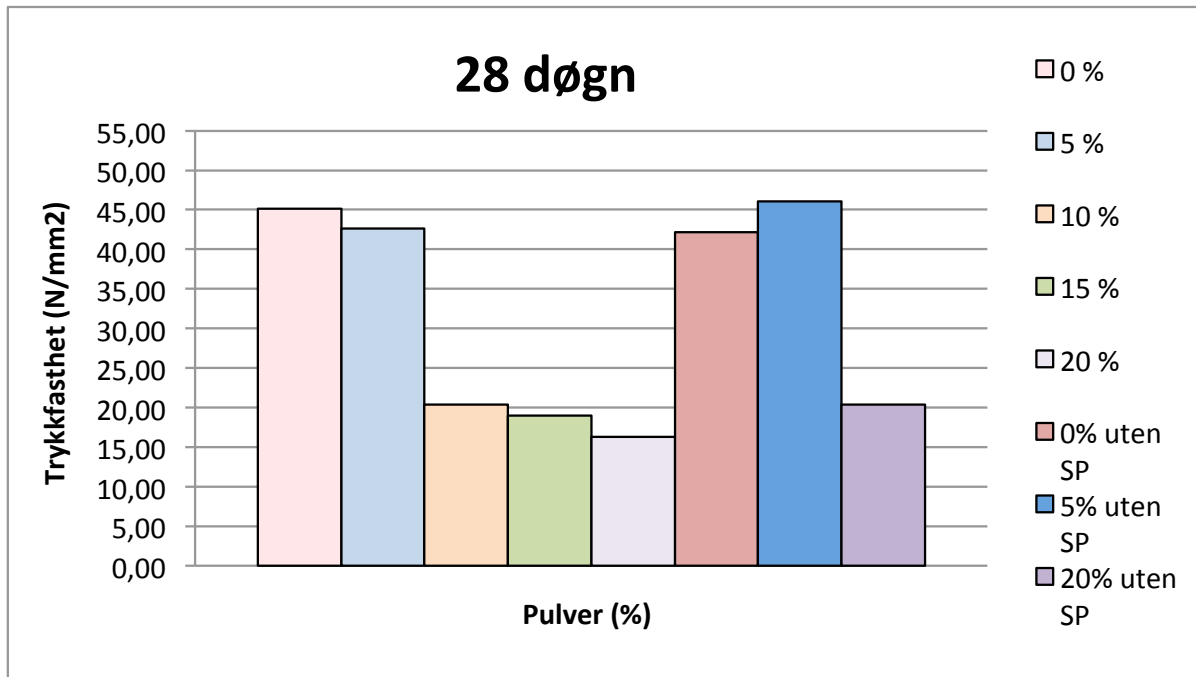
Figur 4.12 2 dagers trykkfasthet

4.12 7 dagers trykkfasthet



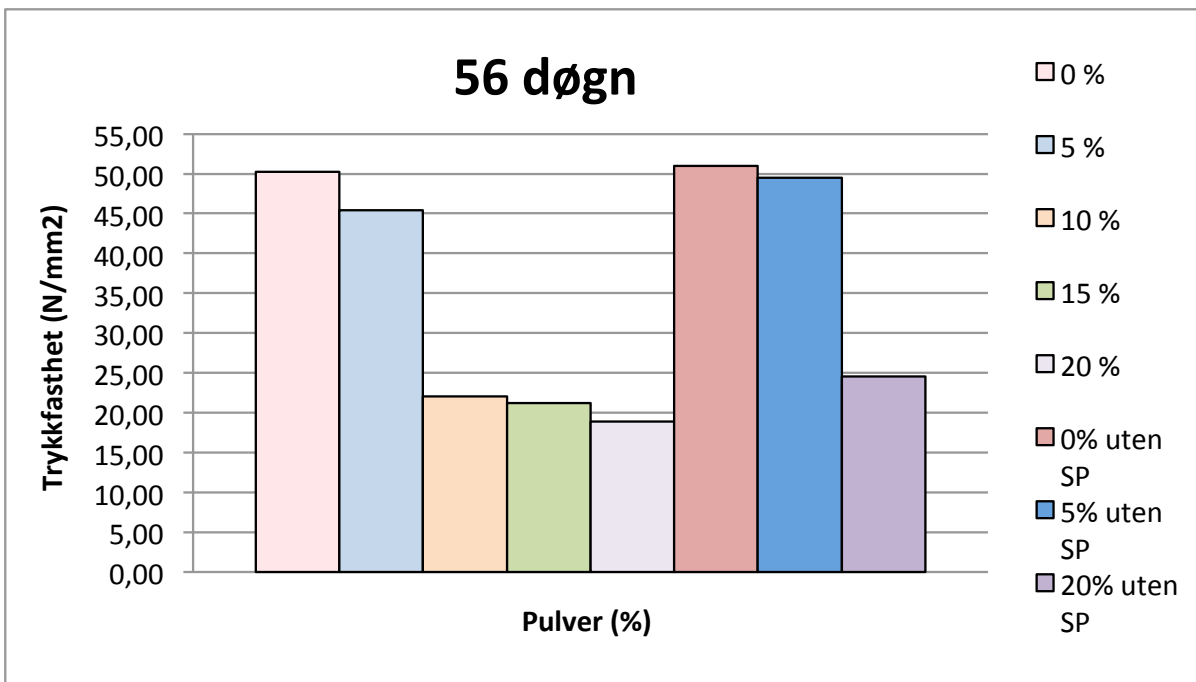
Figur 4.13 7 dagers trykkfasthet

4.13 28 dagers trykkfasthet



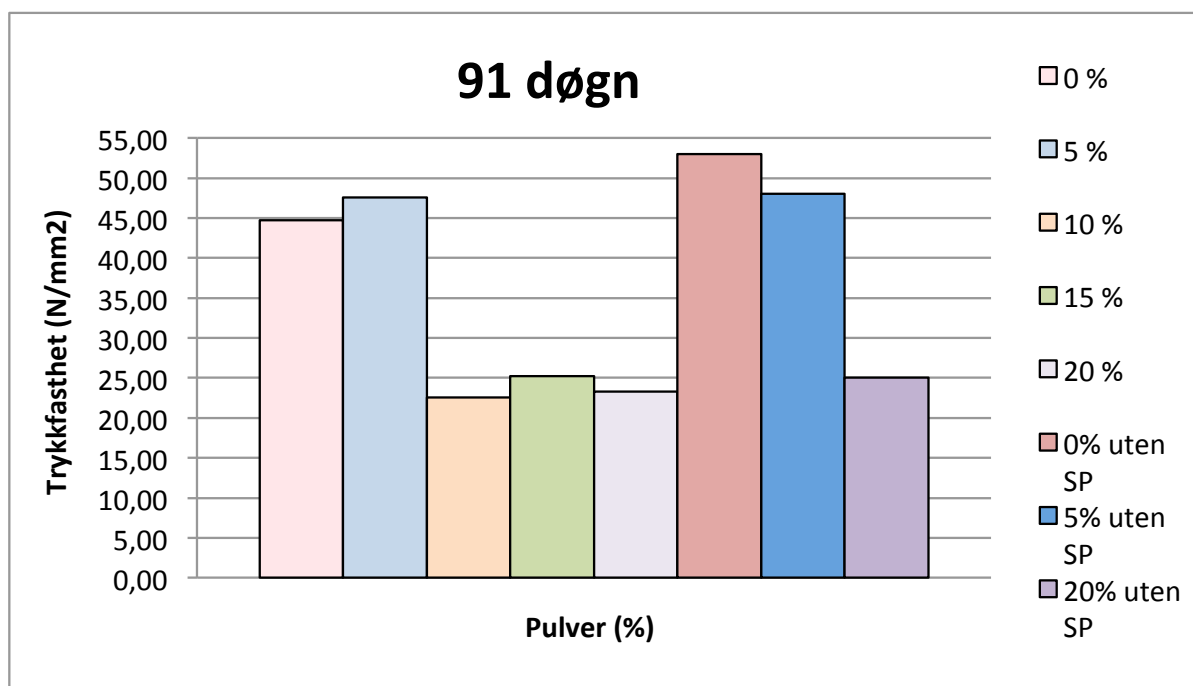
Figur 4.14 28 dagers trykkfasthet

4.14 56 dagers trykkfasthet



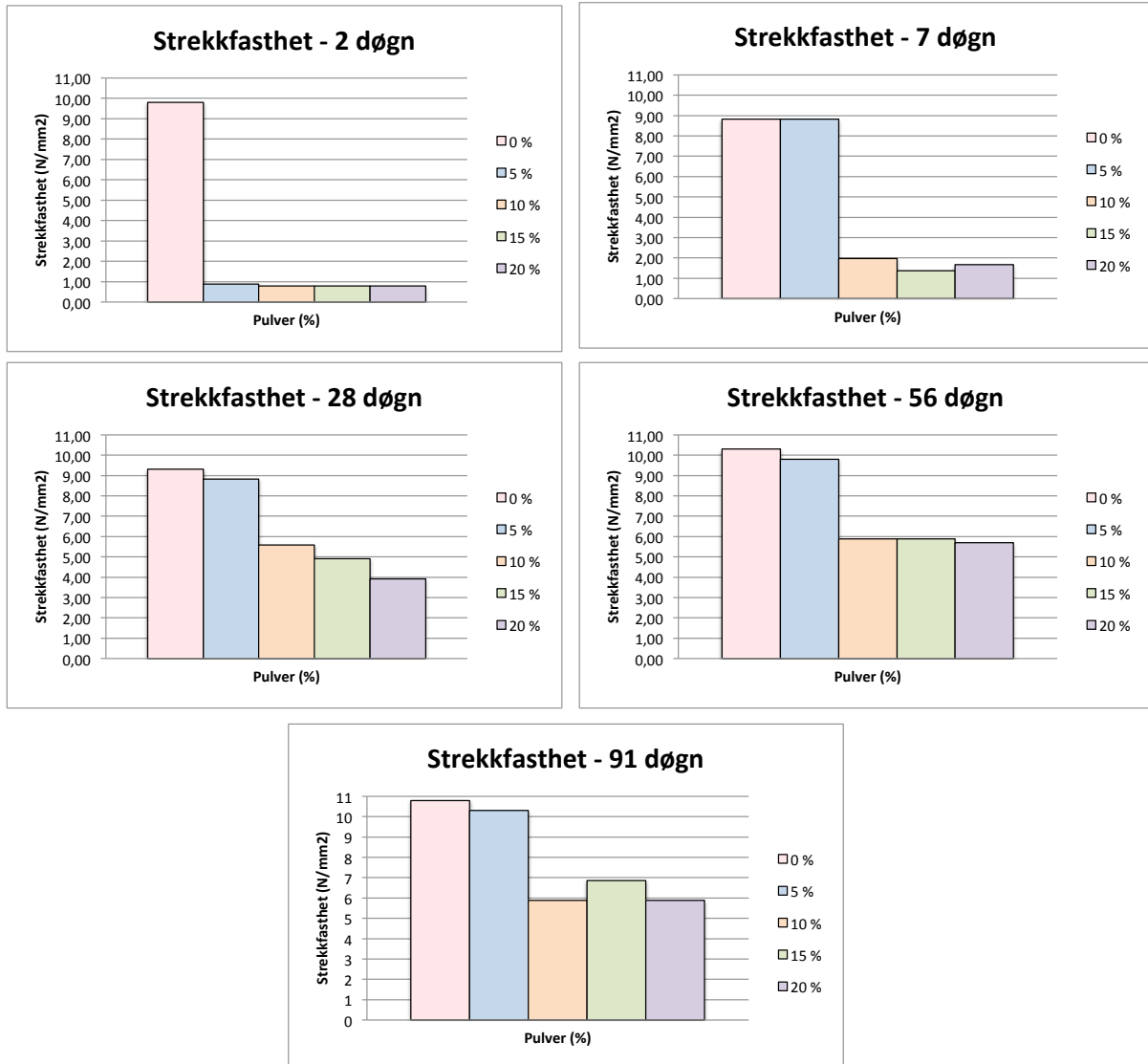
Figur 4.15 56 dagers trykkfasthet

4.15 91 dagers trykkfasthet



Figur 4.16 91 dagers trykkfasthet

4.16 Strekkfasthet



Figur 4.17 Strekkfasthet

4.17 Bilder



Figur 4.18 Trykte betongterninger – måling av trykkfasthet



Figur 4.19 Trykte betongsylindere - måling av strekkfasthet

5 Diskusjon

Ut fra resultatene kan en fort se at betongen mister mye av sin fasthet etter innblanding av pulveret. I tillegg har pulveret størkningretarderende effekt på betongen. Grunnen til dette er kjemiske reaksjoner som oppstår mellom sementen, vannet og pulveret. Hvor mye betongegenskapene blir svekket avhenger av mengden pulver en tilsetter, og sementmengden i betongen. Jo større mengde pulver som blandes inn i betongen, jo større er sannsynligheten for at kjemiske reaksjoner oppstår. Stort sett hele diskusjonen tar utgangspunkt i kapittel 2.5 og resultatene. I kapittel 2.5 kan en lese at stoffer, som pulveret består av, reagerer veldig lett med stoffer i sementen, når vann er tilstede, og danner blant annet sulfater, syrer, gips, vann og fosfater i form av salter.

Fasthet

Fastheten til betongen med innblandet pulver blir betydelig mindre, noe som kan observeres i resultatkapitlet 4.3 – 4.16. Grunnen til dette er både sulfat- og syreangrepene i betongen (se kap. 2.5.2, 2.5.3), men også økt v/c-tall (2.5.4).

Sterk lukt av ammoniakk under betongblandingen kan indikere at mye ammonium fra pulveret reagerer med basene i sementen og danner ammoniakk-gass og vann (se fig. 2.5.9). Fra kapitlet 2.5.1 vet man at dette fører til at mange sulfater dannes. De fleste sulfatene som oppstår har sterk eller meget sterk angrepsgrad på betongen (se tabell 2.3). Det dannes flest Na_2SO_4 , siden dette stoffet er lettest løselig i vann. Dermed dannes K_2SO_4 , CaSO_4 og MgSO_4 . Sulfater ødelegger klinkermaterialet C_3A i betongen ved å binde til seg vann og danne ettringitt (se fig. 2.5.3). Dette fører til at volumet til stoffet øker bestandig, og betongen ”sprenger”.

Sulfatet MgSO_4 (se fig. 2.5.13) ødelegger C-S-H gelen i betongen og danner M-S-H forbindelser som ikke er bindende, i motsetning til C-S-H gelen som er limet i betongen (se kap. 2.5.2). Dermed kan en si at MgSO_4 er et sulfat samtidig som den oppfører seg som syre.

Som beskrevet i kapittel 2.5.1 er det også mulighet for at det dannes noen syrer. Dette er syrer som har sterkt angrepsgrad på betongen. Under innblandingen av pulveret oppstår det svovelsyre og superfosfat (se fig. 2.5.19, 2.5.20 og 2.5.21), men det kan også oppstå salpetersyre. Under hydratiseringen frigjøres det massevis av energi og varme utvikles. Dette kan føre til at det dannes nitrogenoksid i luftporene i betongen, som igjen løser seg i vann og danner salpetersyre som har meget sterkt angrepsgrad på betongen.

Syrer ødelegger betongen på en annen måte enn sulfater. Syrer angriper klinkermaterialer C_3S og C_2S som blandet med vann danner limet i betongen, dvs. C-S-H gelen (se kap. 2.5.3).

Som nevnt tidligere er betongen veldig basisk, og derfor kan syrer angripe betongen og bryte den ned. Nedbrytingen skjer ved at C-S-H gelen blir omdannet til nye forbindelser som ikke har fullt så mye bindende effekt.

Sammen med ammoniakk dannes det også vann i betongen (se fig. 2.5.9). Vannet som oppstår øker v/c-tallet i betongen. Fra kapittel 2.2.2.1 vet man at økt v/c-tall har negativ påvirkning av fastheten.

Observasjonen i laboratorium viser også at reaksjonene som oppstår pga. reaksjonen mellom ammonium og OH^- (se fig. 2.5.11 – 2.5.18), vil angripe betongen som beskrevet ovenfor, men noen av disse vil ligge i betongen i form av små partikler og bidra til at fastheten blir ødelagt siden disse ikke har noe fasthet. For eksempel $CaSO_4$ som kalles også gips. Gipsen er ikke trykkfast og er i tillegg et veldig sprøtt materialet. Blandet med vann oppstår det en bløt masse som igjen ikke gir noe fasthet. Et annet eksempel er salter som natriumfosfat (Na_3PO_4), kaliumfosfat (K_3PO_4) og kalsiumfosfat ($Ca_3(PO_4)_2$). Disse ligger i betongen og er synlige som små salter. Dette er vanskelig å observere på bildet, men veldig lett å se i virkeligheten. Figur 5.1 (A) viser knust prøveterning av ren betong uten pulver og figur 5.1 (B) viser knust betongterning med 20% pulver. Terningen på figur A er mer fast, mens terningen på figur B er mindre fast, inneholder salter og er mer porøs og fuktig.



Figur 5.1

Et annen observasjon fra laboratoriet er at prøver med 5% pulver ikke har mistet like mye fasthet som 10, 15 og 20% (se kap. 4.11-4.15). Dette er fordi det er kun 5% av sementmengden som byttes ut med pulver, og dermed er det for lite pulvermengde til at det oppstår nok kjemiske reaksjoner som ødelegger fastheten fullt så mye.

Som nevnt i kapittel 2.5.1 vil ammonium i pulveret først reagere med OH fra 2NaOH , deretter med 2KOH osv, fordi disse løser seg lettest i vannet. Da dannes det ammoniakkgass, vann, aggressive salter Na_2SO_4 , K_2SO_4 og salter Na_3PO_4 , K_3PO_4 . Det er fullt mulig at pulveret kun klarer å bruke opp NaOH . Da dannes det kun litt vann, natriumsulfat (Na_2SO_4) og natriumfosfat (Na_3PO_4). Disse reaksjonene som oppstår, ødelegger fastheten til betongen i liten grad, og derfor har ikke betong med 5% pulver like mye fasthet som betong med 0% pulver, men samtidig er den mye sterkere enn betong med 10,15 og 20% pulver.

Alle reaksjonene som er beskrevet ovenfor skjer inn i betongen, og påvirker fastheten innefra. Nesten alle reaksjoner som ble beskrevet i kapittel 2.5, ble observert ved å sette betongterninger i vannbad med forskjellige sulfater og syrer. Betongen ble da angrepet fra utsiden. I denne oppgaven oppstår alle reaksjonene inne i betongen, allerede under blanding av betongen. Siden disse kjemiske reaksjoner har så stor effekt på betongen, som er herdet under vanlige betingelser, er det ikke så rart at betongen blir så dårlig når reaksjonene oppstår før betongen får hydratisere og herde ordentlig.

I resultatene kan man observere at på noen grafer (se kap. 4.13 og 4.15) får betong, med 5% pulver, større trykkfasthet enn ren betong. Dette kan skyldes for få prøveterninger. Hadde man utført flere trykkmålinger ville gjennomsnittet vært annerledes. Jo flere prøveterninger man utfører trykkstester på, jo bedre og mer troverdige resultater får man.

Størkningsretarderende effekt

Som nevnt tidligere ødelegger sulfater C_3A i sementen ved å danne ettringitt (se kap. 2.5.2). Klinkermaterialet C_3A bidrar til hurtig fasthetsutvikling og er derfor viktig i forhold til betongens størkningsforløp. Når dette klinkermaterialet blir ødelagt, tar størkningen lengere tid. Jo mer pulver som blandes inn i betongen jo flere C_3A blir ødelagt i sementen og størkningen tar lengere tid. Derfor holdt det ikke med 24 timer størkning i formen for case 2 (5% pulver) og 3 (10% pulver), og derfor var 48 timer størkning i formen for lite for case 4 (15% pulver) og 5 (20% pulver).

Synkmål

Økt v/c-tall i betongen er resultatet av kjemiske reaksjoner som oppstår når man blander pulveret inn i betongen (se kap. 2.5.4). V/c-tallet blir større jo mer pulver man tilsetter, fordi da er det flere ammonium-atomer som reagerer med OH- ionene og det dannes mer vann. Synkmålet blir større, jo større blir pulvermengden i betongen. Når vannmengden økes, uten at alt annet forandres, blir avstanden mellom partiklene større, og disse vil flytte lettere om hverandre (se kap. 2.2.1.1). Fra resultatene kan man observere at synkmålet for case 2(5%) er mindre enn alle andre synkmålene, til og med case 1 (0%) (se kap. 4.2).

Grunnen til dette kan være at pulveret gir en mengde finstoff til betongen, som gjør at overflatearealet blir større, og dermed trengs det mer vann til å dekke alle overflatene og fylle alle hulrom. Og samtidig er 5% pulver for liten mengde til å danne nok mengde vann av reaksjonen mellom ammonium og OH-ioner, for at synkmålet skal være minst like stor som i case 1 (0% pulver).

Betongens pH verdi

Betongens pH-verdig vil synke fordi det vil oppstå syrer i betongen. Syrer har mindre pH enn 7, og dermed vil pH- verdien til betong gå fra basisk (pH 13-14) til surt (>7).

Armeringen vil ikke være beskyttet mot korrosjon når pulveret blandes inn i betongen.

Dette vil ha nesten samme effekt på betongen som karbonatisering (se kap. 2.3.2.2), bortsett fra at nå er konsentrasjonen av syrer mye høyere enn kun ved karbonatisering.

Strekfasthet

Strekfastheten minker proporsjonalt med trykkfastheten, og utgjør ca. 20-25% av trykkfastheten. Dette er litt mer enn det som oppgis i teorikapitlet (se kap. 2.3.1.2). Der står det at strekkfastheten utgjør 10-20% av trykkfastheten. Men samtidig ble det kun utført 5 strekkprøver per blanding: en strekkprøve etter 2,7, 28, 56 og 91 dager. Derfor er det veldig sannsynlig at hvis en utførte flere strekkprøver hver gang man testet strekk, ville resultatene bli mer tilnærmet teorien.

6 Konklusjon

Ved å erstatte en prosentvis mengde av sementen i betongen med pulver fra kasserte brannslukningsapparater, påvirkes betong negativt. I tillegg til at pulveret ødelegger viktige egenskaper i betongen, dannes det sterkt ammoniakklukt under betongblandingen. Lukten er stikkende og fører til svie i øyne, munn og nese samt hevelser i luftveiene.

Fastheten, spesielt trykkfastheten, blir påvirket av sulfater, syrer, salter, gips og større v/c –tall som dannes ved reaksjoner mellom pulveret, sementen og vannet. Fastheten blir betydelig redusert, og betongen blir svakere samt sprøere pga. salter og gipsen som blir liggende i betongen. Tidligfastheten for betong med pulver blir veldig dårligsammenlignet med i vanlig betong og utgjør ca. 7% av tidligfasthet til vanlig betong.

Etter 28 dager får betong med 5% pulver 94% av fastheten til betong med 0%, mens resten får kun 40% fasthet.

Reaksjonen mellom pulveret, sementen og vannet gir også som nevnt tidligere økt forhold mellom vann og sement (v/c-tall), noe som påvirker slumpen. Synkmålet blir større, enn synkmålet for ren betong, jo større mengde pulver som blandes inn i betongen. Med unntak for betong med 5% pulver, for i dette tilfellet ble synkmålet mindre enn ren betong.

Større slump kan ha positive konsekvenser for konsistensen av betongen. Den vil fylle ut formen bedre og lettere, men samtidig ødelegger den fastheten til betongen som er viktigere egenskap enn konsistensen. Konsistensen kan enkelt forbedres med tilsetningsstoffer.

Pulveret påvirker også størknigsegenskapene til betongen og gjør at størkningstiden forlenges. Dette er også avhengig av hvor mye pulver tilsettes betongen. Jo mer pulver blandes inn, jo lenger blir størkningstiden. Vanlig betong størkner på under 24 timer, betong med 5% og 10% størkner på under 48 timer, mens betong med 15% og 20% pulver trenger mer enn 48 timer for å størkne.

Konklusjonen er at pulver fra kasserte brannslukningsapparater ikke egner seg for gjenbruk i betong. Det oppstår for mange kjemiske reaksjoner, og dannes for mange stoffer som angriper betongen, og påvirker den negativt.

7 Videre arbeid

Videre arbeid bør bestå av å bruke pulveret fra kasserte brannslukningsapparater i polymerbetong (ikke-sementbasert betong). Denne betongtypen er mye mer bestandig mot syre- og sulfatangrep.

8 Referanser

- Byggutengrenser. Miljø - *Mur og betong, de miljøvennlige byggematerialene*. Lokalisert 24.02.2016 på World Wide Web:
<http://www.byggutengrenser.no/filer/nedlasting/Miljobrosjyre.pdf>
- Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap. (1990). *Forskrift om brannforebyggende tiltak og brannsyn nr. 0546. Kapittel 5 Spesielle tekniske krav til boliger*. Lokalisert 20.03.2016 på World Wide Web:
<http://oppslagsverket.dsb.no/content/arkiv/brannvern/Forskrift-om-brannforebyggende-tiltak-og-brannsyn/>
- GPBM Nordic AS. (2011). *Sikkerhetsdatablad – ABC brannslukningsapparat*. Lokalisert 07.01.2016 på World Wide Web:
http://images.clasohlson.com/medias/sys_master/9264494116894.pdf
- Maage, M. (1998a). *Praktisk betongteknologi. Kapittel 6 Fersk betong Støpelighet*. Konferanse Quality Lillehammer Hotel 1998.
- Maage, M. (1998b). *Praktisk betongteknologi. Kapittel 4 Herdnet betong*. Konferanse Quality Lillehammer Hotel 1998.
- Maage, M. (1998c). *Praktisk betongteknologi. Kapittel 5 Herdnet betong bestandighet*. Konferanse Quality Lillehammer Hotel 1998.
- Maage, M. (1998d). *Praktisk betongteknologi. Kapittel 3 Modeller til forklaring av betongegenskapene*. Konferanse Quality Lillehammer Hotel 1998.
- Myrdal, R. (2015). *Betongkjemi. Bindemidler og tilsetningsstoffer til betong*. Lokalisert 09.04.2016 på World Wide Web:
http://www.betong.net/ikbViewer/Content/932079/R_Myrdal__BETONGKJEMI__Stavanger_08.09.2015.pdf
- NORCEM. *God betong er bestandig*. Lokalisert 08.04.2016 på World Wide Web:
http://www.norcem.no/no/system/files_force/assets/document/b6/14/552_bestandighet_brosj-hbo.pdf?download=1
- SINTEF Byggforsk. (2009). 520.061 *Armeringskorrosjon*.
- SINTEF Byggforsk. (2010). 572.207 *Tilsetningsstoffer i betongen*.
- SINTEF Byggforsk. (2012). 572.115 *Tilslagsmaterialer for betong*.
- SINTEF Byggforsk. (2015). 520.031 *Kvalitetskontroll og dokumentasjon av herdnet betong-laboratoriemetoder*. 3 s.
- SINTEF Byggforsk. (2016). 572.204 *Sement. Typer, egenskaper og bruksområder*. 5 s.

- StatensVegvesen. (1996). *14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder*.
- StatensVegvesen. (2005). *14.622 Konsistens; synkmål, vebetall og utbredningsmål*
- StatensVegvesen. (2007). *Rapportnr. 2490 Prosjekter 2006 – Materialteknisk seksjon*.
Lokalisert 09.04.2016 på World Wide Web:
http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/190175/Fou_prosjekter_2006_materialteknisk.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- StoreNorskeLeksikon. (2009). *Betong-historie*. Lokalisert 26.01.2016 på World Wide Web:
<https://snl.no/betong/historie>.
- Søpler, B. (2004a). *Betongboka. Kapittel 1 Betongens utvikling*. 2. utgave utg.: Gyldendal undervisning.
- Søpler, B. (2004b). *Betongboka. Kapittel 3 Herdet betong*. 2. utgave utg.: Gyldendal undervisning.
- Søpler, B. (2004c). *Betongboka. Kapittel 4 Delmaterialer*. 2. utgave utg.: Gyldendal undervisning.
- Søpler, B. (2004d). *Betongboka. Kapittel 5 Hvordan delmaterialene virker inn på betongens egenskaper*. 2. utgave utg.: Gyldendal undervisning.
- Søpler, B. (2004e). *Betongboka. Kapittel 9 Herding*. 2. utgave utg.: Gyldendal undervisning.
- Sørensen, C. (2013). *TBA321 Betongmaterialteknologi*: NMBU. Forelesningshefte
- Trygg og sikker. (2002). *Pulverappart, klasse ABC/BC/D*. Lokalisert 05.01.2016 på World Wide Web: <http://www.tryggogsikker.no/html/93.html>

9 Figurliste

Figur 2.1 Produksjon av sement (inspirert av figur 4.2 i betongboka).....	11
Figur 2.2 Tilslagsinndeling (inspirert av figur 4.10 i Betongboka).....	13
Figur 2.3 Siktekurve for samlet tilslag (inspirert av figur 4.21 i betongboka	15
Figur 2.4 Hovedegenskaper ved støpelighet	19
Figur 2.5 Konsistens på betongen (inspirert av figur 5.2 i betong boka).....	20
Figur 2.6 Effekt av total vannmengde på støpeligheten av betongen (inspirert av figur 24 i Praktisk betongteknologi (3)).....	21
Figur 2.7 Effekten av tilslagets kornstørrelse på støpeligheten (inspirert av figur 25 i Praktisk betongteknologi kap.3).....	21
Figur 2.8 (A) Dårlig pakningsgrad og (B) god pakningsgrad av tilslag (inspirert av figur 5.5 i betongboka).....	23
Figur 2.9(A) Vannseparasjon og (B) Mørtelseparasjon (inspirert av figur 3 i praktisk betongteknologi kap. 6).....	24
Figur 2.10 Hydratisering (inspirert av figur 3 i praktisk betongteknologi kap. 3).....	25
Figur 2.11 Kapillarporer.....	26
Figur 2.12 Fordeling av fast stoff og porer i fullstendig hydratisert betong (inspirert av figur 5 i praktisk betongteknologi kap. 3).....	26
Figur 2.13 Fasthetsutvikling.....	27
Figur 2.14 Støperetningen og trykkretningen.....	29
Figur 2.15 Forhold mellom trykkfasthet og v/c-tall (inspirert av figur 1 i praktisk betongteknologi kap. 4).....	30
Figur 2.16 Strekkspenninger - singel vs. pukk.....	31
Figur 2.17 Strekkprøving av betong.....	31
Figur 2.18 Arbeidsdiagram betong.....	32
Figur 2.19 Korrosjonsforløpet (inspirert av figur 1 i praktisk betongteknologi kap. 5).....	35
Figur 2.20 Kabonatisering (inspirert av figur figur 11 i byggforskserien 520.061).....	36
Figur 2.21 Riss gir dypere karbinatiseringsfront (inspirert av figur figur 344 i byggforskserien 520.061).....	37
Figur 3.1 Våt sand, tørr sand og siktemaskin.....	49
Figur 3.2 Prosedyre for betongstøping i bilder.....	52
Figur 3.3 Størkningsretarderende effekt av pulveret.....	54
Figur 3.4 Måling av slump	55

Figur 3.5 Slumpmåling i bilder	55
Figur 3.6(1) Terninger og sylinder tatt ut av vannbadet (2) trykkprøving av terning (3) trykkprøving av sylinder	57
Figur 4.1 Pulverets størkningsretardendeeffekt på betong.....	58
Figur 4.2 Synkmål oppgitt i cm.....	59
Figur 4.3 Synkmåling	59
Figur 4.4 Ren B30 betong med 0% pulver og 100% sement	60
Figur 4.5 B30 betong med 5% pulver og 95% sement.....	60
Figur 4.6 B30 betong med 10% pulver og 90% sement.....	61
Figur 4.7 B30 betong med 15% pulver og 85% sement.....	61
Figur 4.8 B30 betong med 20% pulver og 80% sement.....	62
Figur 4.9 Ren B30 betong med 0% pulver 100% sement uten SP-stoff	62
Figur 4.10 B30 betong med 5% pulver og 95% sement uten SP-stoff.....	63
Figur 4.11 B30 betong med 20% pulver og 80% sement uten SP-stoff.....	63
Figur 4.12 2 dagers trykkfasthet.....	64
Figur 4.13 7 dagers trykkfasthet.....	64
Figur 4.14 28 dagers trykkfasthet.....	65
Figur 4.15 56 dagers trykkfasthet.....	65
Figur 4.16 91 dagers trykkfasthet.....	66
Figur 4.17 Strekkfasthet	67
Figur 4.18 Trykte betongterninger – måling av trykkfasthet	68
Figur 4.19 Trykte betongsylindere - måling av strekkfasthet	68
Figur 5.1	70

10 Tabelliste

Tabell 2.1 Kjemisk sammensetning av sement (oppgitt av Norcem).....	11
Tabell 2.2 Trykkfasthet gitt etter NS EN 1992-1-1:2004+NA2008 (tabell 3.1)	29
Tabell 2.3 Grenseverdier for totalt kloridinnhold i betongen (inspirert av figur 473 i Byggforskserien 520.061)	38
Tabell 2.4 Angrepsgrad for aggressive salter	45
Tabell 2.5 Angrepsgrad for syrer	46
Tabell 3.1 Case-fordeling	47
Tabell 3.2 Original resept for 1m ³ B30M60 betong.....	49
Tabell 3.3 Endelige betongreseppter for ulike case	50

11 Vedlegg

11.1 Vedlegg 1 – Blanderesept

Betongresept fra Bernt Kristiansen

NorBetong

Slemmestad

09.05.16

B30M60		Dato	Silikafaktor	Pasta volum	Matriks volum	Luftinnhold	Utført av: BK		
D16 Std FA		09/05-16	k = 0	321,6	377,9 Liter	4,5 %	Godkjent av:		
Betegnelsen	Navn	Kg	Kg / m ³	Vekt %	Vekt %	% Cl ⁻ av	% Reaktive	Vekt %	
Delmaterialer	Leverandør	Densitet	Densitet	fukt	Alkalier	Delmaterial	bergarter	Absorbent	
Tilsatt vann	Rent	185,3	1000	100					
Sement	Norcem	350,0	2950	0	1	0,08			
Pulver	Norcem	0,0	3150	0	0,55	0,08			
Silika	Fesil				0,46	0,03			
Sand 0-2		0,0		0				0,4	
Sand 0-8	Norcem	890,0	2660	1,9		0,001	0,1	0,4	
Pukk 11-16	Norcem	805,0	2700	0		0,001	0,1	0,8	
Pukk 16-22	?	0,0	2700	0		0,001	0,1	0,8	
SP-stoff	Mapei	1	1006	82	4,3	0,002			
		0	1000	82	2	0,005			
Mapeair 25, 1-9	Mapei	0	1000	99	0	0,005			
Fritt vann	$m = \frac{v}{(c+k-s)}$	Total vekt	Totalt volum	Totalt vann	Vekt alkalier	Cl ⁻ av klinker	Reakt. berg.	Abs. vann	
203,0 Kg	0,58	2231,3 Kg	0,982 m ³	213,0 Kg	3,5 Kg	0,1 %	0,1 %	10,0 Kg	
					% andel i =>	0,0 %	52,5 %	47,5 %	0,0 %
					totalkurve	Sand 0-2	Sand 0-8	Pukk 11-16	Pukk 16-22
					[32] = 00,0		0,0	0,0	
					[16] = 02,7		0,0	5,6	
					[8] = 41,8		2,1	85,6	
					[4] = 52,8		11,1	98,9	
					[2] = 58,1		21,0	99,1	
					[1] = 66,7		37,3	99,1	
					[0,5] = 80,9		64,5	99,1	
					[0,25] = 93,2		87,8	99,1	
					[0,125] = 98,2		97,3	99,2	
					[bunn] = 100,0		100	100	
					Fm = 4,45	Fm = 0,00	Fm = 2,73	Fm = 6,36	Fm = 0,00

Betongresept 0%.xls

Hovedresept 0%

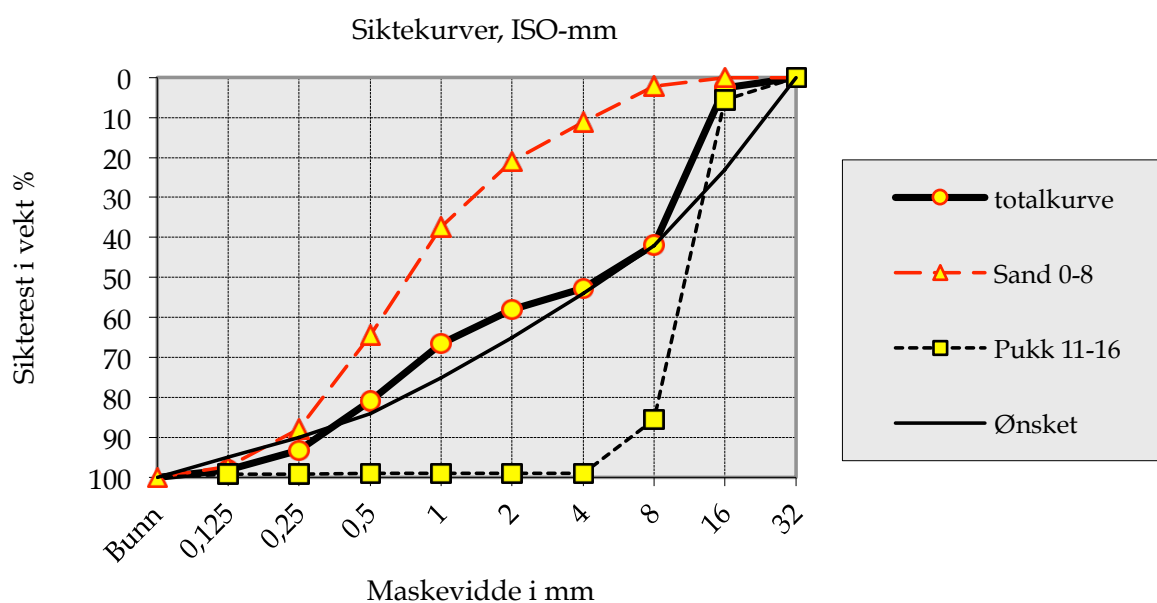
Bjørn Arne Johansen

Menge i kilogram for 17 former ved:						
	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %	tilslag 5 %
Vann	3,18	3,18	2,76	2,76	2,97	2,94
Sement	5,95	5,65	5,36	5,06	4,76	5,95
Pulver	0,00	0,30	0,60	0,89	1,19	0,30
Pukk 11-16	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69
Sand 0-8	15,13	15,13	15,13	15,13	15,13	15,13
Sp-stoff	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Totalt	38,0	38,0	37,5	37,5	37,8	38,0
Vanninnhold	1,9	1,9	4,51	4,51	3,1	

	0 %	5 %	20 %
Vann	2094	2094	2094
Sement	4200	3990	3360
Pulver	0	210	840
Pukk 11-16	9660	9660	9660
Sand 0-8	10680	10680	10680
Vanninnhold	3,2	3,2	3,2

11.2 Vedlegg 2 – Siktekurve

% andel i => totalkurve	0,0 % Sand 0-2	52,5 % Sand 0-8	47,5 % Pukk 11-16	0,0 % Pukk 16-22
[32] = 00,0		0,0	0,0	
[16] = 02,7		0,0	5,6	
[8] = 41,8		2,1	85,6	
[4] = 52,8		11,1	98,9	
[2] = 58,1		21,0	99,1	
[1] = 66,7		37,3	99,1	
[0,5] = 80,9		64,5	99,1	
[0,25] = 93,2		87,8	99,1	
[0,125] = 98,2		97,3	99,2	
[bunn] = 100,0		100	100	
Fm = 4,45	Fm = 0,00	Fm = 2,73	Fm = 6,36	Fm = 0,00

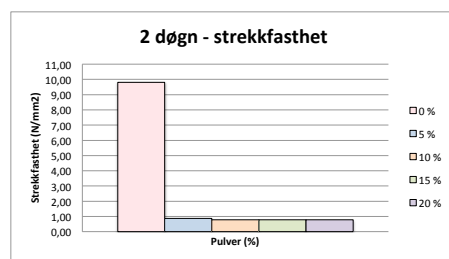
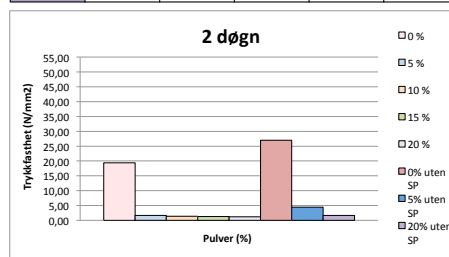


11.3 Vedlegg 3 – Resultater

Tester etter 2 døgn

Prøve nr.	Pulver (%)	Støping (dato)	Test (dato)	Herdetid (dager)	Synkmål (cm)	Trykk (tonn)	Strekk (tonn)	Vekt (g)
1A	0	07.12.15	09.12.15	2	17	26	-	2452
2A	0	07.12.15	09.12.15	2	17	20	-	2472
3A	0	07.12.15	09.12.15	2	17	28	-	2476
4A	0	07.12.15	09.12.15	2	17	5	-	2526
5A	0	07.12.15	09.12.15	2	17	-	10	3852
1B	5	12.12.15	14.12.15	2	16,5	1,5	-	2474
2B	5	12.12.15	14.12.15	2	16,5	1,6	-	2450
3B	5	12.12.15	14.12.15	2	16,5	1,8	-	2436
4B	5	12.12.15	14.12.15	2	16,5	1,8	-	2398
5B	5	12.12.15	14.12.15	2	16,5	-	0,9	3768
1C	10	15.12.15	17.12.15	2	17,5	1,5	-	2438
2C	10	15.12.15	17.12.15	2	17,5	1,4	-	2446
3C	10	15.12.15	17.12.15	2	17,5	1,4	-	2426
4C	10	15.12.15	17.12.15	2	17,5	1,5	-	2432
5C	10	15.12.15	17.12.15	2	17,5	-	0,8	3688
1D	15	18.12.15	20.12.15	2	12	1,4	-	2388
2D	15	18.12.15	20.12.15	2	12	1	-	2376
3D	15	18.12.15	20.12.15	2	12	1,2	-	2358
4D	15	18.12.15	20.12.15	2	12	1,6	-	2286
5D	15	18.12.15	20.12.15	2	12	-	0,8	3624
1E	20	20.12.15	22.12.15	2	18	1	-	2234
2E	20	20.12.15	22.12.15	2	18	1,1	-	2236
3E	20	20.12.15	22.12.15	2	18	1,5	-	2352
4E	20	20.12.15	22.12.15	2	18	1,1	-	2194
5E	20	20.12.15	22.12.15	2	18	-	0,8	3596
1A+	0	25.01.16	27.01.16	2	10	27	-	2416
2A+	0	25.01.16	27.01.16	2	10	28	-	2406
1B+	5	25.01.16	27.01.16	2	4	4,5	-	2380
2B+	5	25.01.16	27.01.16	2	4	4,5	-	2344
1E+	20	27.01.16	29.01.16	2	13	1,7	-	2288
2E+	20	27.01.16	29.01.16	2	13	1,7	-	2280

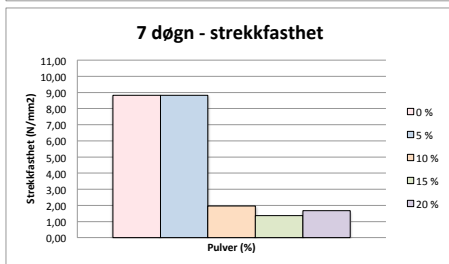
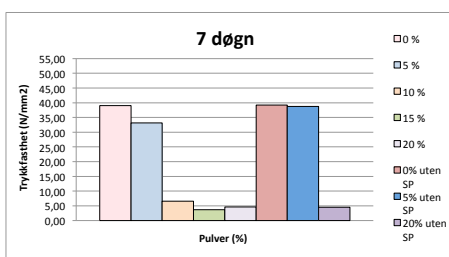
Type	Synkmål	Trykk gjennomsnitt	Trykk i N/mm2	Strekk	Strekk i N/mm2
A	17	19,75	19,37	10,00	9,81
B	17	1,68	1,64	0,90	0,88
C	18	1,45	1,42	0,80	0,78
D	12	1,30	1,28	0,80	0,78
E	18	1,18	1,15	0,80	0,78
A+	10	27,50	26,98	-	-
B+	4	4,50	4,41	-	-
E+	13	1,70	1,67	-	-



Tester etter 7 døgn

Prøve nr.	Pulver (%)	Støping (dato)	Test (dato)	Herdetid (dager)	Synkmål (cm)	Trykk (tonn)	Strekk (tonn)	Vekt (g)
6A	0	07.12.15	14.12.15	7	17	38	-	2482
7A	0	07.12.15	14.12.15	7	17	41	-	2506
8A	0	07.12.15	14.12.15	7	17	39	-	2482
9A	0	07.12.15	14.12.15	7	17	41	-	2492
10A	0	07.12.15	14.12.15	7	17	-	9	3816
6B	5	12.12.15	19.12.15	7	16,5	32	-	2458
7B	5	12.12.15	19.12.15	7	16,5	33	-	2396
8B	5	12.12.15	19.12.15	7	16,5	35	-	2402
9B	5	12.12.15	19.12.15	7	16,5	35	-	2440
10B	5	12.12.15	19.12.15	7	16,5	-	9	3506
6C	10	15.12.15	22.12.15	7	17,5	7	-	2308
7C	10	15.12.15	22.12.15	7	17,5	7	-	2316
8C	10	15.12.15	22.12.15	7	17,5	6,8	-	2292
9C	10	15.12.15	22.12.15	7	17,5	6	-	2352
10C	10	15.12.15	22.12.15	7	17,5	-	2	3616
6D	15	18.12.15	25.12.15	7	12	4	-	2280
7D	15	18.12.15	25.12.15	7	12	3,9	-	2296
8D	15	18.12.15	25.12.15	7	12	3,5	-	2308
9D	15	18.12.15	25.12.15	7	12	3,8	-	2300
10D	15	18.12.15	25.12.15	7	12	-	1,4	3580
6E	20	20.12.15	27.12.15	7	18	4	-	2366
7E	20	20.12.15	27.12.15	7	18	4	-	2256
8E	20	20.12.15	27.12.15	7	18	5,1	-	2402
9E	20	20.12.15	27.12.15	7	18	5,7	-	2404
10E	20	20.12.15	27.12.15	7	18	-	1,7	3696
3A+	0	25.01.16	01.02.16	7	10	40	-	2396
4A+	0	25.01.16	01.02.16	7	10	40	-	2404
3B+	5	25.01.16	01.02.16	7	4	41	-	2400
4B+	5	25.01.16	01.02.16	7	4	38	-	2406
3E+	20	27.01.16	03.02.16	7	13	4,8	-	2314
4E+	20	27.01.16	03.02.16	7	13	4,5	-	2298

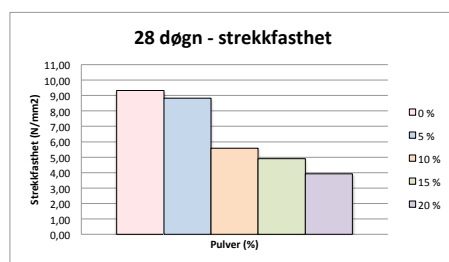
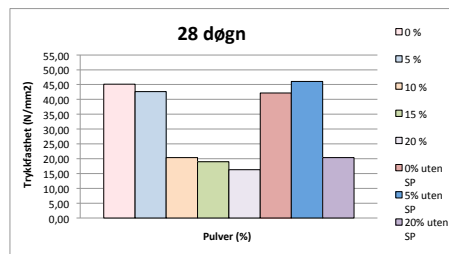
Type	Synkmål	Trykk gjennomsnitt	Trykk i N/mm2	Strekk	Strekk i N/mm2
A	17	39,75	38,99	9	8,83
B	16,5	33,75	33,11	9	8,83
C	17,5	6,7	6,57	2	1,96
D	12	3,8	3,73	1,4	1,37
E	18	4,7	4,61	1,7	1,67
A+	10	40	39,24	-	-
B+	4	39,5	38,75	-	-
E+	13	4,65	4,56	-	-



Tester etter 28 dogn

Prøve nr.	Pulver (%)	Støping (dato)	Test (dato)	Herdetid (dager)	Synkmål (cm)	Trykk (tonn)	Strekk (tonn)	Vekt (g)
11A	0	07.12.15	04.01.16	28	17	43	-	2470
12A	0	07.12.15	04.01.16	28	17	48	-	2460
13A	0	07.12.15	04.01.16	28	17	47	-	2462
14A	0	07.12.15	04.01.16	28	17	46	-	2448
15A	0	07.12.15	04.01.16	28	17	-	9,5	3814
11B	5	12.12.15	09.01.16	28	16,5	44	-	2468
12B	5	12.12.15	09.01.16	28	16,5	44	-	2452
13B	5	12.12.15	09.01.16	28	16,5	43	-	2488
14B	5	12.12.15	09.01.16	28	16,5	43	-	2440
15B	5	12.12.15	09.01.16	28	16,5	-	9	3806
11C	10	15.12.15	12.01.16	28	17,5	17	-	2308
12C	10	15.12.15	12.01.16	28	17,5	19	-	2358
13C	10	15.12.15	12.01.16	28	17,5	24,5	-	2302
14C	10	15.12.15	12.01.16	28	17,5	22,5	-	2306
15C	10	15.12.15	12.01.16	28	17,5	-	5,7	3600
11D	15	18.12.15	15.01.16	28	12	19	-	2284
12D	15	18.12.15	15.01.16	28	12	19	-	2348
13D	15	18.12.15	15.01.16	28	12	19	-	2306
14D	15	18.12.15	15.01.16	28	12	20,5	-	2284
15D	15	18.12.15	15.01.16	28	12	-	5	3622
11E	20	20.12.15	17.01.16	28	18	18,5	-	2298
12E	20	20.12.15	17.01.16	28	18	14	-	2238
13E	20	20.12.15	17.01.16	28	18	14,8	-	2256
14E	20	20.12.15	17.01.16	28	18	19	-	2380
15E	20	20.12.15	17.01.16	28	18	-	4	3682
5A+	0	25.01.16	22.02.16	28	10	46	-	2438
6A+	0	25.01.16	22.02.16	28	10	40	-	2432
5B+	5	25.01.16	22.02.16	28	4	48	-	2410
6B+	5	25.01.16	22.02.16	28	4	46	-	2396
5E+	20	27.01.16	24.02.16	28	13	20	-	2318
6E+	20	27.01.16	24.02.16	28	13	21,5	-	2308

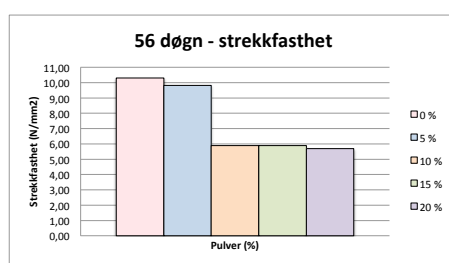
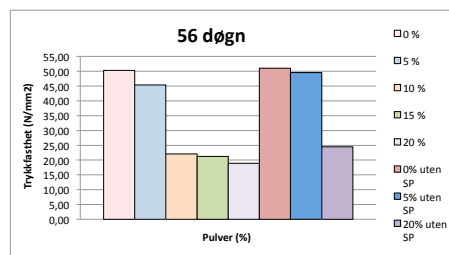
Type	Synkmål mm	Trykk gjennomsnitt	Trykk i N/mm2	Strekk	Strekk i N/mm2
A	170	46	45,13	9,5	9,32
B	165	43,5	42,67	9	8,83
C	175	20,75	20,36	5,7	5,59
D	120	19,38	19,01	5	4,91
E	180	16,58	16,26	4	3,92
A+	10	43	42,18	-	-
B+	4	47	46,11	-	-
E+	13	20,75	20,36	-	-



Tester etter 56 dogn

Prøve nr.	Pulver (%)	Støping (dato)	Test (dato)	Herdetid (dager)	Synkmål (cm)	Trykk (tonn)	Strekk (tonn)	Vekt (g)
16A	0	07.12.15	01.02.16	56	17	50	-	2456
17A	0	07.12.15	01.02.16	56	17	52	-	2490
18A	0	07.12.15	01.02.16	56	17	52	-	2484
19A	0	07.12.15	01.02.16	56	17	51	-	2492
20A	0	07.12.15	01.02.16	56	17	-	10,5	3858
16B	5	12.12.15	06.02.16	56	16,5	48	-	2448
17B	5	12.12.15	06.02.16	56	16,5	44	-	2430
18B	5	12.12.15	06.02.16	56	16,5	47	-	2438
19B	5	12.12.15	06.02.16	56	16,5	46	-	2474
20B	5	12.12.15	06.02.16	56	16,5	-	10	3770
16C	10	15.12.15	09.02.16	56	17,5	26,5	-	2316
17C	10	15.12.15	09.02.16	56	17,5	18	-	2316
18C	10	15.12.15	09.02.16	56	17,5	18	-	2370
19C	10	15.12.15	09.02.16	56	17,5	27,5	-	2326
20C	10	15.12.15	09.02.16	56	17,5	-	6	3674
16D	15	18.12.15	12.02.16	56	12	23	-	2308
17D	15	18.12.15	12.02.16	56	12	20	-	2336
18D	15	18.12.15	12.02.16	56	12	24	-	2290
19D	15	18.12.15	12.02.16	56	12	19,5	-	2332
20D	15	18.12.15	12.02.16	56	12	-	6	3652
16E	20	20.12.15	14.02.16	56	18	20	-	2254
17E	20	20.12.15	14.02.16	56	18	19	-	2236
18E	20	20.12.15	14.02.16	56	18	19	-	2260
19E	20	20.12.15	14.02.16	56	18	19,2	-	2254
20E	20	20.12.15	14.02.16	56	18	-	5,8	3746
7A+	0	25.01.16	21.03.16	56	10	52	-	2462
8A+	0	25.01.16	21.03.16	56	10	52	-	2424
7B+	5	25.01.16	21.03.16	56	4	53	-	2474
8B+	5	25.01.16	21.03.16	56	4	48	-	2398
7E+	20	27.01.16	23.03.16	56	13	25	-	2312
8E+	20	27.01.16	23.03.16	56	13	25	-	2364

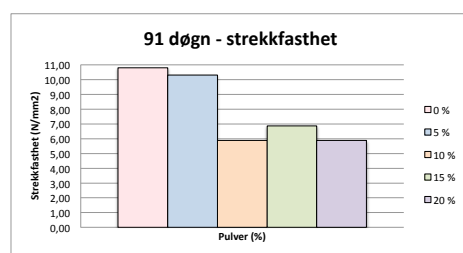
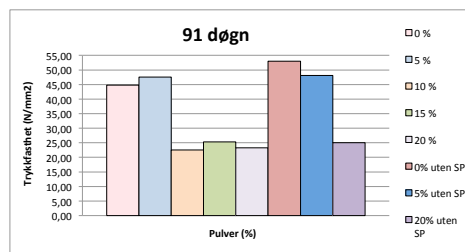
Type	Synkmål	Trykk gjennomsnitt	Trykk i N/mm2	Strekk	Strekk i N/mm2
A	17	51,25	50,28	10,5	10,30
B	16,5	46,25	45,37	10	9,81
C	17,5	22,5	22,07	6	5,89
D	12	21,63	21,21	6	5,89
E	18	19,30	18,93	5,8	5,69
A+	10	52	51,012	-	-
B+	4	50,5	49,5405	-	-
E+	13	25	24,525	-	-



Tester etter 91 dogn

Prøve nr.	Pulver (%)	Støping (dato)	Test (dato)	Herdetid (dager)	Synkmål (cm)	Trykk (tonn)	Strekk (tonn)	Vekt (g)
21A	0	07.12.15	07.03.15	91	17	52	-	2484
22A	0	07.12.15	07.03.15	91	17	51,5	-	2488
23A	0	07.12.15	07.03.15	91	17	39	-	2426
24A	0	07.12.15	07.03.15	91	17	40	-	2428
25A	0	07.12.15	07.03.15	91	17	-	11	3756
21B	5	12.12.15	12.03.16	91	16,5	48	-	2476
22B	5	12.12.15	12.03.16	91	16,5	46	-	2470
23B	5	12.12.15	12.03.16	91	16,5	50	-	2468
24B	5	12.12.15	12.03.16	91	16,5	50	-	2474
25B	5	12.12.15	12.03.16	91	16,5	-	10,5	3872
21C	10	15.12.15	15.03.16	91	17,5	20	-	2320
22C	10	15.12.15	15.03.16	91	17,5	24	-	2310
23C	10	15.12.15	15.03.16	91	17,5	24,7	-	2324
24C	10	15.12.15	15.03.16	91	17,5	23,3	-	2338
25C	10	15.12.15	15.03.16	91	17,5	-	6	3662
21D	15	18.12.15	18.03.16	91	12	27	-	2398
22D	15	18.12.15	18.03.16	91	12	26	-	2304
23D	15	18.12.15	18.03.16	91	12	24	-	2310
24D	15	18.12.15	18.03.16	91	12	26	-	2366
25D	15	18.12.15	18.03.16	91	12	-	7	3574
21E	20	20.12.15	20.03.16	91	18	27	-	2374
22E	20	20.12.15	20.03.16	91	18	20	-	2288
23E	20	20.12.15	20.03.16	91	18	28	-	2424
24E	20	20.12.15	20.03.16	91	18	20	-	2272
25E	20	20.12.15	20.03.16	91	18	-	6	3700
9A+	0	25.01.16	25.04.16	91	10	54	-	2460
10A+	0	25.01.16	25.04.16	91	10	54	-	2428
9B+	5	25.01.16	25.04.16	91	4	50	-	2384
10B+	5	25.01.16	25.04.16	91	4	48	-	2398
9E+	20	27.01.16	27.04.16	91	13	24	-	2344
10E+	20	27.01.16	27.04.16	91	13	27	-	2344

Type	Synkmål (cm)	Trykk gjennomsnitt (tonn)	Trykk i N/mm2	Strekk gjennomsnitt (tonn)	Strekk i N/mm2
A	17	45,625	44,76	11	10,79
B	16,5	48,5	47,58	10,5	10,30
C	17,5	23,0	22,57	6	5,89
D	12	25,75	25,26	7	6,87
E	18	23,75	23,30	6	5,89
A+	10	54,00	52,97	-	-
B+	4	49,00	48,07	-	-
E+	13	25,50	25,02	-	-



11.4 Vedlegg 4 – E-post fra Iain Miller

E-post

RE: Hjelp til masteroppgave NMBU

Iain H. B. Miller <iainh@online.no>

ma 11.04.2016 14:06

Til: Sara Alicja Kikowska <sara.kikowska@nmbu.no>;

📎 1 vedlegg (131 KB)

Sementbaserte produkter for overflatebehandling av betong i vannbehandlingsanlegg _2_.pdf;

Hei Sara,

Jeg har vedlagt en artikkel om sulfatangrep på sementholdige materialer som jeg presenterte i Betongrehabiliteringsdagene i 2012. Sulfatsyrer er aggressive mot sementprodukter og medfører nedbrytning. En kjent, naturlig kilde for sulfatangrep er oksidert alunskifer. Sulfatangrep på betong og sementprodukter er et problem i vannbehandlingsanlegg og sjø. I sjø benyttes sement som er mer sulfatresistent enn ordinær sement.

I all sement er det tilsatt små mengder gips for å kontrollere hydratiseringsprosessen. mengden er omtrent 2 til 3% av sementvekten, og er nøye tilpasset for å hindre videre nedbrytning av sementen etter at den er hydratisert.

Fosfater kan reagere med betong, og spesielt sulfatsalter som danner fosforsyre, slik som CaHPO_4 .

Nitratsalter er svært skadelige for betong og danner aggressive syrer som løser opp sementmatrisen bestående av kalsiumaluminater.

Du bør få tak i Concrete Corrothion av Imre Biczók hvor alt dette står i detalj.

Med vennlig hilsen,
Iain Miller
Daglig leder

Millab Consult a.s.
Nybyggerveien 15
1084 Oslo

Tlf.: 22109470
Fax.: 22109467

Web: www.millab-consult.no

From: Sara Alicja Kikowska [mailto:sara.kikowska@nmbu.no]
Sent: 11. april 2016 12:38
To: iainh@online.no
Subject: Hjelp til masteroppgave NMBU

Hei

Sementbaserte produkter for overflatebehandling av betong i vannbehandlingsanlegg

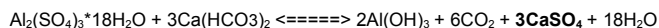
(Nøkkelord: Sulfatresistens, pH, vannets hardhetsgrad, nedbrytning, sementkjemi)

Sivilingeniør Iain H. B. Miller
Millab Consult a.s.**1. Innledning**

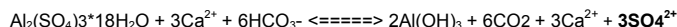
I Norge har de fleste råvannskilder bløtt vann, som vil si at konsentrasjonen av magnesium- og kalsiumforbindelser er liten. Bløtt vann er i utgangspunktet pH-nøytral eller lett sur, med typiske verdier mellom 6,8 og 7,5. Det er velkjent at betong og andre sementbaserte materialer kan nedbrytes de er i permanent kontakt med bløtt vann på grunn av avlutning av bindemiddelet. Avlutning skjer fordi den lave konsentrasjonen av alkalie- og alkaliejordmetaller i vannet medfører en forskyvning av den kjemiske likevekten mellom bindemiddelet og vannet. I hardt vann vil den kjemiske likevekten mellom bindemiddelet og vannet være mer stabil. Det er vanlig at produktdatablader for sementbaserte belegg til bruk i vannbehandlingsanlegg inneholder grenseverdier for vannets hardhetsgrad fordi slike produkter kan få redusert levetid dersom vannet er for bløtt. Den kombinerte effekten bløtt og sulfatholdig vann har på sementprodukter av standard Portlandsement er imidlertid lite belyst i både datablader og annen litteratur.

I vannbehandlingsanlegg for fremstilling av drikkevann behandles råvann ved hjelp av tilsetningsstoffer og filtreringsprosesser. I den tidlige prosessen tilsettes kjemikalier for å oppnå koagulering og flokkulering av organisk materiale, alger og bakterier. Ett av de mest benyttede kjemikalier til formålet er aluminiumsulfat, $Al_2(SO_4)_3$. Doseringen er normalt mellom 12 og 30 mg per liter, og doseringsbehovet beregnes ut fra vannets naturlige innhold av organisk materiale, samt vannets turbiditet og hardhetsgrad [1].

Når aluminiumsulfat løses i råvann som alltid vil inneholde bikarbonater av kalsium eller magnesium, vil det dannes magnesium- eller kalsiumfulfat. For kalsiumbikarbonat vil reaksjonen bli:



Overskuddet av sulfatopløsningen som ikke kombineres med bikarbonat danner frie sulfationer.



Sulfationene protolyserer med vann til å danne svovelsyre, H_2SO_4 og medfører et fall i løsnings pH til omlag 6,0.

Tilstedeværelsen av frie sulfationer kan medføre nedbrytning av kalk- og sementholdige materialer.

2. Sementkjemi og sulfatresistens

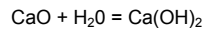
Ordinær Portlandsement, OPC, er den mest benyttede sementtypen i verden. Portlandsement fremstilles i hovedsak av kalkstein, kalsiumkarbonat, $CaCO_3$ og leire. Steinen knuses, males og blandes med leire til klinker som varmes opp til omlag 1450 °C for bl. a. å redusere kalsiumkarbonat til kalsiumoksid, CaO , som er hovedbestandelen i sement. Leiren og senere tilsetning av flyveaske inneholder oksyden av aluminium, jern og silisium. Tabell 1 viser den typiske sammensetningen av ordinær Portlandsement, OPC.

Tabell 1. Bestanddeler i OPC - type I.

OPC	Vektprosent	Kjemisk formel
Trikalsiumsilikat	50 %	Ca_3SiO_5 or $3CaO \cdot SiO_2$
Dikalsiumsilikat	25 %	Ca_2SiO_4 or $2CaO \cdot SiO_2$
Trikalsiumaluminat	10 %	$Ca_3Al_2O_6$ or $3CaO \cdot Al_2O_3$
Tetrakalsium-aluminaferritt	10 %	$Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$ or $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$
Gips	5 %	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Når sement tilsettes vann, hydratiseres kalsiumoksidforbindelsene til kalsium-hydroksid-silikater.

Den forenklede reaksjonen mellom kalsiumoksid og vann er:

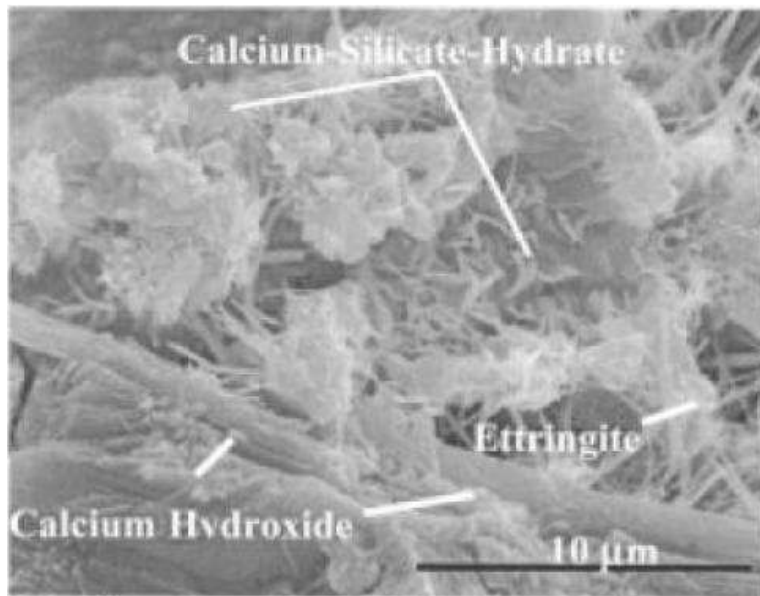


Sluttproduktet av hydratisert sement er adskillig mer komplekst, og består i hovedsak av fire forbindelser:

1. Hydratisert dikalsiumsilikat som hovedsakelig bidrar til betongens styrke. Forkortes til C_2S .
2. Hydratisert trikalsiumsilikat. Forkortes til C_3S .
3. Hydratisert trikalsiumaluminat, $\text{Ca}_2\text{AlO}_3(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$, forkortes til C_3A .
4. Hydratisert tetrakalsiumaluminatferitt. Forkortes til C_4AF .

Hydratiseringen av trikalsiumaluminat, C_3A , er meget rask, og bidrar mest til den tidlige fasthetsutviklingen. For å begrense fasthets- og varmeutviklingen tilsettes gips (CaSO_4). Gips passiverer overflaten til C_3A ved å danne ettringitt, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, som igjen langsomt omdannes til $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, som i sementlitteraturen beskrives som AMf fasen. Ettringitt bidrar lite til betongens fasthet fordi det er et mekanisk svakt mineral som kun et biprodukt i kontrolleringen av herdeprosessen. Samtidig illustrerer reaksjonen hvor ømfintlig C_3A er ovenfor sulfat. I rehabiliteringsprosjekter i vannbehandlingsanlegg kan sementprodukter utsettes for sulfatholdig vann før sementen i produktet er fullstendig hydratisert, hvilket medfører at produktet blir særdeles sårbart ovenfor sulfatangrep, bl. a. fordi permeabiliteten fortsatt er høy.

Figur 1: Elektronmikroskopifoto av tidlig herdet sementpasta av OPC med ettringitt.
Fra Dr. Kimberly Kurtis, School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.



Produktets innhold av C_3A bestemmer dets motstandsevne ovenfor sulfatangrep. Produkter fremstilt av type I OPC har liten motstand ovenfor sulfatangrep på grunn av høyt C_3A -innhold. OPC type I skal ikke benyttes til fremstilling av sementprodukter for marint miljø, ettersom sjøvann inneholder høye konsentrasjoner av magnesiumsulfat [2]. Intet produkt basert på Portlandsement er sulfatresistent i det lange løp, men forlenget og akseptabel sulfatresistens oppnås ved å redusere C_3A innholdet under fremstillingen av sementen. Portlandsement av type V er C_3A redusert og bør benyttes til fremstilling av betong og sementprodukter som vil bli eksponert for sulfater [2].

3. Sulfatnedbrytning av sementprodukter i bløtt vann

Allerede i 1964 mente Biczók [2] at det gjennom laboratoriestudier og in-situ observasjoner var tilstrekkelig dokumentert at reaksjonen mellom hydratisert di- og triksiumoksid og sulfationer er av sekundær betydning for sementproduktets motstandevne mot sulfatangrep. Sulfatnedbrytning av sementprodukter er primært forårsaket av sulfatangrep på C_3A -forbindelsen. Reaksjonen mellom sulfationer og C_3A danner ettringitt under opptak av 31 vannmolekyler i form av krystallvann. Når C_3A under dannelsen av ettringitt tar opp et så stort antall krystallvann økes volumet med omtrent 2.5 ganger det opprinnelige volumet. [2] Volumøkningen forårsaker oppsprekking og oppsmuldring av produktet. Oppsprekkingen øker permeabiliteten og dermed tilgangen til sulfationer fra vannet, slik at angrepet gradvis forsterkes. Til slutt er produktet omdannet til en grøtlignende substans av ettringitt og gips.

Biczók [2] refererte også til studier av betong i kontakt med bløtt vann som viser at betong av OPC med høyt C_3A -innhold er lite motstandsdyktig ovenfor avlutning. Biczók anbefaler at betong som man vet vil bli eksponert for bløtt vann bør lages av slaggsement eller av sement produsert av klinker med vulkanske bergarter (trass).

Studier av betong i kontakt med bløtt vann som er tilført sulfatforbindelser fra grunnvann viser at nedbrytning kan skje i løpet av meget kort tid [3]. I studien var sulfatinnholdet i vannet omlag 500 mg/l og magnesiuminnholdet omlag 35 mg/l. Tidligere studier av den samme betongtypen viste at avlutningen som oppstår i bløtt, men sulfatfritt vann ikke forårsaker hurtig forvitring. Tilsvarende studier på samme betongtype viste at sulfatkonsentrasjonen i vannet alene ikke forårsaker hurtig forvitring hvis vannets hardhetsgrad er høyt. Undersøkelsen [3] viste at forvitringen oppsto som følge av kombinert avlutning og sulfatangrep. Kombinasjonen hadde en gjensidig katalytisk effekt som fikk betongen til å nedbrytes i løpet av seks måneder.

4. Kalksementbaserte produkter

Produkter som inneholder bindemiddel av både kalk og sement er særdeles utsatt for sulfatnedbrytning. Kalk herder ved karbonatisering, og sement ved hydratisering. I slike produkter gir sementen en tidlig fasthetsutvikling, mens kalken karbonatiseres langsomt for å oppnå fasthet. Karbonatisert kalk, $CaCO_3$, reagerer med sulfater til å danne gips, $CaSO_4$. Gips har liten fasthet sammenlignet med kalk og sement, og i kontakt med vann omformes den til en grøtlignende substans. I tillegg til at angrep kan skje på C_3A -forbindelsen i sementen, kan kalken nedbrytes direkte og hurtig av sulfationene i vannet.

5. Thumasittdannelse

Thumasitt har formelen $Ca_3Si(OH)_6(SO_4)(CO_3) \cdot 12H_2O$. Det dannes ved en kombinasjon av karbonatisering av bindemiddelet i sementen og sulfatangrep. Omdannelsen skjer etter at produktet er karbonatisert når sulfater tilføres fra en ytre kilde. Dannelsen av thumasitt skjer i fuktig miljø ved temperaturer lavere enn omlag 15 °C. Selv om forbindelsen ikke inneholder aluminium, antas det at ettringittdannelse er et nødvendig forstadium, og at den fungerer som grobunn for thumasittdannelsen fordi krystallstrukturen ligner på ettringitt. Angrepet medfører fullstendig ødeleggelse av sementpastaen og omdanner sementproduktet til en usammenhengende grøt. [4]

Hvis observasjonene [4] er korrekte kan betingelsene for thumasittdannelse i sementbaserte belegg være tilstede i vannbehandlingsanlegg. Dersom tiltak for å hindre karbonatisering av belegget ikke utføres, kan

betingelsene for hurtig nedbrytning være tilstede. Når produktet kommer i kontakt med sulfatholdig råvann, som i Norge har en årlig middeltemperatur på mellom 5 og 10 °C kan betingelsene for thaumasittdannelse absolutt være tilstede.

6. Aggregater og fyllstoffer

Ved fremstilling av produkter som skal være bestandige i sulfatholdigmiljø bør sammensetningen av aggregater og fyllstoffer velges med omhu. Fremfor alt bør aggregater av kalkstein unngås.

7. Konklusjon

Forfatteren av denne artikkelen har selv observert hurtig nedbrytning av sementbaserte belegg i vannbehandlingsanlegg hvor det tilsettes aluminiumsulfat til bløtt vann. Uansett hvilke mekanismer som forårsaker sulfatnedbrytning av sementbaserte produkter, er det tilstrekkelig dokumentert at høyt C₃A-innhold i sementen bør unngås, og aller helst bør Portlandsement unngås. Dersom sementbaserte belegg basert på Portlandsement velges til overflatebehandling av betong i vannbehandlingsanlegg, anbefales det at C₃A-redusert sement benyttes, og at permeabiliteten i porestrukturen reduseres så mye som mulig ved tilsetning av mikroniserte fyllstoffer, som for eksempel mikrosilika.

Referanser

[1] *Water Treatment in Auckland, Article by Geoff MacKenzie (Watercare Services Ltd.).*

[2] *Imre Biczók, Concrete Protection and Concrete Corrosion, Akadémiai Kiadó, 1964.*

[3] *Advanced Materials Research Vols. 204-210 (2011) pp 110-113 - Study on Concrete Failure Due to Sulfate Attack at Low Value in Water, Lingqiang YANG, Xucong LIU. Department of Civil Engineering, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China.*

[4] *Steve Kelham, Advanced Concrete Technology, Butterworth-Heinemann, An imprint of Elsevier First published 2003, ISBN 0 7506 5104 0*



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no