

# Undersøgelse af mineaffald som delvis cementerstatning i beton med fokus på optimering af trykstyrke



Maja Østergaard Sørensen,  
s143871

**BsC Thesis**

Department of Civil Engineering  
2017

DTU Civil Engineering  
Juni 2017

*[Blank side]*

# Forord

Denne rapport er udarbejdet som et bachelorprojekt og udgør sammen med et forsvar afslutningen på bacheloruddannelsen i byggeteknologi ved Danmarks Tekniske Universitet. Projektet er udført ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Projektet er en del af Zero Waste Byg og belyser anvendelse af mineaffald som delvis cementerstatning i beton med fokus på optimering af trykstyrke.

Sideløbende med dette projekt er der udarbejdet 6 andre projekter med mineaffald fra andre miner i forskellige områder.

Projektet er udarbejdet i foråret 2017 og udgør 15 ECTS-point.

Latex er anvendt til opstilling af rapporten samt tekst, imens Excel er benyttet til beregninger og grafer.

En stor tak rettes imod Lektor Pernille Erland Jensen, Professor Lisbeth M. Ottossen og Videnskabelig Assistent Nina Marie Sigvardsen for hjælp og vejledning. Desuden ønskes det at takke laborantkoordinator Ebba Schnell og laborant Malene Grønvold samt instituttet generelt for at stille materialer til rådighed til udførelse af eksperimentelt arbejde.

---

Maja Østergaard Sørensen, s143871

---

Dato

*[Blank side]*



# Sammenfatning

Interessen for at begrænse belastning af miljøet stiger i høj grad på verdensplan. CO<sub>2</sub>-udslippet er højere end nogensinde før, og 7% af udslippet stammer fra cementproduktion. I cementindustrien imødekommes dette, ved i stigende grad at anvende affaldsprodukter som delvis erstatning for cement i beton. Dette nedbringer både CO<sub>2</sub>-udslippet ved cementproduktionen, men også de økonomiske udgifter ved at benytte affald i stedet for at købe det dyrere cement.

I mineindustrien er det ofte dyrt at afskaffe mineaffald, da der er risiko for fysisk og kemisk belastning af miljøet ved deponering. Hvis mineaffaldet kan benyttes i beton, vil udgifterne og belastning af miljøet for deponering reduceres.

Formålet med projektet er at undersøge, om to forskellige slags mineaffald kan benyttes som delvis cementerstatning i beton. Den ene slags mineaffald kommer fra kobber-, guld-, platinum- og palladiumminen Nussir i Nord Norge, og den anden slags mineaffald kommer fra zink-, bly-, kobber- og sølvminen Zinkgruvan i Syd Sverige.

Indledningsvist undersøges karakteristika af mineaffaldet såsom indholdet af vand, organisk materiale, tungmetaller, mineraler og karbonat samt mineaffaldets vandabsorptionsevne, pH-værdi, kornstørrelsefordeling og densitet. Disse karakteristika røber, at mineaffaldet fra Nussir overholder fillergrænsen på 250 $\mu$ m samt grænserne for indhold af tungmetaller ulige mineaffaldet fra Zinkgruvan.

Derudover også, at mineaffaldet fra Zinkgruvan har en højere vandabsorptionsevne samt et højere karbonatindhold end mineaffaldet fra Nussir. Begge mineaffald har en forholdsvis neutral pH-værdi og et lavt indhold af organisk materiale. Det blev fundet, at mineaffaldet fra Nussir indholder mineralerne kobber, krom, barium og aluminium, imens mineaffaldet fra Zinkgruvan indeholder mineralerne calcit, dolomit, mikrolin feldspat, plagiklas feldspat og muscovit. Begge slags mineaffald indeholder mineralet kvarts og en lille mængde amorft materiale.

Mørtelprismer med substituering af hhv. 5% og 10% cement med mineaffald fra hhv. Zinkgruvan og Nussir testes. Egenskaber som bearbejdelighed, afbindingstid og trykstyrke undersøges og sammenlignes med en referenceprøve. Trykstyrkeudviklingsforløbene fastlægges på baggrund af afbindingstider på 7, 14 og 28 dage.

Undersøgelserne viser, at trykstyrken for prøver med mineaffald er dårligere end for referencen. De målte trykstyrker sammenlignes med teoretiske trykstyrker beregnet med Bolomeys formel. De teoretiske trykstyrker falder, når der tilsættes mineaffald og v/c-forholdet dermed stiger. De målte trykstyrker for prøver med Nussir bekræfter dette, imens de er modstridende for prøver med Zinkgruvan. Derudover observeres det, at prøverne indeholdene Nussir har en hurtigere afbindingstid og en højere trykstyrke end prøverne med Zinkgruvan. Sandsynligvis pga. tættere pakning og heterogen kimdannelse som resultat af Nussirs fillerpotentiale. Generelt forsinkes den endelige afbindingstid fra tilsætning af 5% til 10% mineaffald, fordi cementindholdet reduceres. Flydesætmålene for mørtel indeholdende Nussir er højere end for mørtel med Zinkgruvan, hvilket skyldes mineaffaldets absorptionsevne.

På baggrund af de indledende undersøgelser vælges det at undersøge, om trykstyrken kan forbedres ved justering af vandindholdet på to forskellige måder.

Ved justering af vandindhold i blandingerne, så v/c-forholdet reduceres, forringes bearbejdeligheden. 14 døgns trykstyrken for mørtelprøver med 5% Zinkgruvan forbedres med 25,9% og dette kan forklares ved en reduktion af porøsiteten. 14 døgns trykstyrken for mørtelprøver med 5% Nussir forringes med 6,62% og kan forklares ved dårligere bearbejdelighed og en ufuldstændig hydratiseringsgrad. Disse resultater viser ikke en sammenhæng med mineaffaldets absorptionsevne.

Ved justering af vandindholdet i blandingerne, så bearbejdeligheden optimeres, findes der en sammenhæng imellem absorptionsevne og flydesætmål. For prøver med Zinkgruvan forøges v/c-forholdet. Dette resulterer i en højere bearbejdelighed og en forbedring af 14 døgns trykstyrken på 12,7-33,1 %. For prøver med Nussir formindskes v/c-forholdet. Dette resulterede i en lavere bearbejdelighed og en forbedring af 14 døgns trykstyrken for 10% prøven på 19,0%, hvilket skyldes reduktionen af v/c-forholdet. For prøven med 5% Nussir blev trykstyrken forringet med 0,81% og er umiddelbart for lille til at udvise en forskel.

Det konkluderes, at begge typer mineaffald udviser potentiale som delvis cementerstatning i beton, hvis indholdet af tungmetaller nedsættes i mineaffaldet fra Zinkgruvan. Det konkluderes derudover, at mineaffaldet fra Nussir er bedst egnet, da det giver en højere trykstyrke.

Det konkluderes, at trykstyrken forbedres mest ved justering af vandindholdet med henblik på bearbejdeligheden, så der tages højde for mineaffaldets absorptionsevne.

*[Blank side]*

# Abstract

An interest in restricting the environmental impact is greatly increasing worldwide. The CO<sub>2</sub> emissions is as high as ever and 7% of the emissions originates from the production of cement. The cement industry is accommodating this by increasingly using wasteproducts as a partly cement substitute in concrete. This can affect a decrease in CO<sub>2</sub> emissions caused by production of cement and meanwhile also decrease the economic expenses by using the wasteproducts instead of buying the more expensive cement.

In the mining industry it is often expensive to deposit mining waste, due to the risk of physically or chemically contamination of the environment. If mining waste can serve a useful purpose, the expenses and contamination of the environment from landfill can be reduced.

The purpose of this project is to investigate if two different types of mining waste can be used as a partly cement substitute in concrete. The first kind of mining waste originates from the copper-, gold-, platinum- and palladiummine Nussir in Northern Norway. The other kind of mining waste originates from the zink-, lead-, copper- and silvermine Zinkgruvan in South Sweden.

Initially basic characteristics of the mining waste such as the content of water, organic material, heavy metals, minerals and carbonate plus the water absorption, pH-value, grading and density of the mine waste is investigated. The results show that the grading of the mining waste from Nussir comply both the filler limit on 250 $\mu$ m and the maximum allowed content of heavy metals opposite the mining waste from Zinkgruvan.

Furthermore it is found that the mining waste from Zinkgruvan has a higher water absorption and a higher content of carbonate than the mining waste from Nussir. Both types of mining waste has a relatively neutral pH-value and a low content of organic material. It was found that mining waste from Nussir contains the minerals copper, crom, barium and aluminium, while the mining waste from Zinkgruvan contains the minerals calcite, dolomite, microlin feldpsat, plagiklas feldspat and muscovite. Both types of mining waste contains the mineral quartz and a small amount of amorphous material was identified as well.

Mortar mixtures with a substitution of respectively 5% and 10% cement with mining waste from respectively Zinkgruvan and Nussir is examined. Properties as workability, setting time and compressive strength is measured and compared with a reference sample. The progress of development of the compressive strength is determined with setting times of 7, 14 and 28 days.

The tests show that the compressive strength for samples containing mining waste is worse than for the reference sample. The measured compressive strengths are compared with theoretically compressive strengths computed with Bolomeys formula. The theoretical values decrease as mining waste is added and the w/c ratio thus increases. The measured compressive strengths for samples containing Nussir confirm this, while the compressive strengths for samples containing Zinkgruvan contradict this. Furthermore it is observed that mortar samples containing Nussir have an accelerated setting time and a higher compressive strength than samples containing Zinkgruvan. This is possibly due to the packing of concrete and heterogeneous nucleation caused by the filler potential of mininh waste from Nussir. Generally, the setting time is delayed when adding more mining waste from 5% to 10%, because the content of cement is reduced. The slump test for mortar containing Nussir is higher than for mortar containing Zinkgruvan, which is due to the ability of waterabsorption of the mining waste.

Based on the initial investigations it is chosen to determine whether the compressive strength can be improved by adjusting the water content in the mortar in two different ways.

By adjusting the watercontent in the mixtures to reduce the w/c ratio, the workability is decreased. The compressive strength after 14 days of curing for mortar samples containing 5% Zinkgruvan is increased by 25,9% and can be explained by a reduction in porosity. The compressive strength after 14 days of curing for mortar samples containing 5% Nussir is decreased by 6,62% and can be explained by the lowered workability and an incomplete hydration rate.

By adjusting the water content in the mixtures with respect to optimization of the workability a correlation between the ability of water absorption and the size of the slump is found. For samples containing Zinkgruvan the w/c ratio is increased. This results in a better workability and an increase in the compressive strength by 12,7-33,1% after curing in 14 days. For samples containing Nussir the w/c ratio is decreased. This results in a decreased workability and an increase of the compressive strength after 14 curing days by 19,0% for samples containing 10%, which is caused by the reduction of w/c ratio. The compressive strength of the sample containing 5% Nussir was decreased by 0,81% and this difference is

considered too small to count as a difference.

It is concluded that both types of mining waste show potential as a partly substitute for cement in concrete. For Zinkgruvan it is required to decrease the content of heavy metals before incorporating it in concrete. Additionally it is concluded that mining waste from Nussir is more suitable as a substitute for cement in concrete, because it provides a higher compressive strength than Zinkgruvan does.

It is concluded that the compressive strength is improved more by adjusting the water content with respect to the workability, when the water absorption of the mining waste is taken into account.

# Indhold

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>1</b>
1.1	Baggrund for undersøgelser . . . . .	1
1.2	Begrænsninger for projektet . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>3</b>
2.1	Mineaffald . . . . .	3
2.1.1	Mineaffald fra Nussir . . . . .	3
2.1.2	Mineaffald fra Zinkgruvan . . . . .	3
2.2	Beskrivelse af beton . . . . .	3
2.3	Beskrivelse af mørtel . . . . .	4
2.3.1	BASIS Cement Aalborg Portland . . . . .	4
2.3.2	Søsand 0-4mm . . . . .	4
2.3.3	Vandindhold . . . . .	4
2.4	Hydratisering af cement . . . . .	4
2.5	Bearbejdelighed . . . . .	5
2.5.1	Flydesætmål . . . . .	5
2.5.2	Afbindingsforløb . . . . .	5
2.6	Trykstyrke . . . . .	5
2.6.1	Bolomeys formel . . . . .	6
2.7	Holdbarhed . . . . .	6
2.8	Filler . . . . .	7
2.9	Puzzolaneffekt . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Eksperimentelt arbejde</b>	<b>9</b>
3.1	Mineaffaldskarakteristik . . . . .	9
3.1.1	Vandindhold . . . . .	9
3.1.2	Vandabsorptionsevne . . . . .	9
3.1.3	pH-værdi . . . . .	10
3.1.4	Glødetab . . . . .	10
3.1.5	Carbonatindhold . . . . .	10
3.1.6	Oplukning af jordprøve . . . . .	11
3.1.7	Pyknometer/Densitet . . . . .	11
3.1.8	Laserdiffraktion . . . . .	11
3.1.9	XRD-analyse . . . . .	11
3.2	Egenskaber for mørtelprøver . . . . .	12
3.2.1	Proportionering af blandinger . . . . .	12
3.2.2	Blanding af mørtelprøver . . . . .	14
3.2.3	Støbning af mørtelprøver . . . . .	14
3.2.4	Flydesætmål . . . . .	15
3.2.5	Afbindingsstid . . . . .	15
3.2.6	Trykprøvning . . . . .	16
3.2.7	Porøsitet og densitet . . . . .	16
3.2.8	Farveprøve . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Resultater og diskussion</b>	<b>19</b>
4.1	Indledende undersøgelser . . . . .	19
4.1.1	Karakteristik af mineaffald . . . . .	19
4.1.1.1	Kornstørrelser . . . . .	19
4.1.1.2	Tungmetalindhold . . . . .	20
4.1.1.3	XRD analyse . . . . .	20
4.1.1.4	pH-værdi, glødetab, korndensitet og karbonatindhold . . . . .	21
4.1.1.5	Vandindhold og vandabsorptionsevne . . . . .	22
4.1.2	Egenskaber for mørtel ved udskiftning af cement med mineaffald . . . . .	23
4.1.2.1	Densitet og porøsitet . . . . .	23
4.1.2.2	Bearbejdelighed . . . . .	23
4.1.2.3	Afbindingstid . . . . .	24

4.1.2.4	Trykstyrke . . . . .	25
4.1.2.5	Farveprøve . . . . .	27
4.1.3	Delkonklusion for indledende undersøgelser . . . . .	27
4.2	Forslag til videre undersøgelser . . . . .	28
4.3	Videre undersøgelser . . . . .	29
4.3.1	Mørtelprøver med tilsætning af mineaffald og $v/c= 0,5$ . . . . .	29
4.3.1.1	Bearbejdelighed . . . . .	29
4.3.1.2	Trykstyrke . . . . .	29
4.3.2	Mørtelprøver med tilsætning af mineaffald og optimeret flydesætmål . . . . .	31
4.3.2.1	Justering af vandindhold med flydesætmål . . . . .	31
4.3.2.2	Trykstyrke . . . . .	32
4.4	Delkonklusion for optimering af vandindhold . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Konklusion</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Videre undersøgelse</b>	<b>39</b>
	<b>Litteraturliste</b>	<b>41</b>
	<b>Bilag</b>	<b>43</b>
<b>A</b>	<b>Forsøgsvejledninger</b>	<b>43</b>
A.1	Vandindhold . . . . .	43
A.2	Vandabsorptionsevne . . . . .	45
A.3	pH-værdi . . . . .	46
A.4	Glødetab i jord . . . . .	48
A.5	Carbonatindhold . . . . .	50
A.6	Oplukning af jord . . . . .	53
A.7	Pyknometer-partiklernes densitet . . . . .	56
A.8	Laserdiffraktion . . . . .	57
A.9	XRD-analyse . . . . .	59
A.10	Blanding og støbning af mørtelprøver . . . . .	65
A.11	Bearbejdelighed af mørtel . . . . .	68
A.12	Afbindingsforløb for mørtel . . . . .	69
A.13	Tryktest af mørtelprøver . . . . .	72
A.14	Porøsitet og densitet af mørtelprøver . . . . .	74
A.15	Støbning af farveprøver . . . . .	76
<b>B</b>	<b>Resultatbehandling</b>	<b>80</b>
B.1	Data for vandindhold . . . . .	80
B.2	Data for vandabsorption . . . . .	82
B.3	Data for pH-værdi . . . . .	83
B.4	Data for glødetab . . . . .	84
B.5	Data for carbonatindhold . . . . .	85
B.6	Standardrække for carbonatindhold . . . . .	86
B.7	Data for tungmetalindhold . . . . .	87
B.8	Data for pyknometer-partiklernes densitet . . . . .	90
B.9	Data for kornstørrelser . . . . .	94
B.10	Blandingsrecepter for mørtler i indledende forsøg . . . . .	98
B.11	Blandingsrecepter for mørtler med $v/c=0,5$ . . . . .	99
B.12	Blandingsrecepter for mørtler med optimeret flydesætmål . . . . .	100
B.13	Data for indledende mørtlers bearbejdelighed . . . . .	101
B.14	Data for mørtlers bearbejdelighed med $v/c=0,5$ . . . . .	102
B.15	Data for mørtlers bearbejdelighed med optimeret flydesætmål . . . . .	103
B.16	Data for afbindingsforløb for mørtler i indledende forsøg . . . . .	105
B.17	Data for tryktest for indledende mørtelprøver . . . . .	109
B.18	Data for tryktest for mørtelprøver med $v/c=0,5$ . . . . .	115
B.19	Data for tryktest for mørtelprøver med optimeret flydesætmål . . . . .	117
B.20	Data for porøsitet af mørtelprøver . . . . .	121

B.21 Teoretiske trykstyrke med Bolomeys formel . . . . .	125
<b>C Midtvejsposter</b>	<b>127</b>

*[Blank side]*



# Figurer

2.1	Mineaffald fra Nussir . . . . .	3
2.2	Mineaffald fra Zinkgruvan . . . . .	3
2.3	Hydratiseringsproces . . . . .	5
3.1	Støbeform til mørtelprismer . . . . .	15
3.2	Måling af flydesætmål . . . . .	15
3.3	Forsøgsopstilling i Vicatronic til bestemmelse af afbindingstid . . . . .	16
3.4	Vicat mønster for afbindingstid . . . . .	16
3.5	Forsøgsopstilling i Toni 3000 til bestemmelse af trykstyrke . . . . .	16
3.6	Farveprøveform . . . . .	17
3.7	Farveprøveform med dimensioner til papirskabelonen . . . . .	17
4.1	Kornstørrelsefordeling . . . . .	19
4.2	Resultater fra XRD analyse . . . . .	21
4.3	Afbindingsforløb for Z-B.1, Z-B.2 og R1-A . . . . .	24
4.4	Afbindingsforløb for N-B.1, N-B.2 og R1-A . . . . .	24
4.5	Styrkeudvikling for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R2-A . . . . .	25
4.6	Søjlediagram over trykstyrker for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R2-A med std. afv. . . . .	26
4.7	Farveprøve af R2-A, Z-B.2 og N-B.2 . . . . .	27
4.8	Styrkeudvikling for Z-C.1, N-C.1 sammenlignet med Z-B.1, N-B.1 og R2-A . . . . .	30
4.9	Søjlediagram over trykstyrker for Z-C.1, N-C.1 og R2-A med std.afv. . . . .	30
4.10	Sammenhæng mellem tilsat vandmængde og flydesætmål for mørtelblandinger med hhv. 5% og 10% mineaffald . . . . .	32
4.11	Styrkeudvikling for Z-D.1, Z-D.2, N-D.3, N-D.4 og R2-A . . . . .	33
4.12	Søjlediagram over trykstyrker for Z-D.1, Z-D.2, N-D.3, N-D.4 og R2-A med std. afv. . . . .	33
4.13	Styrkeudvikling N-D.3 og N-D.4 sammenlignet med N-B.1 og N-B.2 samt R2-A . . . . .	34
4.14	Styrkeudvikling Z-D.1 og Z-D.2 sammenlignet med Z-B.1 og Z-B.2 samt R2-A . . . . .	34

*[Blank side]*

# Tabeller

2.1	Vejledende konstanter til Bolomeys formel . . . . .	6
3.1	Oversigt over undersøgte materialekarakteristikker . . . . .	9
3.2	Oversigt over mørtelblandinger . . . . .	12
3.3	Oversigt over undersøgte egenskaber for mørtelblandinger . . . . .	12
3.4	Blanderecept for referenceprøve . . . . .	13
3.5	Blanderecepter for 5% og 10% cementerstatning med mineaffald . . . . .	13
3.6	Blanderecepter for justering af vandindholdet med $v/c=0,5$ . . . . .	13
3.7	Blanderecepter for justering af vandindholdet ved optimering af bearbejdelighed . . . . .	14
4.1	Indhold af tungmetaller . . . . .	20
4.2	Data for pH-værdi, glødetab, korndensitet og karbonatindhold . . . . .	21
4.3	Data for vandindhold og vandabsorptionsevne . . . . .	22
4.4	Data for porøsitet og densitet af Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R1-A . . . . .	23
4.5	Flydesætmål for R1-A, Z-B.1, Z-B.2, N-B.1 og N-B.2 . . . . .	23
4.6	Indledende og endelige afbindingstider for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R1-A . . . . .	24
4.7	Densitet for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R2-A inden trykprøvning . . . . .	26
4.8	Sammenligning af teoretiske og målte trykstyrker for 7-døgns prøver for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R2-A . . . . .	27
4.9	Flydesætmål for Z-C.1, Z-C.2, N-C.1, N-C.2 og R1-A . . . . .	29
4.10	Densitet for Z-C.1, N-C.1 og R2-A inden trykprøvning . . . . .	30
4.11	Procentvis stigning i trykstyrke ved justeret vandindholdet ift. $v/c$ -forhold= $0.5$ for 14 døgns prøver . . . . .	31
4.12	Flydesætmål for Z-D.1, Z-D.2, N-D.3, N-D.4 og R2-A . . . . .	32
4.13	Densitet for Z-D.1, Z-D.2, N-D.3, N-D.4 og R2-A inden trykprøvning . . . . .	33
4.14	Procentvis stigning i trykstyrke ved justering af vandindholdet for optimering af bearbejdeligheden for 14 døgns prøver. . . . .	35

*[Blank side]*

# 1 Indledning

Formålet med dette projekt er at sammenligne to forskellige slags mineaffald og undersøge muligheden for at benytte disse som delvis erstatning for cement i beton.

I denne rapport undersøges mineaffald fra Zinkgruvan i Sverige og Nussir i Norge.

Indledningsvist undersøges karakteristika af mineaffaldet såsom indholdet af vand, organisk materiale, tungmetaller, mineraler og karbonat samt mineaffaldets vandabsorptionsevne, pH-værdi, kornstørrelsefordeling og densitet. Disse karakteristika kan røbe en forventet effekt ved inkorporering af mineaffald i beton.

Herefter testes mørtelprismer med substituering af hhv. 5% og 10% cement med mineaffald fra hhv. Zinkgruvan og Nussir. Egenskaber som bearbejdelighed, afbindingstid og trykstyrke undersøges. Trykstyrkeudviklingsforløbene fastlægges på baggrund af afbindingstider på 7, 14 og 28 dage. Mørtelprøverne sammenlignes med en referenceprøve. De målte trykstyrker sammenlignes med teoretiske trykstyrker beregnet med Bolomeys formel.

På baggrund af de indledende undersøgelser vælges det at undersøge, om trykstyrken kan forbedres ved justering af vandindholdet på to forskellige måder.

1. *Vand/cement(v/c)-forhold*: Vandindholdet i prøver med mineaffald reduceres, så v/c-forholdet i referenceprøven og prøver med mineaffald er ens.
2. *Bearbejdelighed*: Vandindholdet justeres, så flydesætmålet for referenceprøven og prøver med mineaffald er ens.

I denne rapport testes mørtel i stedet for beton, for at undgå større tilslags virkning på blandingen. Desuden for at lette og fremskynde arbejdsprocedurene.

## 1.1 Baggrund for undersøgelser

Beton er i volumen det mest fremstillede produkt i verden idag. Beton består hovedsageligt af mindre tilslag(sand), større tilslag(sten), vand og cement, hvoraf de tre førstnævnte er naturprodukter. Cement er det dyreste materiale i beton og produktionen af denne udgør 7 % af verdens CO<sub>2</sub>-udslip [10]. En stadigt stigende interesse i at formindske belastning af miljøet på verdensplan, medfører et ønske om at nedbringe CO<sub>2</sub>-udslippet. Derfor er det ønsket at erstatte cement helt eller delvist med andre mere miljøvenlige materialer.

Anvendelse af affaldsmaterialer som substitut for cement er blevet populært, primært pga. den økonomiske gevinst ved genbrug i stedet for at købe den dyrere cement. Mineaffald er efterladenskaber efter udvinding af ønskede mineraler fra minerressourcer. Afskaffelse af mineaffald er dyrt, idet der er risiko for fysisk og kemisk belastning af miljøet ved deponering. Mineaffald bliver oftest deponeret nær minerne, og det er derfor områderne omkring minerne, som er i farezonen. Hvis mineaffaldet kan gøres brugbart, kan risikoen for miljøbelastning formindskes, og der kan spares penge på deponi.

Udskiftning helt eller delvist af cement med mineaffald er derfor både økonomisk fordelagtigt for betonproducenten og mineselskaberne samt en miljøforbedrende løsning for områderne omkring minerne, men også på verdensplan.

Det ønskes at finde ud af, hvilken effekt på betonens kvalitet substitueringen af cement med mineaffald vil have.

## 1.2 Begrænsninger for projektet

I dette afsnit opridses begrænsninger for de resultater, som opnås i projektet.

Først og fremmest skal det understreges, at konklusionerne i rapporten drages på baggrund af resultater fra forsøg udført i forbindelse med projektet. Resultaternes generaliserbarhed bør altså underbygges med flere forsøg før brug i praksis.

Det er essentielt at huske på, at forsøgene udføres på mørtel i stedet for beton. Det er vurderet, at resultaterne kan overføres til beton, men det kan ikke siges med sikkerhed, at effekten vil være den samme.

Forsøgene i dette projekt udføres kun på to forskellige slags mineaffald. Da mineaffald fra forskellige miner kan have forskellig sammensætning og opbygning, gælder resultater og konklusioner altså ikke for mineaffald fra andre miner end Zinkgruvan og Nussir.

Mineaffaldet undersøges som cementerstatning i mørtelprøverne, og den fundne effekt gælder altså ikke nødvendigvis for erstatning med mineaffald af andre elementer i mørtlen.

## 2 Teori

### 2.1 Mineaffald

Mineaffald er et bredt begreb, som dækker over flere forskellige typer af affald fra minedrift. I denne rapport behandles mineaffaldstypen *tailing*, men vil i opgaven blive betegnet som mineaffald. *Tailings* er det overskydende materiale efter udvinding af ønskede mineraler fra mineressourcer. Udvindingsprocessen afhænger af mineralogi samt fysiske og kemiske egenskaber af de behandlede ressourcer. Processen består typisk af knusning med mølle eller kemisk forarbejdning [15].

Mineaffald fra forskellige områder indeholder forskellige råstoffer og mineraler. Udvindingen er, afhængigt af dette, foregået med forskellige metoder. Derfor har mineaffaldet forskellige karakteristika og skal altså undersøges uafhængigt af hinanden. Det er dermed også forventet, at effekten ikke vil være det samme ved inkorporering af forskellige slags mineaffald i beton.

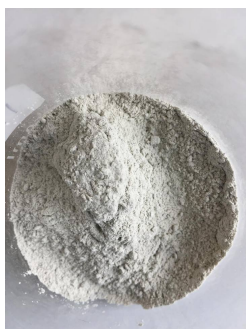
I denne opgave undersøges to forskellige slags mineaffald, Nussir og Zinkgruvan, se figur 2.1 og 2.2.

#### 2.1.1 Mineaffald fra Nussir

Det norske firma Nussir ASA udvinder hovedsageligt kobber, guld, sølv, platinum og palladium i et mineområde i Nord Norge. Derudover er mineralerne kobber, krom, barium og aluminium tilstede jf. [13]. Minen i Nussir-området besidder et af de største kobberfund nogensinde i Norge estimeret til en forekomst på 66 mio. kobbermalm [20]. Minen har været åben siden 2005 og er stadig åben. Mineaffaldet fra Nussir bliver på nuværende tidspunkt afskaffet ved undersøisk deponi på bunden af 8km<sup>3</sup> af den nærliggende fjord Repparfjorden [13]. Denne afskaffelsesmetode er vurderet til at have negative marine miljøkonsekvenser i form af frigivelse af kobber ud i vandet samt partikelspredning, hvilket hindrer reproduktion og vækst for organismer i fjorden [13]. En samlet mængde på 25 mio. ton mineaffald forventes at blive deponeret i fjorden i løbet af minens drift på ialt 20-30 år [3].

#### 2.1.2 Mineaffald fra Zinkgruvan

Zinkgruvan er en mine i Syd Sverige ejet af Lunding Mining, hvor der hovedsageligt udvindes zink, bly, kobber og sølv. Minen har været åben siden 1857 og er stadig åben. I 2016 blev der udvundet 78.500 ton Zink [21]. Der bliver produceret ca. 850.000 ton mineaffald om året, som bl.a. består af mineralerne kvarts, feldspat og calcit [12]. Mineaffaldet bliver opmagasineret i dyre vandtætte dæmningskonstruktioner placeret tæt på minen [16].



Figur 2.1: Mineaffald fra Nussir



Figur 2.2: Mineaffald fra Zinkgruvan

### 2.2 Beskrivelse af beton

Beton er et kompositmateriale blandet af tilslag, vand, cement og nogle gange også mineralske eller kemiske tilsætningsstoffer. Beton er hyppigt brugt i byggeindustrien pga. dets lave pris, gode vandmodstand samt dets formbarhed. Beton hærdet ved en hydratiseringsproces efter blandingen af de nævnte materialer, se afsnit 2.4 om hydratisering af cement.

Hærdet beton indeholder en heterogen fordeling af faste materialer og hulrum med varierende størrelse og form, som kan indeholde en alkaline opløsning.

Hærdet beton kan opdeles i tre faser [17];

#### 1. Cementpasta

Cementpasta er et bindemiddel, som opstår ved hydratiseringsreaktioner mellem cement og vand.

#### 2. Tilslag

Tilslag er i normal-styrke beton den stærkeste fase og er dermed ikke dimensionerende. Tilslags karakteristik såsom vandindhold, form og størrelse kan variere og påvirker blandingsproportionerne.

#### 3. Interfacial Transition Zone (ITZ)

Den dimensionerende fase i beton er ofte ITZ, som befinder sig imellem større tilslag og den hydratiserede cementpasta. ITZ opstår under hydratiseringen ved, at vand tiltrækkes af større tilslags overflader på grund af van der Waals kræfter. Hermed bliver  $v/c$ -forholdet større i dette område.

## 2.3 Beskrivelse af mørtel

Ved tilsætning af sand til cementpastaen fås cementmørtel. Der arbejdes i dette projekt med mørtel, idet effekten af stens tilstedeværelse ikke er det, som ønskes undersøgt i denne rapport. Derudover sikres det, at effekten af ITZ ikke er begrænsende for styrken ved trykprøvning. Desuden vil blandings- og støbningsprocessen forenkles.

### 2.3.1 BASIS Cement Aalborg Portland

I denne opgave benyttes BASIS Cement fra Aalborg Portland (CEM II/A-LL), som er fremstillet med op til 20% kalkfiller og 80% portlands cementklinker [1]. Cement udvikler bindende egenskaber ved reaktioner med vand. De forskellige klinkermineraller indgår i forskellige reaktioner, som ikke alle foregår samtidigt, og har forskellige reaktionshastigheder under hydratiseringen.

### 2.3.2 Søsand 0-4mm

Søsand i størrelsen 0-4mm benyttes som tilslag i mørtlen. Søsand består af kvarts, som er naturligt afrundet. Størstedelen af beton består af tilslag, idet tilslag er billigere end cement og forbedrer bearbejdigheden [17]. Vandindholdet i sand må maksimalt være 0,2 % [8].

### 2.3.3 Vandindhold

Det optimale vandindhold i mørtel er afhængig af flere forskellige faktorer. En større kornstørrelse, mindre vandabsorptionsevne for materialerne og et mindre cementindhold vil typisk kræve mindre vand for at opnå en tilstrækkelig bearbejdighed.

Volumen af frit vand i den friskeblandede mørtel svarer til volumen af kapillære porer. Porøsiteten falder dermed i takt med hydratiseringen, når vandet reagerer og danner hydratiseringsprodukt. Da volumen af mørtlen holdes konstant under hydratiseringen, vil den volumen, som ikke bliver fyldt ud med hydratiseringsprodukt, forblive porer. For et givent volumen af cement, vil et større  $v/c$ -forhold altså give et større volumen af kapillære porer efter fuldstændig hydratisering.

Eftersom kapillære porer ikke har en styrke, haves en omvendt proportional sammenhæng imellem kapillære porer og trykstyrken af beton. Dette giver endvidere et omvendt proportionalt forhold imellem  $v/c$ -forholdet og trykstyrken.

Justering af vandindholdet i mørtel påvirker altså både bearbejdigheden og trykstyrken. Det handler derfor om at finde en balance, så der opnås en god bearbejdighed, uden at  $v/c$ -forholdet bliver for højt. I praksis tilsættes typisk plastificerende tilsætningsstoffer for at opnå en god bearbejdighed uden at hæve  $v/c$ -forholdet [11].

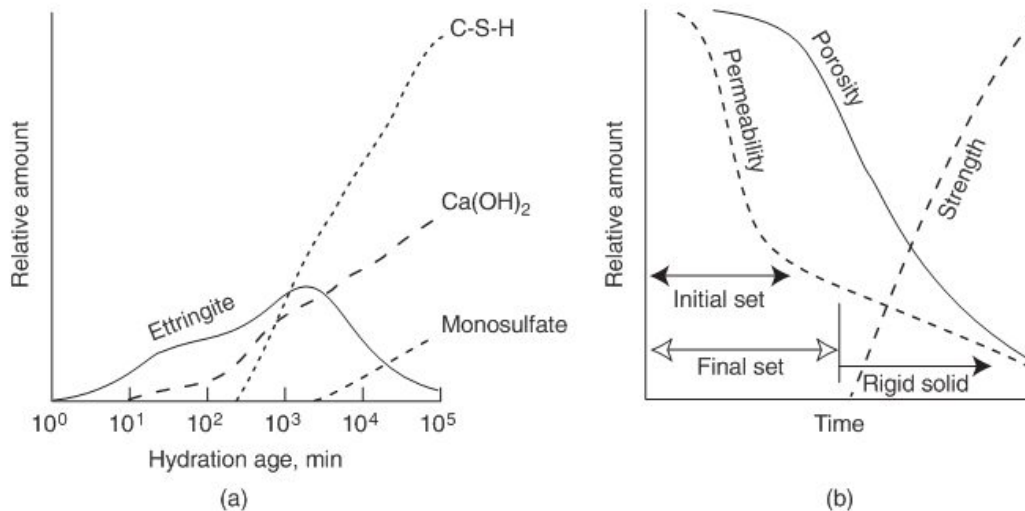
## 2.4 Hydratisering af cement

De kemiske reaktionerne mellem cement og vand, der danner produkter med bindende og styrkende egenskaber, kaldes hydratisering. Hydratiseringen starter lige så snart cement kommer i kontakt med vand. Hydratiseringsgraden beskrives på en skala fra 0-1, hvor 0 er en helt frisk blanding og 1 er en fuldstændig hydratiseret blanding.

Ikke alle hydratiseringsreaktionerne sker samtidigt eller har samme reaktionshastighed. Styrkeudviklingen og konsistensændring sker ikke samtidigt, hvoraf styrkeudviklingen sker sidst, se figur 2.3.



Hydratiseringsreaktioner, hvor kalciumaluminat indgår, fastlægger raten af konsistenstab og dermed forringes bearbejdigheden. Dette sker ved, at mængden af frit vand i blandingen formindskes. Hydratiseringsreaktioner hvor kalciumsilikat indgår, bestemmer raten for styrkeudviklingen, og sker først efter cementpastaen er blevet uformbar.



Figur 2.3: Hydratiseringsproces. (a) Typisk rate af dannelse af hydratiseringsprodukter i en typisk portland cementpasta. (b) Indflydelse af dannelse af hydrationprodukter på afbindingstid, porøsitet, permeabilitet samt styrke af cementpastaen. [17]

Dette medfører, at mikrostrukturen af cementpastaen og dermed betonens egenskaber ikke er statiske og ændrer sig over tid i takt med hydratiseringen. Det er derfor oplagt at følge f.eks. styrkeudviklingen, ved at teste styrken på flere forskellige tidspunkter.

## 2.5 Bearbejdighed

Bearbejdigheden beskriver, hvor nemt mørtlen formes og flyder ud i formen. Bearbejdigheden afhænger i høj grad af blandingens  $v/c$ -forhold, kornstørrelsen af de i blandede materialer og hydratiseringsgraden.

### 2.5.1 Flydesætmål

Flydesætmålet benyttes som mål for bearbejdigheden af en blanding. Ved komprimering af en mørtelblanding på et flydebord kan det måles, hvor meget blandingen flyder ud. Jo mere blandingen flyder ud, desto større er flydesætmålet og dermed også bearbejdigheden. Bearbejdigheden for forskellige mørtler kan bruges til at sammenligne deres vandbehov og justere vandindholdet.

### 2.5.2 Afbindingsforløb

Afbindingsforløbet er et mål for den tid, det tager beton at miste bearbejdigheden.

Afbindingstiden kan måles med et Vicatronic apparat eller manuelt med en Vicat, hvor dybden for nedsynkning af en nål i blandingen afgør bearbejdighedstilstanden.

Den indledende afbindingstid indikerer, hvornår cementpastaen ikke kan bearbejdes mere. Denne tid er, når nålen er  $6 \pm 3$  mm fra bunden af blandingen [5]. Den afsluttende afbindingstid indikerer, hvornår cementpastaen er fuldstændig størknet til fast form. Denne tid er, når nålen ikke kan komme mere end 0,5 mm ned i blandingen [5].

## 2.6 Trykstyrke

Styrken beskriver, hvor meget belastning der skal til, for at der opstår brud i et materiale. For beton gælder det, at det ingen betydelig trækstyrke haves og derfor benyttes oftest trykstyrken som mål for styrken. Skal beton optage træk, armeres den med stænger, kabler eller fibre ofte af stål [11]. Faktorer, som påvirker trykstyrken, er bl.a. kompaktion og hærdeforhold, mineralogi, tilsætningsstoffer, prøvegeometri

og fugtforhold, lasttype og belastningshastighed. Når styrken for beton skal defineres benyttes oftest 28 døgns styrken, da størstedelen af hydratiseringen er færdig her.

Trykstyrken for mørtelprismerne efter trykprøvning beregnes vha. følgende formel:

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

Hvor:

$\sigma$  er trykstyrken udtrykt som spænding [MPa]

F er trykstyrken udtrykt i kraft [N]

A er det trykkede tværsnitsareal [mm<sup>2</sup>]

### 2.6.1 Bolomeys formel

Styrken af beton kan teoretisk udregnes med Bolomeys formel [2]. Det vurderes, at formelen tilnærmelsesvis kan benyttes for mørtel, da formelen netop beskriver styrken i cementpastaen, som er svagere end selve tilslagene.

$$F_c = K \cdot \left( \frac{1}{v/c} - \alpha \right) \quad (2)$$

Hvor:

$F_c$  er betonens trykstyrke [MPa]

K er en konstant, som afhænger af cementtypen og terminen [-]

$v/c$  er masse-forholdet mellem vand og cement [-]

$\alpha$  er en konstant, som afhænger af cementtypen og terminen [-]

Det fremgår af formelen, at et lavere  $v/c$ -forhold medfører højere trykstyrke, som nævnt i afsnit 2.3.3. Konstanterne K og  $\alpha$  i Bolomeys formel for BASIS cement Aalborg Portland kan ses i figur 2.1.

Tabel 2.1: Vejledende konstanter til Bolomeys formel baseret på klasse A søsand og klasse M søsten jf. [2].

Cementtype	Termin [døgn]	K [-]	$\alpha$ [-]
BASIS cement	1	17	0,9
	7	26	0,6
	28	30	0,5

Formlen forudsætter et naturligt luftindhold i betonen på 1%. Dette betyder, at trykstyrken i praksis bliver lavere end forudsagt af formelen, hvis luftindholdet er højere. Dette kan ske, hvis betonen ikke er tilstrækkeligt bearbejdelig under støbning til at få vibreret luftboblerne ud.

Det bemærkes, at  $v/c$ -forholdet beskriver masseforholdet imellem mængden af frit tilgængeligt vand og cement. Mængden af frit tilgængeligt vand og mængden af tilsat vand er ikke nødvendigvis ens.  $V/c$ -forholdet i formelen bør derfor korrigeres for tilslagsmaterialers vandabsorption.

## 2.7 Holdbarhed

Holdbarheden for beton ønskes af økonomiske årsager så lang som muligt. Beton kan udsættes for forskellige forhold, som er ødelæggende og dermed forringer holdbarheden af betonen.

Holdbarheden hænger sammen med permeabiliteten. Permeabiliteten er et mål for, hvor nemt væske under tryk kan trænge ind i et materiale [17]. Permeabiliteten afhænger af porøsiteten, dermed også  $v/c$ -forholdet samt hydratiseringsgraden.

Hydratiseret cementpasta er stærkt basisk, og eksponering for sure opløsninger er derfor ødelæggende. Opløsninger kan trænge igennem betonens overflade og opløse hydratiseringsprodukterne, dette fører til porøsitet, som nedsætter styrken og holdbarheden af betonen.

## 2.8 Filler

Filler er et meget finkornet tilslag. Der tages udgangspunkt i en fillergrænse på  $250 \mu$  jf. [11] og [1]. En filler bidrager positivt til betons trykstyrke ved at optimere betonens kvalitet. Filleren udfylder luftrum i betonen, som derved bliver pakket tættere. Dette medfører en lavere porøsitet og dermed en højere trykstyrke.

Filleren kan også medføre heterogen kimdannelse. Dette er en fysisk proces, som fører til kemisk aktivering af krystallerne. Finkornet tilslag har et højt overfladeareal, hvilket siges at kunne optimere vækstbetingelser for krystaller. Dette har en accelererende virkning på hydratisering og fremskynder altså styrkeudviklingen [14].

## 2.9 Puzzolaneeffekt

En puzzolan er et materiale, som reagerer med calcium hydroxid og får cementbaserede egenskaber. Puzzolaner består en stor del af amorft materiale [17]. Amorft materiale har en ustruktureret opbygning og antager ikke fast krystallinsk form.

Puzzolaner reagerer langsommere end Portland cement og tilstedeværelsen kan identificeres på et styrkeudviklingsforløb ved sammenligning med en referenceprøve. Her vil en prøve indeholdende puzzolaner udvise en højere styrke senere i hærdningsforløbet.

Det er relevant at tjekke om mineaffaldet har puzzolaneeffekt, idet det vil forbedre 28 døgns styrken af betonen.

*[Blank side]*

## 3 Eksperimentelt arbejde

### 3.1 Mineaffaldskarakteristik

I dette afsnit beskrives kort forsøg udført for at undersøge karakteristik af mineaffaldet. Disse forsøg er udarbejdet for at beskrive mineaffaldets fysiske og kemiske sammensætning. Dette giver en idé om anvendelsesmuligheder ved inkorporering af mineaffaldet i mørtelprøver. Karakteristikkerne udføres for både Zinkgruvan og Nussir samt for BASIS cement fra Aalborg Portland og søsand 0-4mm for sammenligning. I tabel 3.1 ses en oversigt over de udførte karakteristikker.

Tabel 3.1: Oversigt over karakteristikker af mineaffald, BASIS cement og Søsand 0-4mm

Forsøgstype	BASIS cement	Søsand 0-4mm	Zinkgruvan	Nussir
Vandindhold	x	x	x	x
Vandabsorptionsevne		x	x	x
pH-værdi	x	x	x	x
Glødetab	x	x	x	x
Carbonatindhold	x	x	x	x
Oplukning	x	x	x	x
Pyknometer/Densitet	x	x	x	x
Laserdiffraktion	x	x	x	x
XRD-analyse			x	x

#### 3.1.1 Vandindhold

Vandindholdet bestemmes jf. *Dansk Standard* [6] og forsøgsvejledningen i bilag A.1. Vandindholdet for én prøve bestemmes ved at afveje prøven før og efter tørring i varmeskab ved 105°.

Derefter kan vandindholdet bestemmes ved følgende formel:

$$v = \frac{m_{våd} - m_{tør}}{m_{tør}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Hvor:

- $v$  er vandindhold [%]
- $m_{våd}$  er massen inden tørring [g]
- $m_{tør}$  er massen efter tørring [g]

Vandindholdet for mineaffaldet bestemmes ved gennemsnittet af tre prøver. Da mineaffaldet kun tørres ved 50 °C inden det benyttes i mørtelprøver, udregnes vandindholdet også for tørring ved kun 50 °C.

#### 3.1.2 Vandabsorptionsevne

Vandabsorptionsevnen beskriver, hvor meget vand et materiale kan indeholde. Dette kan påvirke den nødvendige vandmængde i en mørtelprøve, hvor materialet indgår. Vandabsorptionsevnen bestemmes jf. *Dansk Standard* [7] og forsøgsvejledningen i bilag A.2.

Prøve tørret ved 50 °C nedsynkes i vand i et par timer. Herefter varmes prøven ved svag varme indtil det er overfladetørt (ssd tilstand). Under opvarmningen tjekkes prøvens tilstand løbene med en sandkegle. Prøven vejes i ssd tilstand og igen efter tørring ved 105 °C.

Vandabsorptionsevnen kan beregnes ved følgende formel:

$$w_A = \frac{m_{ssd} - m_d}{m_d} \cdot 100\% \quad (4)$$

Hvor:

- $w_A$  er vandabsorptionsevnen [%]
- $m_{ssd}$  er massen af prøven i overfladetør tilstand [g]
- $m_d$  er massen efter tørring [g]

Det var ikke muligt at udføre forsøget med 300g prøve jf. *Dansk Standard* [7], pga. den tilgængelige prøvemængde. Der er brugt 250 g.

### 3.1.3 pH-værdi

pH-værdien bestemmes jf. forsøgsvejledningen i bilag A.3.

Til 5 g tør prøve tilføjes 12,5 mL 1 M KCl. Prøven stilles på rystebord i 1 time ved 150 rot./min., og herefter måles pH-værdien for prøvernes væskefase med en elektrode.

### 3.1.4 Glødetab

Glødetabet indikerer, hvor meget organisk materiale en prøve indholder. Dette er vigtigt, hvis der er risiko for brand i den konstruktion, som materialet benyttes i, da organisk materiale svinder ved høje temperaturer. Glødetabet bestemmes jf. forsøgsvejledningen i bilag A.4.

Der afvejes en prøve før og efter varmpåvirkning i en muffelovn ved 550 °.

Herefter kan glødetabet beregnes ved:

$$g_{550} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (5)$$

Hvor:

- $g_{550}$  er glødetabet [%]
- $m_1$  er massen af prøven inden muffelovnen [g]
- $m_2$  er massen af prøven efter muffelovnen ved 550° [g]

Glødetabet for mineaffaldet bestemmes ved gennemsnittet af tre prøver.

Herefter er samme prøve vejlet efter yderligere tørring ved 950 °. Dette gøres for at få en idé om, hvor stor en mængde letfordampende mineraler prøven indeholder. Indholdet af mineraler i et materiale kan være vigtigt, hvis mineralet er miljø- eller sundhedsskadeligt eller hvis mineralet kan indgå i reaktioner med vand eller cement.

Dette tal beregnes ved:

$$g_{950} = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \cdot 100 \quad (6)$$

Hvor:

- $g_{950}$  er massetabet imellem tørring ved 550 og 950 [%]
- $m_2$  er massen af prøven efter muffelovnen ved 550° [g]
- $m_3$  er massen af prøven efter muffelovnen ved 950° [g]

Mineralindholdet for mineaffaldet bestemmes ved gennemsnittet af tre prøver.

### 3.1.5 Carbonatindhold

Carbonatindholdet bestemmes jf. forsøgsvejledningen i bilag A.5.

Til at finde carbonatindholdet af en prøve benyttes et Scheibler-apparat. Ved tilsætning af fortyndet saltsyre til prøven, reagerer carbonat og saltsyre og danner vand, kuldioxid og metalioner. Apparatet måler mængden af reageret carbonat, ved at måle mængden af dannet kuldioxid. Resultatet sammenlignes med en standardkurve, som laves ved at afveje ren calciumcarbonat i varierende mængder og udføre målinger med Scheibler-apparatet.

Carbonatindholdet beregnes dernæst med følgende formel:

$$C = \frac{A \cdot 100}{B} \quad (7)$$

Hvor:

- C er indholdet af calciumcarbonat  $CaCO_3$  [%]
- A er  $CaCO_3$  i jorden ifølge standardkurven [g]
- B er afvejet jord [g]

Carbonatindholdet bestemmes som gennemsnittet af tre prøver.

### 3.1.6 Oplukning af jordprøve

Formålet med oplukning af en prøve er, at undersøge i hvilke mængder prøven indeholder forskellige udvalgte metaller. Det er nødvendigt at undersøge, at materialets indhold af metaller ikke overskrider grænser sat af Miljøstyrelsen [18]. Forsøgsvejledningen kan findes i bilag A.6.

En afvejet tør prøve tilsat 20mL halvkoncentreret  $HNO_3$  stilles i en autoklave. Autoklaven fyldes med 1,5L destilleret vand og lukkes. Autoklaven tændes, og når trykket når det blå felt, fortsætter autoklaveringen i 30min. Efter afkøling filtreres prøven gennem et  $0,45\mu m$ . Filtratet hældes i en 100mL sammen med destilleret vand og væsken gemmes til ICP.

Fra ICP'en fås metalkoncentrationen for de undersøgte metaller i [mg/L] og resultatet beregnes ved:

$$k = \frac{A \cdot 0.100L \cdot C}{B \cdot 10^{-3}} \quad (8)$$

Hvor:

- k er metalkoncentrationen [mg/kg]
- A er ekstraktens metalkoncentration [mg/L]
- B er afvejet prøve [g]
- C er fortyndingsfaktor [-]

Resultatet bestemmes ved gennemsnittet af tre prøver.

### 3.1.7 Pyknometer/Densitet

Densiteten bestemmes jf. forsøgsvejledningen i bilag A.7.

Prøven tilsættes i pyknometerglas og afvejes. Herefter tilsættes destilleret vand og prøven sættes i vakuumsug i en eksikator over natten. Vandets temperatur noteres og pyknometeret fyldes helt op med destilleret vand og vejes.

Densiteten af prøven beregnes med følgende formel:

$$\rho_s = \frac{m_4}{\frac{m_1 - m_0}{\rho_{w1}} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{w3}}} \quad (9)$$

Hvor:

$\rho_s$  er korrdensiteten for prøven [ $g/cm^3$ ]

$\rho_{w1}$  er vands densitet ved referencetemperatur  $22^\circ$  [ $g/cm^3$ ]

$\rho_{w3}$  er vands densitet ved den målte temperatur [ $g/cm^3$ ]

$m_0$  er vægten er det tomme pyknometer (inkl. prop) [g]

$m_1$  er vægten af vandfyldt pyknometer (inkl. prop) [g]

$m_2$  er vægten af pyknometeret med prøve i inden vacuum (inkl. prop) [g]

$m_3$  er vægten af vandfyldt pyknometer med prøve efter vacuum (inkl. prop) [g]

$m_4$  er vægten af prøven [g]

Resultatet bestemmes ved gennemsnittet af tre prøver.

### 3.1.8 Laserdiffraktion

Kornstørrelsefordelingen undersøges for en våd prøve med laserdiffraktometer (her: Mastersizer 2000). Natriumpyrophosphat blandes i prøven for at holde kornene adskilt. Destilleret vand hældes i laserdiffraktometeret med 1600rot./min. Baggrunden(vand) måles, og dette trækkes fra. Gennemsnittet for tre prøver benyttes. Forsøgsvejledningen kan findes i bilag A.8.

### 3.1.9 XRD-analyse

XRD (X-ray diffractions), altså røntgendiffraktion, benyttes til at bestemme, hvilke mineraler en prøve indeholder. En tør prøve knuses med en morter og analyseres med et røntgendiffraktometer. I røntgendiffraktometeret udsendes røntgenstråler mod prøven, som vil blive reflekteret tilbage i forskellige afbøjningsvinkler. Intensiteten af de reflekterede røntgenstråler indsamles, og der dannes et diffraktogram. Dette diffraktogram analyseres med programmet X'pert HighScore Plus, hvor det sammenlignes med diffraktogrammer af forskellige mineraler. Hvis diffraktogrammet fra prøven matcher et bestemt minerals diffraktogram, er mineralet muligvis tilstede i prøven. Resultatet bør dog sammenlignes med anden litteratur. Forsøgsvejledningen for X'pert Highscore Plus kan findes i bilag A.9.

## 3.2 Egenskaber for mørtelprøver

Egenskaber for blandede prøver hænger ikke nødvendigvis altid sammen med egenskaberne af de anvendte materialer. Mørtelblandinger hydratiserer og materialerne reagerer med hinanden og herved opstår nye egenskaber. For at undersøge egenskaberne støbes forskellige mørtelblandinger efter forskellige recepter. En oversigt over de forskellige blandinger kan ses i tabel 3.2, og de benyttede recepter kan ses i tabel 3.4, 3.5, 3.6 og 3.7. Forkortelserne, nævnt i tabel 3.2, benyttes fremadrettet i rapporten. I tabel 3.3 ses en oversigt over, hvilke forsøg der er udført på de forskellige blandinger.

*Tabel 3.2: Oversigt over mørtelblandinger med forkortelse og beskrivelse. Blandingerne er navngivet med Z-Zinkgruvn eller N-Nussir og derefter med blandereceptnummer. Recepterne kan ses i tabel 3.4, 3.5, 3.6 og 3.7.*

Forkortelse	Beskrivelse
R1-A	Referenceprøve uden mineaffald støbt i starten af projektperioden
R2-A	Referenceprøve uden mineaffald støbt halvvejs i projektperioden
Z-B.1	5 % cement udskiftet med Zinkgruvan
Z-B.2	10 % cement udskiftet med Zinkgruvan
N-B.1	5 % cement udskiftet med Nussir
N-B.2	10 % cement udskiftet med Nussir
Z-C.1	5 % cement udskiftet med Zinkgruvan og $v/c=0,5$
Z-C.2	10 % cement udskiftet med Zinkgruvan og $v/c=0,5$
N-C.1	5 % cement udskiftet med Nussir og $v/c=0,5$
N-C.2	10 % cement udskiftet med Nussir og $v/c=0,5$
Z-D.1	5 % cement udskiftet med Zinkgruvan og vandindhold ift. flydesætmaal
Z-D.2	10 % cement udskiftet med Zinkgruvan og vandindhold ift. flydesætmaal
N-D.3	5 % cement udskiftet med Nussir og vandindhold ift. flydesætmaal
N-D.4	10 % cement udskiftet med Nussir og vandindhold ift. flydesætmaal

*Tabel 3.3: Oversigt over undersøgte egenskaber for mørtelblandinger*

Prøve	Trykstyrketest	Flydesætmaal	Afbindingsforløb
R1-A	x	x	x
R2-A	x	x	
Z-B.1	x	x	x
Z-B.2	x	x	x
N-B.1	x	x	x
N-B.2	x	x	x
Z-C.1	x	x	
Z-C.2	x	x	
N-C.1	x	x	
N-C.2	x	x	
Z-D.1	x	x	
Z-D.2	x	x	
Z-D.3	x	x	
Z-D.4	x	x	

### 3.2.1 Proportionering af blandinger

I dette afsnit ses de blanderecepter, som der er afvejet mørtelblandinger efter. De eksakte afvejninger kan se i bilag B.10, B.11 og B.12. Ved proportionering af blandingerne tages der udgangspunkt i *Dansk Standard* [8]. Der benyttes BASIS cement Aalborg Portland, destilleret vand, Søsand 0-4mm samt mineaffald fra Nussir og Zinkgruvan. Blandingsrecepten for referencemørtlen ses i tabel 3.4, imens udskiftning af cement med hhv. 5% og 10% mineaffald ses i tabel 3.5.



Tabel 3.4: Blanderecept for referenceprøve jf. Dansk Standard [8]

Blanderecept A	
v/c=0.5, cement/sand=0.33	
Bestanddel	Mængde [g]
BASIS cement Aalborg Portland	450
Destilleret vand	225
Søsand 0-4mm	1350
Mineaffald	0

Tabel 3.5: Blanderecepter for 5% og 10% cementerstatning med mineaffald

Blanderecept B.1		Blanderecept B.2	
v/c=0.53, cement/sand=0.32, 5% mineaffald		v/c=0.56, cement/sand=0.3, 10% mineaffald	
Bestanddel	Mængde [g]	Bestanddel	Mængde [g]
BASIS cement Aalborg Portland	427,5	BASIS cement Aalborg Portland	405
Destilleret vand	225	Destilleret vand	225
Søsand 0-4mm	1350	Søsand 0-4mm	1350
Mineaffald	25,5	Mineaffald	45

For undersøgelser af mørtel med justering af vandindholdet efter et v/c-forhold på 0.5, ses blandingsrecepten for udskiftning med hhv. 5% og 10% mineaffald i tabel 3.6. Recepten er udregnet med udgangspunkt i recepten fra tabel 3.5, hvorefter vandmængden er justeret.

Tabel 3.6: Blandesrecepter for optimering af vandindholdet med v/c=0,5

Blanderecept C.1		Blanderecept C.2	
v/c=0.5, cement/sand=0.32, 5% mineaffald		v/c=0.5, cement/sand=0.3, 10% mineaffald	
Bestanddel	Mængde [g]	Bestanddel	Mængde [g]
BASIS cement Aalborg Portland	427,5	BASIS cement Aalborg Portland	405
Destilleret vand	213,75	Destilleret vand	202,5
Søsand 0-4mm	1350	Søsand 0-4mm	1350
Mineaffald	22,5	Mineaffald	45

For undersøgelse af mørtel med justering af vandindholdet med henblik på flydesætmålet, ses blandingsrecepterne for udskiftning af cement med hhv. 5% og 10% af hhv. Zinkgruvan og Nussir i tabel 3.7. Der er taget udgangspunkt i recepten fra tabel 3.4. Vandindholdet er bestemt ved justering af flydesætmålet, så det svarer til flydesætmålet for referencen, se fremgangsmetoden for bestemmelse af flydesætmål i afsnit 3.2.4. Der er udarbejdet et lineært forhold imellem flydesætmålet og vandindholdet i mørtler med hhv. 5% og 10% mineaffald fra hhv. Zinkgruvan og Nussir. Ved lineær regression og interpolering er vandindholdet, som giver et flydesætmål svarende til referenceprøven, bestemt. De benyttede lineære forhold kan ses på figur 4.10 i afsnit 4.3.2.1. De benyttede ligninger kan ses i bilag B.15.

Tabel 3.7: Blanderecepter for justering af vandindholdet ved optimering af bearbejdelighed

Blanderecept D.1		Blanderecept D.2	
v/c=0.55, cement/sand=0.32, 5% Zinkgruvan		v/c=0.59, cement/sand=0.3, 10% Zinkgruvan	
Bestanddel	Mængde [g]	Bestanddel	Mængde [g]
BASIS cement Aalborg Portland	427,5	BASIS cement Aalborg Portland	405
Destilleret vand	237,5	Destilleret vand	238
Søsand 0-4mm	1350	Søsand 0-4mm	1350
Mineaffald	22,5	Mineaffald	45

Blanderecept D.3		Blanderecept D.4	
v/c=0.52, cement/sand=0.32, 5% Nussir		v/c=0.54, cement/sand=0.3, 10% Nussir	
Bestanddel	Mængde [g]	Bestanddel	Mængde [g]
BASIS cement Aalborg Portland	427,5	BASIS cement Aalborg Portland	405
Destilleret vand	221,5	Destilleret vand	219
Søsand 0-4mm	1350	Søsand 0-4mm	1350
Mineaffald	22,5	Mineaffald	45

### 3.2.2 Blanding af mørtelprøver

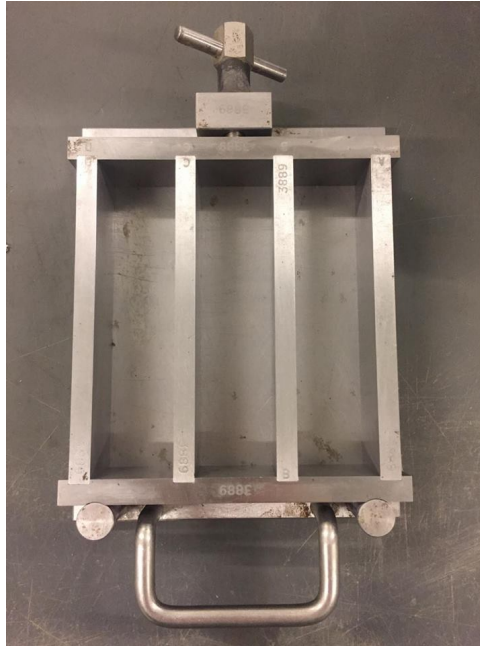
Blanding af mørtelprøver foregår i hht. *Dansk Standard* [8]. Forsøgsvejledningen kan findes i bilag A.10. Materialerne afvejes i forhold til den ønskede recept. Der benyttes sand tørret ved 105°C og mineaffald tørret ved 50 °C, da høje temperaturer kan ødelægge strukturen i mineaffaldet. Selve blandingen foregår i følgende trin og røremaskinen Toni Industri benyttes.

1. Cement og evt. mineralsk tilsætning (her: mineaffald) fyldes i skålen tilhørende røremaskinen.
2. Vand tilsættes til tiden 00:00, og der røres på lav hastighed til tiden 00:30
3. Sand tilsættes gradvist fra tiden 00:30 til tiden 01:00
4. Der blandes ved middelhastighed fra tiden 01:00 til tiden 01:30
5. Røremaskinen stoppes i tiden 01:30 til tiden 03:00, hvor de første 30 sek. bruges på at skrabe mørtel ned fra siderne af skålen.
6. Der blandes ved middelhastighed i tiden 03:00-04:00
7. Mørtlen er klar til brug

### 3.2.3 Støbning af mørtelprøver

Mørtelblandingen blandes jf. afsnit 3.2.2. Støbning af mørtelprøver foregår jf. [8] og forsøgsvejledningen i bilag A.10.

Støbeforme til tre prøver af dimensionerne 40mm x 40mm x 160mm benyttes, se figur 3.1. Støbeformen smøres med formolie inden brug. Støbeformen fyldes halvt med mørtel og vibreres i 20 sek ved en hastighed på 50 Hz. Formen fyldes nu helt og vibreres igen i 20 sek ved en hastighed på 50 Hz. Formen dækkes tæt med plastic og tørrer. Ca. 24 timer senere afformes prøverne og støbeformen rengøres. Mørtelprøverne hærdes herefter under vand i ønsket tid.

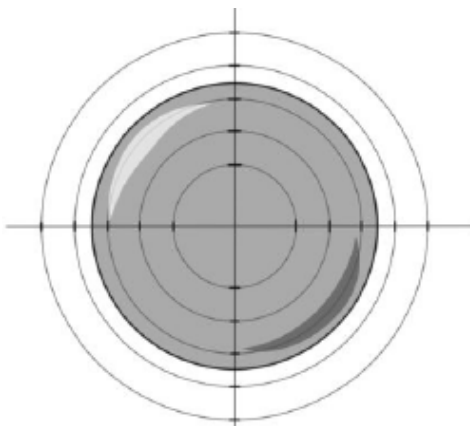


Figur 3.1: Støbeform til tre mørtelprismer af dimensionerne 40mm x 40mm x 160mm

### 3.2.4 Flydesætmål

Mørtelblandingen blandes jf. afsnit 3.2.2.

Bearbejdigheden af mørtelblandingen udføres jf. *Dansk Standard* [5] og forsøgsvejledningen i bilag A.11. Form (50mm) placeres på flydebord og fyldes halvt op med mørtel og komprimeres med 10 korte slag med tamperen. Formen fyldes helt op og komprimeres igen med 10 korte slag med tamperen. Toppen afrettes med afretteren og efter ca. 15 sek. løftes formen. Håndtaget køres 15 gange med ca. 1 sek. interval. Flydesætmålet måles lodret og vandret, se figur 3.2. Dette gøres for to mørtelblandinger og resultatet er gennemsnittet for det vandrette og lodrette mål for begge mørtelblandinger.



Figur 3.2: Måling af flydesætmål

### 3.2.5 Afbindingsstid

Afbindingstid udføres jf. *Dansk Standard* [9]. Forsøgsvejledningen for udførelse samt brug af vicatronic kan findes i bilag A.12.

Vicatronic kalibreres inden brug. Mørtelblandingen blandes jf. afsnit 3.2.2. Et bægerglas fyldes 40mm op med mørtel og overfladen gøres så jævn som muligt. Bægeret placeres under nålen i vicatronic, som det ses på figur 3.3. Testen kører i 850 min. Herefter kan vicat mønsteret ses i mørtelprøven, se figur 3.4

Testen udprintes dagen efter og herefter laves et punktdiagram. Indledende og endelig afbindingstid aflæses.



Figur 3.3: Forsøgsopstilling til bestemmelse af afbindingstid med Vicatronicapparatet



Figur 3.4: Vicat mønster jf. [5]

### 3.2.6 Trykprøvning

Trykstyrken af mørtelprøverne udføres jf. *Dansk Standard* [8] og forsøgsvejledningen i bilag A.13. Mørtelblandingen blandes og støbes som nævnt ovenfor i afsnit 3.2.2 og 3.2.3 og hærdes i ønsket tid. Inden trykprøvningen måles prøvens dimensioner og prøven vejes. Forsøgsopstillingen opstilles i prøvemaskinen Toni 3000, se figur 3.5 og prøven testen i tryk til brud i hver ende. For hver mørtelblanding er resultatet for trykstyrken gennemsnittet af 6 trykstyrker. Målte trykstyrke, som afviger  $\pm 10\%$  fra gennemsnittet, kasseres.



Figur 3.5: Forsøgsopstilling i Toni 3000 til bestemmelse af trykstyrke

### 3.2.7 Porøsitet og densitet

Prøver, blandet og støbt jf. afsnit 3.2.2 og 3.2.3, hærdes i 28 dage og derefter tørret ved  $50^{\circ}$  i 3 uger, testes.

Prøverne vejes og placeres i eksikator, som tilsluttes vakuumpumpen og pumpes ned i 3 timer. Der ledes destilleret vand ind til vandstanden er ca. 3cm over prøverne og hanen lukkes og eksikatoren står i en

time. Prøven skal herefter stå i atmosfæretryk natten over. Prøverne vejes vandmættet på teknisk vægt under vand og herefter over vand.

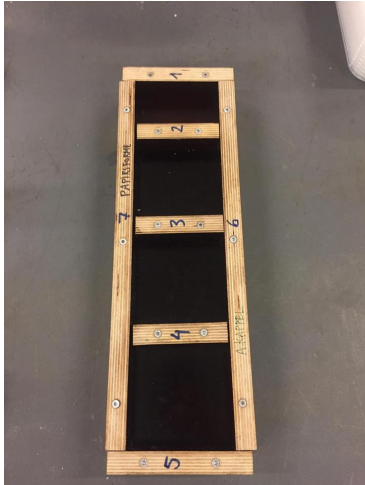
Udregning foregår med formler, som kan findes i forsøgsvejledningen i bilag A.14.

### 3.2.8 Farveprøve

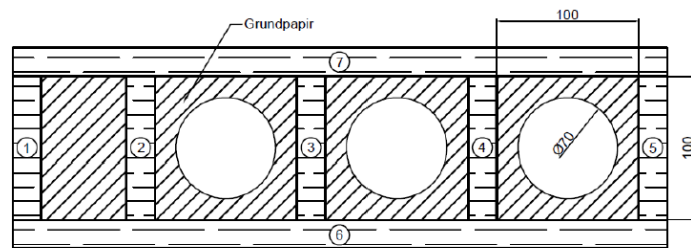
En farveprøve benyttes til visuel analyse af en mørtelprøve.

Farveprøven laves ud fra forsøgsvejledningen, som kan findes i bilag A.15.

Farveprøveformen benyttes, se figur 3.6. Grundpapir til formen skæres ud med cirkler, som det ses på figur 3.7. Formen smøres med et tyndt lag formolie og en mørtelblanding blandes, som beskrevet i afsnit 3.2.2. Papirskabelonen gøres våd og skrues fast i formen. Formen fyldes med mørtelblanding og støbes som beskrevet i afsnit 3.2.2.



Figur 3.6: Farveprøveform



Figur 3.7: Farveprøveform med dimensioner til papirskabelonen

*[Blank side]*

## 4 Resultater og diskussion

I dette afsnit fremvises og diskuteres resultater fundet i forbindelse med projektet.

Først vil resultater fra indledende undersøgelser blive diskuteret. De indledende undersøgelser består af karakteristik af mineaffaldet og dernæst egenskaber af mørtelprøver, hvor hhv. 5% og 10% af cementen er substitueret med mineaffald fra hhv. Nussir og Zinkgruvan.

Ud fra af disse resultater vurderes det, hvilke resultater der kunne lede til andre relevante og interessante videregående undersøgelser. Da omfanget af projektet er begrænset, udvælges og udføres få af disse undersøgelser herefter. Resultaterne af disse videregående undersøgelser fremvises og diskuteres dernæst. I de videregående undersøgelser vurderes det, om trykstyrken af mørtelprøver med mineaffald kan forbedres ved justering af vandindholdet på to forskellige måder.

### 4.1 Indledende undersøgelser

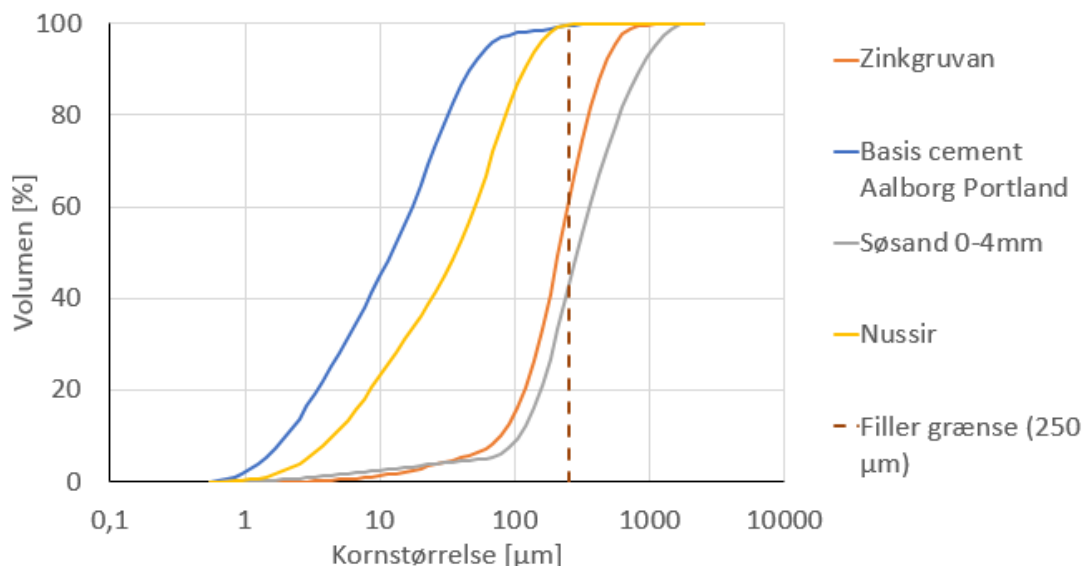
Resultaterne i dette afsnit omfatter en karakteristik af mineaffaldet samt egenskaber for mørtelprøver, hvori cementen er delvist erstattet med mineaffald.

#### 4.1.1 Karakteristik af mineaffald

En karakteristik af mineaffaldet beskriver dets egenskaber og kan benyttes som indsigt i dets anvendelsesmuligheder i beton. Resultaterne for mineaffaldets egenskaber sammenlignes med søsand 0-4mm og BASIS cement fra Aalborg Portland.

##### 4.1.1.1 Kornstørrelser

Kornstørrelsen for de to typer mineaffald måles. Til sammenligning er kornstørrelsen for BASIS cement Aalborg Portland og Søsand 0-4mm også målt. Målingerne kan ses på figur 4.1 og data kan findes i bilag B.9.



Figur 4.1: Kornstørrelse fordeling for søsand 0-4mm, BASIS cement, Zinkgruvan og Nussir. Grænseværdi for filler jf. [11]

Ud fra figur 4.1 ses det, at Nussirs kornstørrelse i højere grad ligner cement, imens Zinkgruvan i højere grad kan sammenlignes med sand. Kornstørrelsefordelingen for Nussir ligger under fillergrænsen på  $250\mu\text{m}$  og ved at agere som filler, kan tilsætningen af Nussir udfylde lufthullerne og derved pakke betonen tættere. Det forventes altså, at ved tilsætning i beton vil filleregenskaben af mineaffaldet fra Nussir bidrage positivt til trykstyrken. Derudover er det muligt, at mineaffaldet fra Nussir giver anledning til heterogen kimdannelse, hvilket, som forklaret i afsnit 2.8, vil medvirke en tidlig styrkeudvikling.

Kornstørrelsen for mineaffaldet fra Zinkgruvan opfylder ikke fillergrænsen. En større kornstørrelse vil jf. afsnit 2.3.3 kræve mindre vand, og det kan derfor forventes at mørtelblandinger med Zinkgruvan behøver mindre vand for at opnå en tilstrækkelig bearbejdelighed.

#### 4.1.1.2 Tungmetalindhold

Det er vigtigt at kende indholdet af tungmetaller, idet nogle tungmetaller er sundhedsskadelige og forurenende. Der er derfor en grænse for den mængde tungmetaller, byggematerialer må indeholde. Indholdet af tungmetaller er blevet bestemt med oplukning. Resultaterne kan ses i tabel 4.1, og data kan findes i bilag B.7.

Da der endnu ikke er defineret grænseværdier for tungmetalindhold for mineaffald i byggeri, sammenlignes resultaterne med grænseværdier for jordkvalitetskriteret sat af Miljøstyrelsen [18]. Det er et krav, at disse grænseværdier overholdes for at undgå forurening af naturen. Værdier, som ikke overholder jordkvalitetskriteriet, er markeret med rødt i tabellen.

Tabel 4.1: Indhold af tungmetaller [mg/kg  $\pm$  std. afv.] i Zinkgruvan, Nussir, BASIS cement Aalborg Portland, søsand 0-4mm, samt grænseværdier for jordkvalitetskriteret [18]

	Arsen	Barium	Cadmium	Kobber	Nikkel	Zink	Bly
<b>Zinkgruvan</b>	55,1 $\pm$ 5,2	255,2 $\pm$ 5,9	15 $\pm$ 0,5	271,9 $\pm$ 12,4	20,5 $\pm$ 0,5	9536,8 $\pm$ 346,4	4094,7 $\pm$ 137
<b>Nussir</b>	0	63,1 $\pm$ 1,9	0,2 $\pm$ 0	246 $\pm$ 2,4	10,8 $\pm$ 0,4	9,7 $\pm$ 0,5	6,12 $\pm$ 5,0
<b>BASIS cement</b>	6,3 $\pm$ 1,7	223,3 $\pm$ 42,7	0,5 $\pm$ 0,1	80,9 $\pm$ 15,3	20 $\pm$ 3,7	239,5 $\pm$ 45,5	25,9 $\pm$ 4,4
<b>Søsand 0-4mm</b>	0	2,7 $\pm$ 1,5	0	0	1,2 $\pm$ 0,5	4,7 $\pm$ 1,6	0
<b>Grænseværdi [18]</b>	20	100	0,5	500	30	500	40

Det fremgår af tabellen, at Nussir overholder alle grænseværdierne og derfor umiddelbart kan benyttes i byggematerialer uden yderligere forarbejdning. Zinkgruvan overholder ikke grænseværdierne for arsen, barium, zink og bly. Indholdet af disse tungmetaller skal altså formindskes, før mineaffald fra Zinkgruvan kan benyttes i byggematerialer. Ifølge resultaterne for cement, overskrider denne også grænseværdier for barium og cadmium, på trods af at den er godkendt til brug i byggeri.

#### 4.1.1.3 XRD analyse

For at undersøge hvilke mineraler mineaffaldet indeholder, er der foretaget en XRD analyse for hver af de to slags mineaffald. XRD-analysen for Zinkgruvan er genbrugt fra [19]. Resultatet af analysen kan ses på figur 4.2.





pH-værdien for både Zinkgruvan og Nussir er neutral sammenlignet med BASIS cement. Det kan derfor ikke udelukkes, at mineaffaldet kan sænke pH-værdien i beton. Som forklaret i afsnit 2.7, er det vigtigt for betons kvalitet at bibeholde en høj pH-værdi. pH-værdien for Nussir er en anelse højere end for Zinkgruvan og vil derfor have mindst negativ effekt på betonen.

Indholdet af karbonat er undersøgt volumetrisk. Standardrækken, benyttet til at finde karbonatindholdet, kan ses i bilag B.6. Carbonatindholdet er meget højt for cement, da cement indeholder kalcium karbonat. Det er højere for Zinkgruvan end Nussir, hvilket skyldes indholdet af kalcium karbonater i mineralet calcit.

Der er resultater for to forskellige slags glødetab. Glødetabet for 550°C ovnen, giver en idé om indholdet af organisk materiale i mineaffaldet. Dette glødetab er som forventet lavt for begge slags mineaffald, da de har været igennem en del forberedning i forvejen. Glødetabet for cementen er højere end for mineaffaldet, hvilket skyldes fordampning af carbonater, som forefindes i kalkfillerne.

Glødetabet for 950°C ovnen indikerer indholdet af letfordampende mineraler. Dette indhold er tre gange så højt for Nussir, som for både cement og Zinkgruvan. Letfordampende mineraler kan bl.a. være kalcium karbonat, men for Nussir må der forefindes andre letfordampende mineraler, siden karbonatindholdet viste sig at være lavt.

Korndensiteten for Zinkgruvan og Nussir er næsten ens, men er begge lavere end korndensiteten for BASIS cement. Dette kan resultere i nogle tungere prøver ved tilsætning af mineaffald.

#### 4.1.1.5 Vandindhold og vandabsorptionsevne

Mineaffaldets vandindhold og vandabsorptionsevne kan påvirke blandingsforholdene, når det tilsættes i en mørtelblanding. Resultaterne for vandindhold og vandabsorptionsevnen for Zinkgruvan, Nussir, søsand 0-4mm og BASIS cement Aalborg Portland kan ses i tabel 4.3 og dataene kan findes i bilag B.1 og B.2.

Tabel 4.3: Data for vandindhold og vandabsorptionsevne

	Zinkgruvan	Nussir	BASIS cement	Søsand 0-4mm
Vandabsorptionsevne [%]	0,62	0,44	-	0,14
Vandindhold 105°C [%]	9,93	0,25	0,42	0,97
Vandindhold 50°C [%]	9,15	0,12	0,22	-
Diff(105°C - 50°C) [%]	0,78	0,13	0,2	-

Vandabsorptionsevnen beskriver, hvor meget vand et materiale kan indholde i vandmættet tilstand. Forsøget er udført på mineaffald tørret ved 50°C og sand tørret ved 105°C, som det vil forekomme i mørtelblandingerne. Det fremgår af tabel 4.3, at mineaffaldets absorptionsevne er større end sands. Dette betyder, at hvis sand i beton substitueres med mineaffald, skulle der højst sandsynligt tilsættes mere vand til blandingen.

Det ses, at Zinkgruvans absorptionsevne er større end Nussirs. et kan forventes, at ved tilsætning af Zinkgruvan i mørtlen, skal der benyttes mere vand end ved mørtelprøver med Nussir. Forsøget er ikke lavet for cement, da cement og vand ville hydratisere under forsøget.

Vandindholdet er målt for tørring både ved 105°C og 50°C af mineaffaldet. Mineaffaldet tørres kun ved 50°, inden det tilsættes i mørtelblandingen, da mineaffaldets struktur kan blive ødelagt ved høje temperaturer. Mineaffaldet indeholder altså stadig en mængde vand, når det tilsættes. Den vandmængde mineaffaldet indeholder ved blanding, svarer til differencen imellem indholdet ved 105°C og indholdet ved 50°C.

Vandmængdebidraget til mørtelblandingen for 10% cementerstatning med mineaffald kan beregnes som:

Zinkgruvan:  $0.78\% \cdot 45g = 0.351g$  vand.

Nussir:  $0.12\% \cdot 45g = 0.0586g$  vand.

Det svarer altså til hhv. 0,16% og 0,026 % af vandindholdet for blandingsrecepterne B.1 og B.2. Vandindholdet af mineaffaldet vurderes til at være så småt, at det kan negligeres ved proportionering af blandingerne.

Det ses, at Zinkgruvans vandindhold er meget højt sammenlignet med Nussir, søsand og cement. Dette kan skyldes opbevaringen af Zinkgruvan inden brug til projektet.

Sands vandindhold overskrider ikke grænsen på 0,2% [8], og er derfor godkendt til brug i beton.

### 4.1.2 Egenskaber for mørtel ved udskiftning af cement med mineaffald

Ved diskussion og vurdering af resultater i dette afsnit, er det essentielt at huske på, at der er arbejdet med mørtel, hvilket vil give usikkerheder ved anvendelse af resultaterne til beton. Derudover er forsøgsomgivelserne ikke kontrollerede i ønsket grad og kan derfor afvige fra de angivne kriterier i Dansk Standard [9]. Det kan specielt være svært at sammenligne resultater fra forsøg udført på forskellige dage, hvis omgivelserne ændrer sig.

I dette afsnit beskrives resultater fra forsøg på mørtelprøver blandet efter Blandingsrecept B.1 og B.2, se tabel 3.5. Sand og mineaffald er tørret inden blanding, idet vådt materiale vil give store standardafvigelser jf. forsøg udført i [19].

#### 4.1.2.1 Densitet og porøsitet

Porøsitet er afgørende for betons styrke, og derfor undersøges denne samt densiteten af støbte mørtelprøver. Resultaterne ses i tabel 4.4, og data kan ses i bilag B.20.

Da Zinkgruvan har en højere vandabsorptionsevne end Nussir, vil der være mindre frit vand i mørtler med Zinkgruvan. Dette vil medføre et mindre  $v/c$ -forhold for prøver med Zinkgruvan og dermed en mindre porøsitet.

Hvis man derimod betragter Nussirs potentiale som filler pga. dens kornstørrelse, vil betonen blive pakket tættere. Porøsiteten bliver dermed mindre og densiteten højere.

Tabel 4.4: Data for porøsitet og densitet af Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R1-A

	R1-A	Z-B.1	Z-B.2	N-B.1	N-B.2
Porøsitet $P_a$ $m^3/m^3$	0,21	0,21	0,22	0,21	0,22
Tørdensitet $\rho_d$ $[kg/m^3]$	2008,2	2009,5	1995,4	2023,0	1995,0

Resultaterne viser ingen nævneværdig forskel i porøsiteten for nogle af mørtelprøverne.

Det ses i tabel 4.4, at tørdensiteten for N-B.1 er højere end resten af prøverne som forventet, imens N-B.2 har en lavere tørdensitet. Der ses næsten ingen forskel på R1-A og Z-B.1, imens Z-B.2 er lavere.

Der ses ingen sammenhæng imellem den målte tørdensitet og kornstørrelsen på mineaffaldet. Der findes heller ingen sammenhæng imellem den målte tørdensitet og prøvernes forventede  $v/c$ -forhold.

Det bemærkes, at densiteten for prøverne med mineaffald falder fra 5% til 10%. Dette kan hænge sammen med, at korndensiteten for mineaffaldet er højere end for cement.

#### 4.1.2.2 Bearbejdelighed

Bearbejdeligheden beskrives med flydesætmålet. De målte flydesætmål kan ses i tabel 4.5. Data kan findes i bilag B.13.

Da alle flydesætmålene ikke er testet samme dag, kan der være forskel i omgivelserne, som giver anledning til fejlkilder. F.eks. kan en høj luftfugtighed medvirke til et højere flydesætmål.

Tabel 4.5: Flydesætmål for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R1-A

	R1-A	Z-B.1	Z-B.2	N-B.1	N-B.2
Flydesætmål	116,25 $\pm$ 2,87	113,75 $\pm$ 2,02	118,63 $\pm$ 3,35	131,88 $\pm$ 3,33	120,75 $\pm$ 7,14

Som forventet har mørtler med Nussir et højere flydesætmål end mørtler med Zinkgruvan. Dette kan forklares med, at der er mere frit vand i en mørtel med Nussir, da absorptionsevnen af denne er lavere end for Zinkgruvan. Det er dog nævnt i afsnit 4.1.1.1, at en større kornstørrelse, kunne medføre et mindre vandbehov for at opnå en tilstrækkelig bearbejdelighed, men dette ser ikke ud til at blive bekræftet.

Det ses i tabel 4.5, at Z-B.1 har et lavere flydesætmål end referencen, imens Z-B.2 har et højere flydesætmål. Flydesætmålene kan forklares hver for sig, men ikke sammen. Z-B.1 kan have en lavere bearbejdeligheden end R1-A pga. Zinkgruvans absorptionsevne. Z-B.2 kan have en højere bearbejdelighed end R1-A, da Zinkgruvans kornstørrelse formindsker vandbehovet. Men da de to resultater sammen er modstridende, kan der ikke konkluderes noget entydigt.

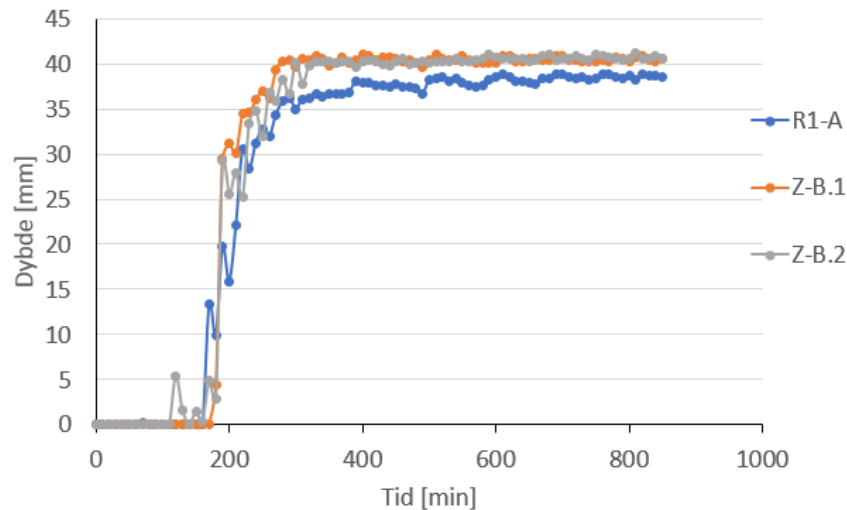
Både N-B.1 OG N-B.2 har et højere flydesætmål end R1-A. Dette kan forklares med Nussirs lave absorptionsevne. Cementen suger altså mere vand end mineaffaldet fra Nussir. N-B.1 har et højere flydesætmål

end N-B.2. Dette resultat understøttes ved, at en øget mængde af cement forventer at give en øget bearbejdelighed. Det bemærkes da, at flydesætmålet for N-B.2 har en høj standardafvigelse.

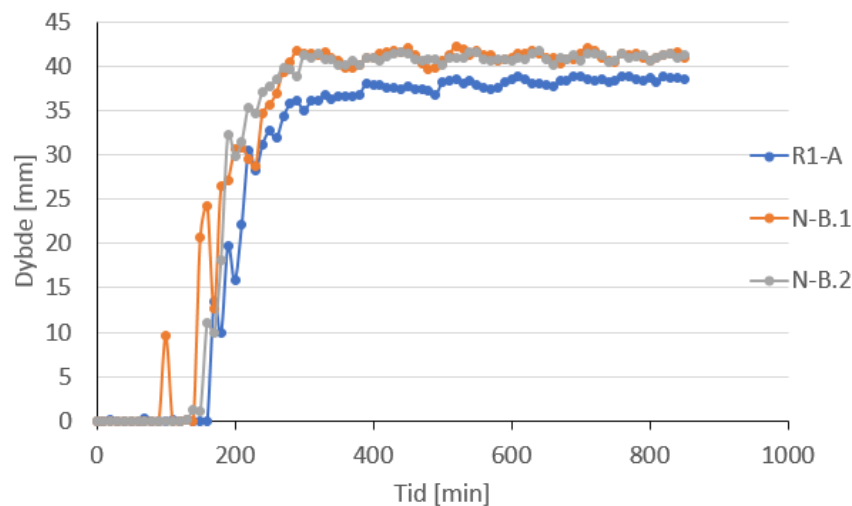
Det kan konkluderes, at der ikke er fundet en direkte sammenhæng imellem mineaffaldets vandabsorptionsevne og bearbejdeligheden. Derudover konkluderes det, at mineaffaldet generelt absorberer mindre vand end cementen.

#### 4.1.2.3 Afbindingstid

Afbindingsforløbet for mørtelprøver med Zinkgruvan ses på figur 4.3 og afbindingsforløbet for mørtelprøver med Nussir ses på figur 4.4. Begge sammenlignes med en referenceprøve. Den indledende og endelige afbindingstid jf. [5] er angivet i tabel 4.6. Data kan findes i bilag B.16.



Figur 4.3: Afbindingsforløb for Z-B.1, Z-B.2 sammenlignet med R1-A



Figur 4.4: Afbindingsforløb for N-B.1, N-B.2 sammenlignet med R1-A

Tabel 4.6: Indledende og endelige afbindingstider for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R1-A

	R1-A	Z-B.1	Z-B.2	N-B.1	N-B.2
Indledende afbindingstid	170	180	170	150	160
Endelige afbindingstid	510	310	590	290	300

Kurven for afbindingsforløbet for referenceprøven ligger lavere end resten på figur 4.3 og 4.4, hvilket kan skyldes, at højden af prøven har været lavere. Fejlkilder som ujævn overflade kan være skyld i springende, som ses på figur 4.3 og 4.4 imellem 100 og 200 min.

Sammenlignes den indledende afbindingstid for R1-A på 170 min. med de angivne for BASIS cement [1] på 165 min., stemmer de godt overens. Forskellen kan skyldes, at der i forsøget er målt i intervaller på 10 min. i stedet for 5 min. som angivet i *Dansk Standard* [5].

De indledende afbindingstider for mørtelprøver med mineaffald varierer med max  $\pm 20$  min. fra R1-A, imens de afsluttende varierer med op til  $\pm 220$ min.

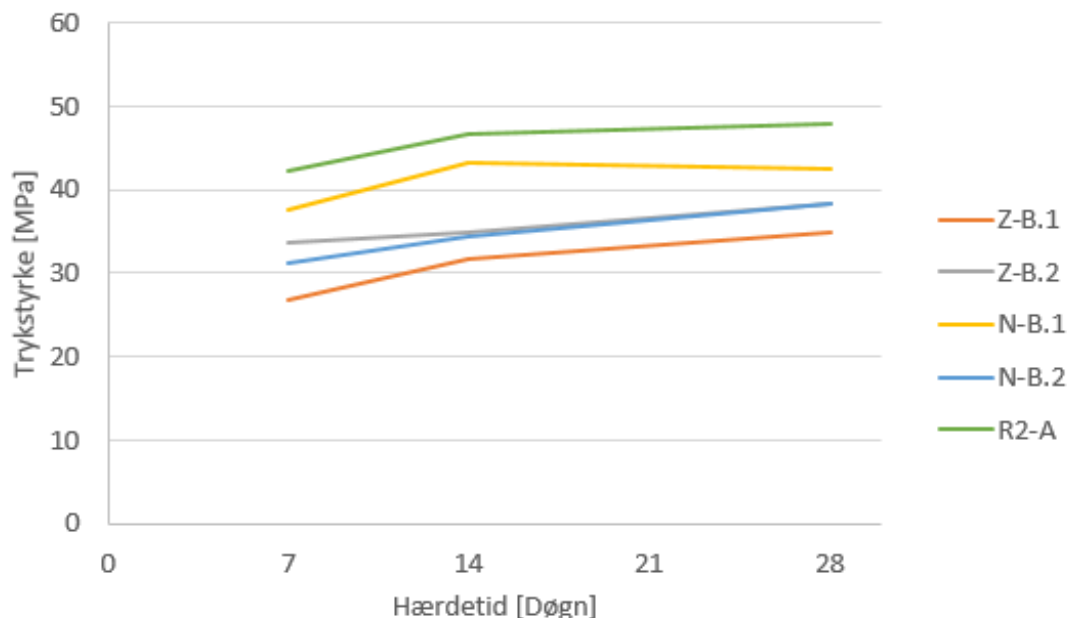
Det var forventet, at afbindingstiden forsinkes ved tilsætning af mineaffald, idet der er mindre cement i mørtlen, og dermed må hydratiseringen foregå langsommere.

Det viser sig, at prøverne med mineaffald fra Nussir afbinder hurtigere end referencen både indledende og endeligt. Dette kan skyldes heterogen kimdannelse i forbindelse med Nussirs potentiale som filler, fundet i afsnit 4.1.1.1. Heterogen kimdannelse fremskynder hydratiseringen som nævnt i afsnit 2.8 og dermed også afbindingstiden. Det ville dog være forventet, at dette ville give anledning til en acceleration af afbindingstiden fra 5% erstatning til 10% erstatning. Forlængelsen af afbindingstiden fra 5% erstatning til 10% erstatning skyldes sandsynligvis formindskelsen af cementindhold og dermed hydratiseringsreaktant. For Z-B.1 haves en forsinket indledende afbindingstid ift. R1-A, imens den for Z-B.2 er uændret. Forsinkelsen for Z-B.1 er forventet, imens det ikke er forklarligt, hvorfor afbindingstiden er uændret for Z-B.2. Afbindingstiden for Z-B.2 kan skyldes en ujævn overflade, som det også fremgår af figur 4.3. Den endelige afbindingstid er derimod hurtig for Z-B.1, men er som forventet langsom for Z-B.2.

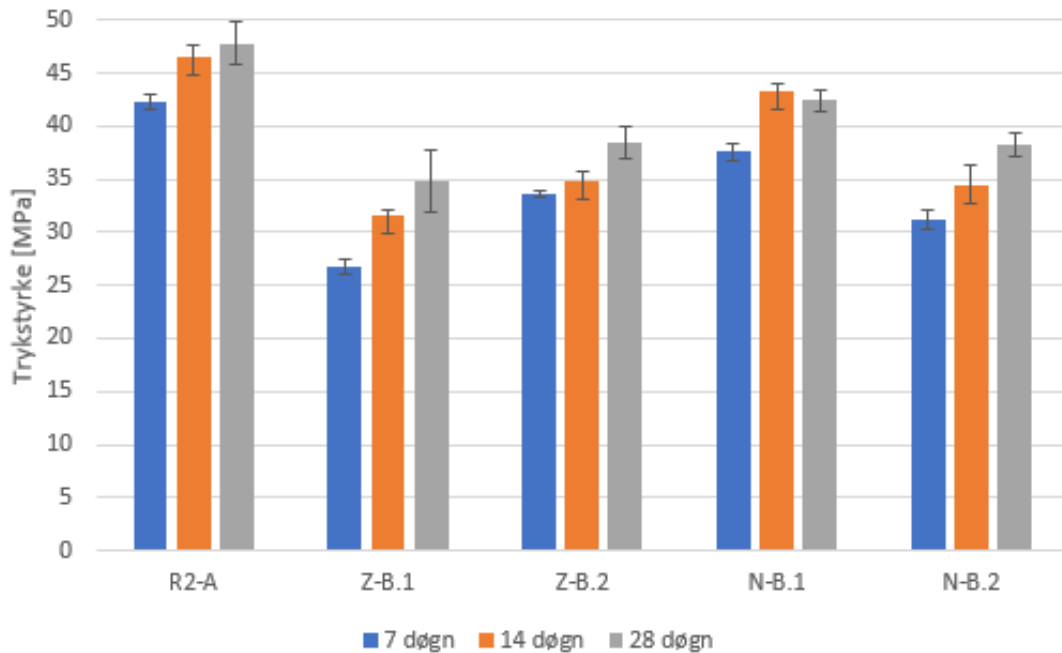
Der kan ikke entydigt konkluderes noget ud fra de målte afbindingstider. Men tendensen er, at den endelige afbindingstid bliver langsommere ved udskiftning fra 5% til 10% pga. formindskelsen af cementindhold. Derudover accelereres afbindingstiden ved tilsætning af Nussir pga. Heterogen kimdannelse. Styrkeudviklingen sker, som nævnt i afsnit 2.4, når afbindingen har fundet sted. Det forventes derfor, at styrkeudviklingen sker tidligere for mørtler indeholdende mineaffaldet fra Nussir.

#### 4.1.2.4 Trykstyrke

Trykstyrkeudviklingen for mørtelprøverne kan ses i figur 4.5, og trykstyrkerne med standardafvigelse kan ses på figur 4.6. Densiteten for de trykkede mørtelprismer kan ses i tabel 4.7. Data kan findes i bilag B.17.



Figur 4.5: Styrkeudvikling for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 sammenlignet med R2-A



Figur 4.6: Søjlediagram over trykstyrker med standardafvigelser for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 sammennlignet med R2-A.

Tabel 4.7: Densitet for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 og R2-A inden trykprøvning. Værdierne er et gennemsnit af de tre prøver, som er trykprøvet til hydratiseringstiden.

Hydratiseringstid	R2-A	Z-B.1	Z-B.2	N-B.1	N-B.2
7 døgner [ $kg/m^3$ ]	2204,5	2134,2	2188,4	2194,6	2161,0
14 døgner [ $kg/m^3$ ]	2221,9	2166,2	2190,8	2207,0	2192,5
28 døgner [ $kg/m^3$ ]	2214,4	2135,2	2149,6	2164,2	2176,0

Det bemærkes på figur 4.5, at alle mørtelprøver indeholdende mineaffald har en lavere trykstyrke end R2-A. Dette kan hænge sammen med, at densiteten i tabel 4.7 for R2-A for hver hydratiseringstid er højere end for prøverne med mineaffald. Dette kan skyldes, at korndensiteten er højere for cement end for mineaffald, eller at prøverne med mineaffald er mere porøse.

På figur 4.5 ses det, at trykstyrken generelt er høj for N-B.1, hvilket kan forklares ud fra den bedre pakning, som fillereffekten medfører. Styrkeudviklingen for N-B.1 er stejl imellem 7 og 14 døgner, mens kurven er næsten flad fra 14 til 28 døgner. Dette kan skyldes en tidlig styrkeudvikling, som hænger sammen med den hurtige afbindingstid pga. heterogen kimdannelse. Derudover er densiteten for 28 døgns prøven lav ifølge tabel 4.7, hvilket gør styrkeudviklingen fra 14 til 28 døgner en smule nedadgående. Trykstyrken for N-B.2 er lavere end for N-B.1, hvilket umiddelbart skyldes det mindre cementindhold, som resulterer i mindre hydratiseringsprodukt.

Trykstyrken for Z-B.2 er højere end for Z-B.1. Dette er ikke forventet, da cementindholdet er mindre for Z-B.2. Det reducerede cementindhold giver Z-B.2 et større  $v/c$ -forhold, hvilket vil give en højere porøsitet ved hærdning. Det kan ses på den målte densitet i tabel 4.7, hvor densiteten for Z-B.2 er højere end for Z-B.1 ved alle hydratiseringstider. Dette kan skyldes, at bearbejdigheden for Z-B.2 er bedre jf. tabel 4.5, hvorved luft nemmere kan vibreres ud ved støbning. Dette medfører altså, at Z-B.2-prøverne er mindre porøse, hvilket påvirker trykstyrken positivt.

Generelt har mørtelprøverne med Nussir en højere trykstyrke end mørtelprøver med Zinkgruvan. Zinkgruvan absorberer mere vand end Nussir under blandingen og har dermed et lavere  $v/c$ -forhold. Dette burde give prøverne med Zinkgruvan en højere trykstyrke end Nussir. Til gengæld indikerede kornstørrelsen, at Nussir har potentiale som filler, hvilket gør prøver med Nussir bedre pakket og dermed stærkere.

For begge typer mineaffald haves en mindre stejl udvikling fra 14 til 28 døgner, og der er derfor ingen

mistanke om puzzolansk effekt. Dette stemmer overens med det lave indhold af amorft materiale fundet i XRD-analysen.

De målte 7 døgns trykstyrker sammenlignes i tabel 4.8 med teoretisk beregnede trykstyrker. De teoretiske trykstyrker er beregnet vha. Bolomeys formel, som er introduceret i afsnit 2.6.1. Beregning af teoretiske trykstyrker kan findes i bilag B.21. De beregnede trykstyrker er korrigeret for vandabsorption.

Tabel 4.8: Teoretiske og målte trykstyrker for 7 døgns prøver for Z-B.1, Z-B.2, N-B.1, N-B.2 sammenlignet med en referenceprøve.

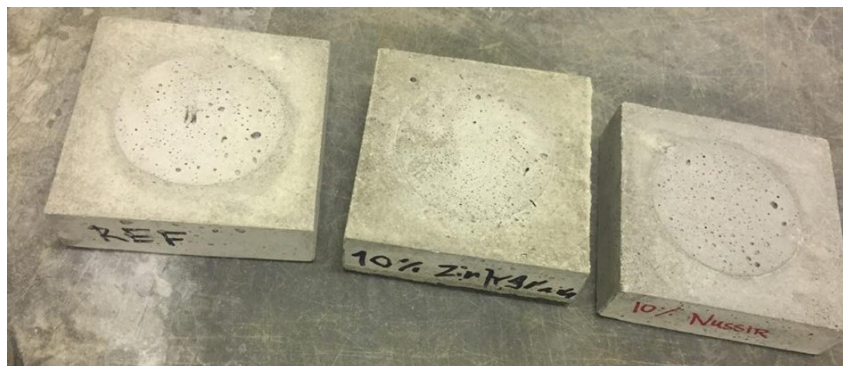
Prøve	v/c-forhold [-]	Beregnet trykstyrke [MPa]	Målt trykstyrke [MPa]	Afvigelse [%]
R2-A	0,5	36,40	42,27	+ 16,1
Z-B.1	0,53	33,83	26,75	-20,9
Z-B.2	0,56	31,26	33,64	+7,61
N-B.1	0,53	33,82	37,57	+11,06
N-B.2	0,56	31,05	31,11	+0,19

Det fremgår af tabel 4.8, at de målte trykstyrker næsten alle er højere end de teoretisk beregnede. De teoretisk beregnede trykstyrker er beregnet for beton med sand og søsten, og de målte trykstyrker er fundet for mørtler uden sten. Det er derfor forventet jf. afsnit 2.2, at de målte trykstyrker bliver højere end de teoretiske. Dette gælder ikke for Z-B.1, men som det kan ses i tabel 4.7, er densiteten for Z-B.1 en anelse lavere end for resten af 7 døgns prøverne.

Det fremgår af tabel 4.8, at v/c-forhold stiger ved tilsætning af mere mineaffald. Det ses også, at de teoretiske trykstyrke falder, når v/c-forholdet stiger. Dette bekræftes af de målte værdier, med undtagelse af Z-B.1.

#### 4.1.2.5 Farveprøve

De støbte farveprøver af R2-A, Z-B.2 og N-B.2 kan ses på figur 4.7.



Figur 4.7: Farveprøver set fra højre: R2-A, Z-B.2 og N-B.2

Der ses ingen bemærkelsesværdig farveforskel på de tre farveprøver. Det kunne umiddelbart ligne, at N-B.2 er lysere end Z-B.2. Dette ville stemme overens med mineaffaldets farve, se figur 2.1 og figur 2.2, og ville blive mere tydeligt ved substituering af en højere procentdel cement med mineaffald.

### 4.1.3 Delkonklusion for indledende undersøgelser

Kornstørrelsefordelingen viser, at Nussir overholder fillergrænsen på 250  $\mu\text{m}$ . Derimod ligner kornstørrelsefordeling for Zinkgruvan i højere grad sand.

ICP'en viser, at Nussir overholder grænseværdien for jordkvalitetskriteriet sat af miljøstyrelsen [18] for indhold af de testede tungmetaller. Zinkgruvan overholder ikke grænseværdierne for barium, cadmium, zink og bly.

XRD-analysen viser, at mængden af amorft materiale i begge slags mineaffald er lav. For Zinkgruvan blev det jf. [19] bekræftet, at mineralerne beskrevet i [11] er tilstede. I Nussir blev det understøttet, at mineraler beskrevet i [13] forefindes i materialet.

Karbonatindholdet blev fundet til 4,31% i Zinkgruvan og 0,41% i Nussir. Dette bekræfter mineralet calcits tilstedeværelse i Zinkgruvan.

pH-værdien for begge slags mineaffald er tættere på neutral end basisk, hvilket kan påvirke betons levetid. Det organiske glødetab er som forventet lavt, imens glødetabet for letfordampende mineraler er højt for Nussir.

Korndensiteten for begge slags mineaffald er næsten ens, men lav sammenlignet med cement. Vandabsorptionsevnen for Zinkgruvan er 0,78% og for Nussir 0,13%.

Vandindholdet i mineaffaldet ved støbning vurderes negligerbar.

Generelt er flydesætmålene højere for prøver med mineaffald, hvilket indikerer, at mineaffaldet suger mindre vand end cementen. Bearbejdigheden er højere for mørtelblandinger med Nussir end med Zinkgruvan, sandsynligvis pga. Nussirs lavere absorptionsevne.

Afbindingstiden for mørtelblandinger med Nussir er hurtigere end for referencen, hvilket kan skyldes heterogen kimdannelse, som accelerer hydratiseringsprocessen. For mørtelblandinger med Zinkgruvan, ses ikke en entydig sammenhæng for afbindingstiden. Den endelige afbindingstid forsinkes ved forøgelse af mængden af mineaffald fra 5% til 10% pga. formindskelsen af cementindhold til hydratiseringen.

Det kan konkluderes, at prøverne med mineaffald generelt resulterer i en lavere trykstyrke. For prøver med Nussir falder trykstyrken, når mængden af erstatning af cement med mineaffald stiger, og v/c-forholdet dermed forøges. For prøver med Zinkgruvan stiger trykstyrken ved tilsætning af mere mineaffald, hvilket hænger sammen med den forøgede bearbejdighed.

Trykstyrken for mørtelprøver med Nussir er højere end for Zinkgruvan, hvilket kan skyldes pakning af betonen pga. Nussirs potentiale som filler. Trykstyrkeudviklingen for N-B.1 er stejl mellem 7 og 14 døgn, hvorefter den stopper. Dette kan skyldes den accelererede afbindingstid pga. heterogen kimdannelse.

Hverken Zinkgruvan eller Nussir giver anledning til mistanke om en puzzolaneffekt, både pga. den lave identificerede mængde amorft materiale på XRD analysen, men også da styrkeudviklingen imellem 14 og 28 døgn prøven er forholdsvis flad.

Der ses ingen bemærkelsesværdig ændring i udseendet af den hærdede mørtel ved substituering af cement med mineaffald.

## 4.2 Forslag til videre undersøgelser

Ud fra de foreløbige undersøgelser, giver flere af resultaterne anledning til nye undersøgelser. Følgende resultater kunne være interessante at arbejde videre med.

**Kornstørrelsefordeling:** Kornstørrelsefordelingen for Zinkgruvan lignede i høj grad sands, og udskiftning af sand med Zinkgruvan kunne undersøges. En knusning af Zinkgruvan for at få den til at ligne cement mere, kunne også være en mulighed.

**Fillereffekt:** Det ses, at afbindingstiden for 5% Nussir accelereres, men forsinkes igen for 10% Nussir. Effekten af heterogen kimdannelse kunne undersøges nærmere ved at undersøge afbindingstider med forskellige mængder af cementerstatning.

**Indhold af tungmetaller:** Indholdet af tungmetaller i Zinkgruvan oversteg grænseværdierne for jordkvalitetskriteriet jf. Miljøstyrelsen [18]. Det kan derfor undersøges, hvordan tungmetallerne kan fjernes fra mineaffaldet og i så fald, hvilken effekt dette vil have på betonen.

**pH-værdi:** Både Zinkgruvan og Nussirs pH-værdi er lav, og det kunne være spændende at undersøge betonens korrosionsmiljø.

**Bearbejdighed:** Flydesætmålene var generelt højere end for referencen. Da dette ikke er nødvendigt, kunne bearbejdigheden justeres ved at ændre på vandindholdet.

**Lav trykstyrke:** Trykstyrken forbedres ikke ved tilsætning af mineaffald. Ved justering af vandindholdet kan det observeres om trykstyrken ændres tilsvarende.

Det vælges at arbejde videre med optimering af trykstyrke ved justering af vandindholdet. Dette er interessant, da det igennem de indledende undersøgelser tyder på, at vandabsorptionsevnen kan have indflydelse på trykstyrken.

Det forventes, at kunne forbedre trykstyrken ved at justere vandindholdet på to forskellige måder.

1. *Vand/cement(v/c)-forhold:* Vandindholdet i prøver med mineaffald reduceres, så v/c-forholdet i referenceprøven og prøver med mineaffald er ens.

2. *Bearbejdighed:* Vandindholdet justeres, så flydesætmålet for referenceprøven og prøver med mineaffald er ens.



### 4.3 Videre undersøgelser

I dette afsnit beskrives resultaterne for de videre undersøgelser. De videre undersøgelser omhandler optimering af trykstyrken. Det undersøges, hvorvidt justering af vandindholdet på to forskellige måder kan føre til en forbedring af trykstyrken.

#### 4.3.1 Mørtelprøver med tilsætning af mineaffald og $v/c = 0,5$

I dette afsnit justeres vandindholdet i prøverne ved at reducere  $v/c$ -forholdet til 0,5 svarende til det i referenceprøven. Mørtelprøver undersøgt i dette afsnit er blandet efter Blanderecept C.1 og C.2, se tabel 3.6.

##### 4.3.1.1 Bearbejdelighed

I tabel 4.9 ses flydesætningerne for mørtelprøver tilsat mineaffald og et  $v/c$ -forhold på 0,5. Dataen kan ses i bilag B.14.

Tabel 4.9: Flydesætning for Z-C.1, Z-C.2, N-C.1, N-C.2 og R1-A

R1-A	Z-C.1	Z-C.2	N-C.1	N-C.2
116,25 ±0,96	103 ±1,41	100,75 ±0,5	100,00 ±0,82	100,50 ±0,58

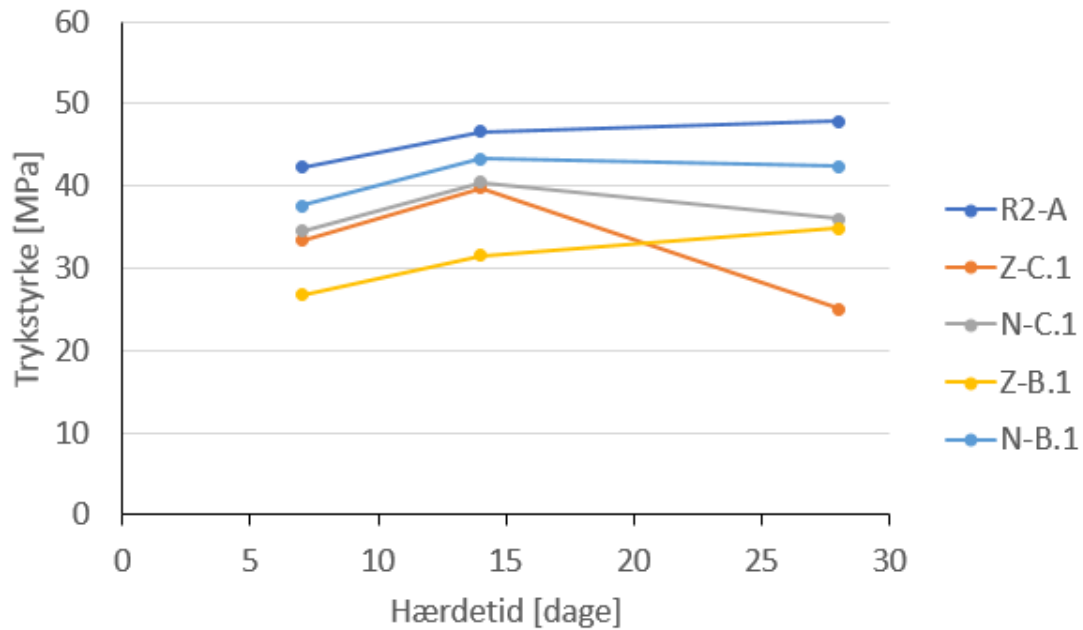
Flydesætningerne i tabel 4.9 er lavere end flydesætningerne i figur 4.5. Bearbejdeligheden er som forventet blevet dårligere for alle blandingerne, idet  $v/c$ -forholdene er reducerede. Derudover viser tabel 4.9, at det fri vandindhold i blandingerne er lavere for prøver med mineaffald end for referencen. Forskellen i det fri vand må altså skyldes mineaffaldets absorption. Det aktuelle  $v/c$ -forhold er ikke ens for blandingerne pga. mineaffaldets forskellige absorptionsevner, og derfor ses en lille variation.

Bearbejdeligheden viser sig i figur 4.9 at være lidt bedre for prøver med Zinkgruvan end for prøver med Nussir. Disse resultater modsiger flydesætningerne i tabel 4.5, hvor flydesætningerne indikerer at Zinkgruvans højere vandabsorptionsevne resulterer i et lavere flydesætning end for Nussir. Dette kan skyldes, at bearbejdeligheden er for dårlig til at vise noget. Disse resultater viser altså ikke en sammenhæng imellem mineaffaldets absorptionsevne og bearbejdelighed. Flydesætningerne i figur 4.9 kan forklares ud fra Zinkgruvans større kornstørrelse, som ifølge afsnit 4.1.1.5 resulterer i et mindre vandbehov.

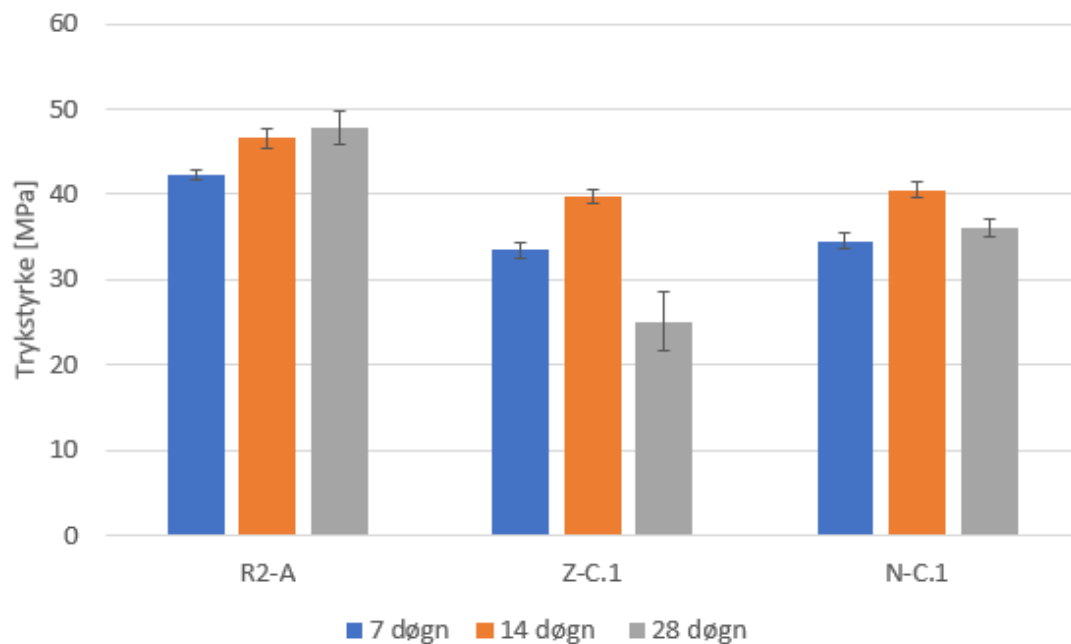
##### 4.3.1.2 Trykstyrke

Det er vurderet, at bearbejdeligheden for prøverne i tabel 4.9 er for dårlige til at få brugbare resultater ved trykprøvning af prøver med en cementerstatning på 10% med mineaffald. På baggrund af den undersøgte bearbejdelighed og nuværende erfaring med støbning er det valgt, at trykprøvning kun udføres på prøver med 5% cementerstatning.

Trykstyrkeudviklingen kan ses på figur 4.8, og trykstyrkerne med standardafvigelse kan ses på figur 4.9. Densiteten for prøverne inden trykprøvning kan ses i tabel 4.10. Dataen fra forsøgene kan findes i bilag B.18.



Figur 4.8: Trykstyrkeudvikling for for Z-C.1, N-C.1 sammenlignet med Z-B.1, N-B.1 og R2-A



Figur 4.9: Søjlediagram over trykstyrker Z-C.1, N-C.1 og R2-A med std.afv.

Tabel 4.10: Densitet for Z-C.1, N-C.1 sammenlignet med R2-A inden trykprøvning. Værdierne er et gennemsnit af de tre prøver, som er trykprøvet til hydratiseringstiden.

Hydratiseringstid	R2-A	Z-C.1	N-C.1
7 døg $[kg/m^3]$	2204,5	2162,2	2174,6
14 døg $[kg/m^3]$	2221,9	2203,5	2188,9
28 døg $[kg/m^3]$	2214,4	2064,1	2145,6

Det fremgår af figur 4.8, at trykstyrken for alle prøverne med mineaffald stadig er lavere end reference-

prøven. Styrkeudviklingen fremstår stejl for både Z-C.1 og N-C.1 fra 7 døgn til 14 døgn, men negativ fra 14 døgn til 28 døgn. Ifølge tabel 4.10 er densiteten for Z-C.1 og N-C.1 lave for 28 døgn prøven. Dette betyder, at porøsitet er høj, hvilket resulterer i nogle misvisende dårlige trykstyrker. Derudover bemærkes det også på figur 4.9, at standardafvigelsen for 28 døgn trykstyrken for Z-C.1 er høj.

Det ses på figur 4.8, at trykstyrken for N-C.1 er lavere end N-B.1, hvorimod trykstyrken generelt er højere for Z-C.1 end Z-B.1. En reduktion af  $v/c$ -forholdet har altså forringet trykstyrken for prøver med Nussir og forbedret trykstyrken for prøver med Zinkgruvan.

Den procentvise ændring af trykstyrken kan ses i tabel 4.11.

Tabel 4.11: Procentvis stigning i trykstyrke ved justeret vandindholdet ift.  $v/c$ -forhold=0.5 for 14 døgn prøver

Før optimering ± std.afv. [MPa]			Efter optimering ± std.afv. [MPa]			Ændring [%]
Z-B.1	$v/c=0.53$	$31,58 \pm 0,97$	Z-C.1	$v/c=0.50$	$39,77 \pm 1,53$	+25,9 %
N-B.1	$v/c=0.53$	$43,35 \pm 1,21$	N-C.1	$v/c=0.50$	$40,48 \pm 2,14$	-6,62 %

Det fremgår i tabel 4.11, at trykstyrken for 14 døgn prøver med 5% Zinkgruvan forbedres med +25,9% ved en reduktion af  $v/c$ -forholdet 0,53 til 0,5. Derimod forværres trykstyrken for 14 døgn prøver med 5% Nussir med -6,62% ved en reduktion af  $v/c$ -forholdet fra 0,53 til 0,5. Z-C.1 forbedres altså procentvis mere end N-C.2 forværres.

Forbedringen af trykstyrken for Z-C.1 kan forklares ved følgende forhold:

- *Porøsitet*: Et reduceret  $v/c$ -forhold vil som forklaret i afsnit 4.1.1.5, resulterer i en lavere porøsitet. Da porer ingen styrke har, vil trykstyrken forøges ved formindskelse af porøsiteten. Dette bekræftes ved at sammenligne densiteten på prøverne i figur 4.10 med densiteten af prøverne i figur 4.7.

Den reducerede trykstyrke for N-C.1 kan forklares ud fra følgende to forhold.

- *Bearbejdighed*: Et reduceret  $v/c$ -forhold vil forringe bearbejdigheden. En dårligere bearbejdighed vil gøre det sværere at blande materialerne homogent samt at vibrere luftbubler ud af mørtlen. Flydesætmålet for N-C.1 er ifølge tabel 4.9 lavere end for Z-C.1.

- *Hydratiseringsgrad*: Ved reduktion af  $v/c$ -forholdet risikeres det, at der ikke forekommer nok vand i blandingen til at gennemføre hydratiseringsprocesserne med cementen. Da mineaffaldets absorptionsevne også reducerer vandindholdet i blandingen, er det præcise  $v/c$ -forhold i blandingen ukendt. En ufuldstændig hydratisering er altså mulig. Den dårlige bearbejdighed kan også gøre, at vand og cement blandes heterogent og altså ikke har mulighed for at reagere med hinanden.

Disse resultater viser ingen sammenhængen med mineaffaldets absorptionsevne.

### 4.3.2 Mørtelprøver med tilsætning af mineaffald og optimeret flydesætmål

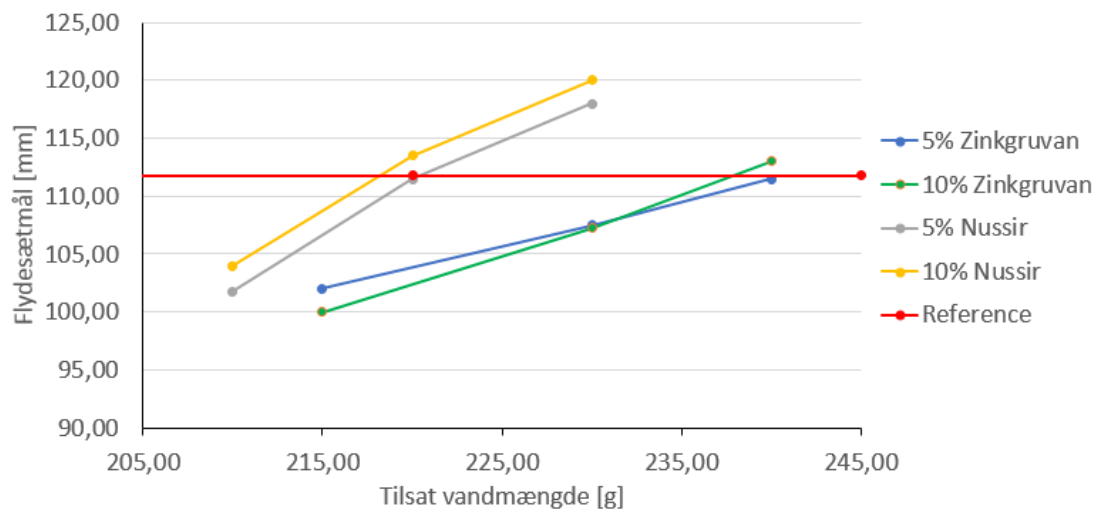
I dette afsnit justeres vandindholdet i prøverne, så flydesætmålet svarer til det i referenceprøven. Mørtelprøver undersøgt i dette afsnit er blandet efter Blandercept D.1, D.2, D.3 og D.4, se tabel 3.6. Denne metode sikre en tilstrækkelig bearbejdighed, så mørtlens vandbehov tilgodeses.

#### 4.3.2.1 Justering af vandindhold med flydesætmål

Vandindholdet i recepterne er bestemt vha. justering af flydesætmålet. Et nyt flydesætmål for referencen blev fundet inden denne undersøgelse og er nævnt i tabel 4.12.

For at finde den passende vandmængde for blandingerne er lineær regression benyttet, som beskrevet i afsnit 3.2.1. På figur ses 4.10 de lineære linjer, som beskriver de fire blandingers flydesætmål som funktion af den tilsatte vandmængde.

Linjernes ligninger og målt data kan ses i bilag B.15. Med linjernes ligninger skønnes det, hvor meget vand blandingerne med mineaffald behøver, for at opnå et flydesætmål svarende til referencens.



Figur 4.10: Lineære sammenhænge mellem tilsat vandmængde og flydesætmål for mørtelblandinger med hhv. 5% og 10% mineaffald.

Det ses på figur 4.10, at blandinger med Nussir generelt har et højere flydesætmål end blandinger med Zinkgruvan for et konstant vandindhold. Derudover er flydesætmålet højere for 10% Nussir end 5% Nussir. Disse resultater er i overensstemmelse med absorptionsevnen. For Zinkgruvan ses der ikke umiddelbart en sammenhæng imellem mængden af mineaffald og flydesætmålet.

Det ses tydeligt på figur 4.10, at flydesætmålet bliver højere ved tilsætning af vand. Ved proportioneringen blev det fundet, at prøver med Zinkgruvan skal tilsættes mere vand end referencen. Derimod skal prøver med Nussir have tilsat mindre vand end referencen.

Efterfølgende er blandingeres flydesætmål tjekket, se resultaterne i tabel 4.12.

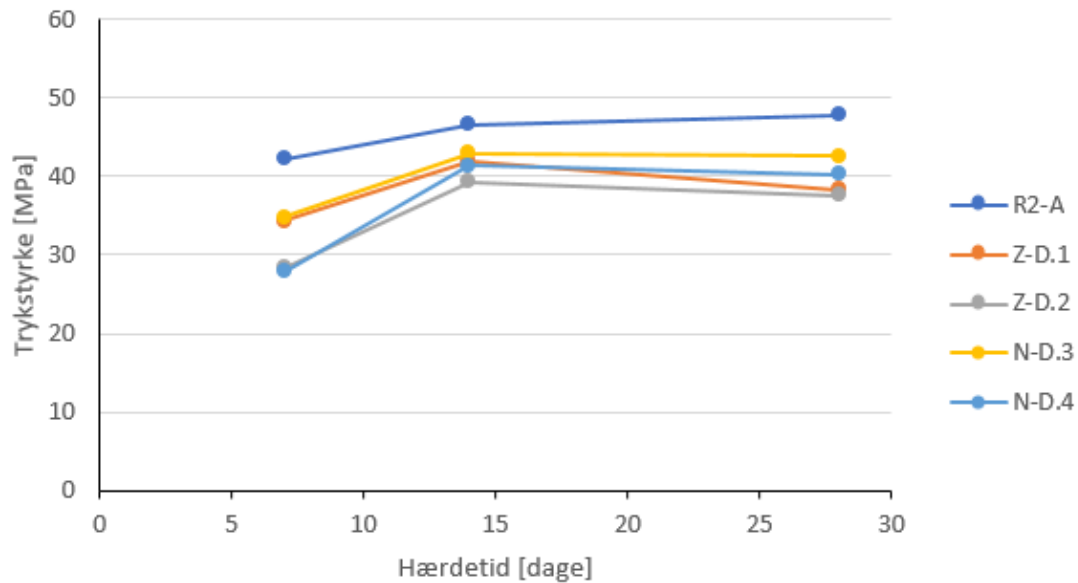
Tabel 4.12: Flydesætmål for Z-D.1, Z-D.2, N-D.3, N-D.4 sammenlignet med R2-A

R2-A	Z-D.1	Z-D.2	N-D.3	N-D.4
111,75 ±0,96	111,38±1,38	112,88 ±2,17	111,50±1,29	111,50±1,00

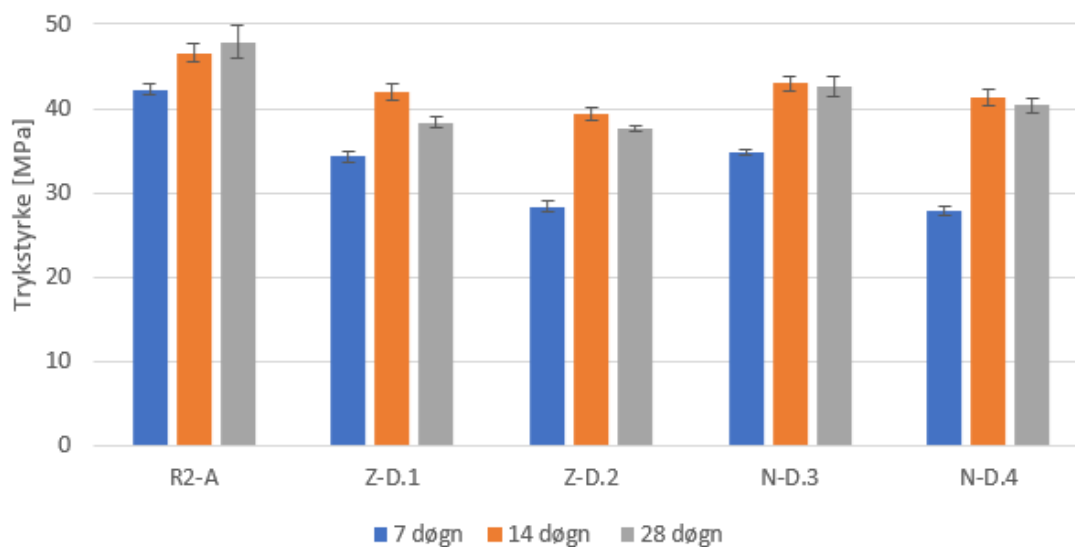
Det ses, at flydesætmålet for R2-A ikke svarer til R1-A i tabel 4.5. Dette kan skyldes, at omgivelserne, som forsøgene er udført i, er anderledes.

#### 4.3.2.2 Trykstyrke

Trykstyrkeudviklingen kan ses på figur 4.11, og trykstyrkerne med standardafvigelse kan ses på figur 4.12. Densiteten for prøverne inden trykprøvning kan ses i tabel 4.13. Dataen fra forsøgene kan findes i bilag B.19.



Figur 4.11: Styrkeudvikling for Z-D.1, Z-D.2, N-D.3, N-D.4 sammenlignet med R2-A



Figur 4.12: Søjlediagram over trykstyrker for Z-D.1, Z-D.2, N-D.3, N-D.4 og R2-A med standard afvigelser

Tabel 4.13: Densitet for Z-D.1, Z-D.2, N-D.3, N-D.4 og R2-A inden trykprøvning. Densiteten er et gennemsnit af de tre prøver som er trykprøvet til tiden.

Densitet	R2-A	Z-D.1	Z-D.2	N-D.3	N-D.4
7 døg $[kg/m^3]$	2204,5	2200,2	2158,9	2193,2	2162,0
14 døg $[kg/m^3]$	2221,9	2193,8	2194,9	2195,8	2191,6
28 døg $[kg/m^3]$	2214,4	2144,4	2150,5	2175,6	2179,6

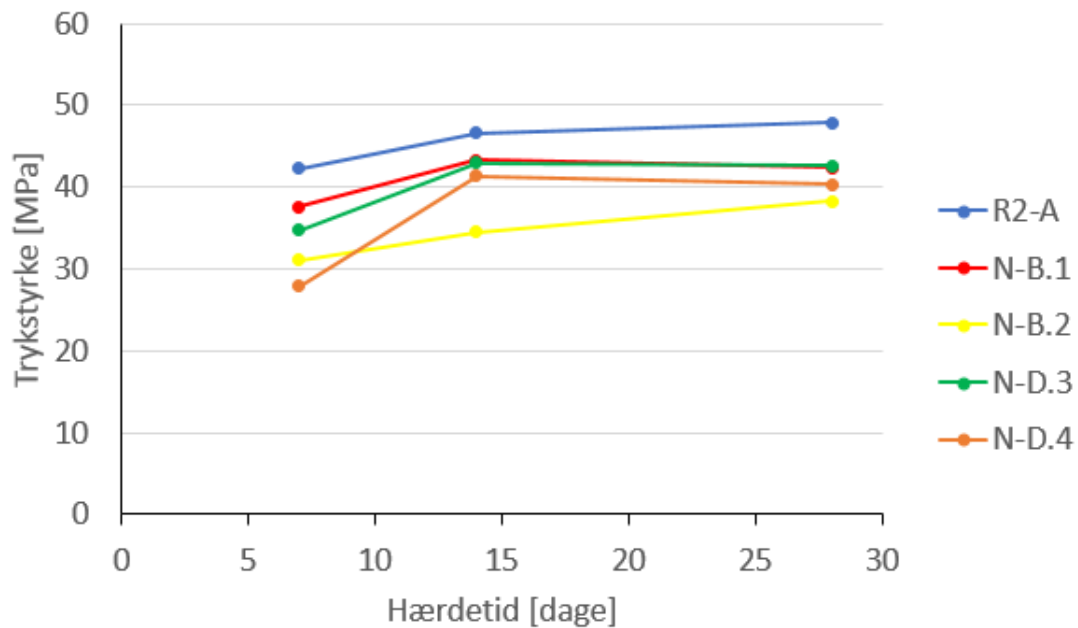
På figur 4.11 fremgår det, at ingen af prøverne indeholdende mineaffald har en højere trykstyrke end referenceprøven. Generelt haves en stejl styrkeudviklingen imellem 7. og 14. døg, imens udviklingen herefter fremstår en smule negativ for alle prøverne. I praksis vil styrkeudviklingerne ikke være negative,

så udviklingen tolkes som, at prøverne er fuldt hydratiserede efter 14 døgn. Det bekræftes, at prøverne med Nussir stadig har en højere trykstyrke end prøverne med Zinkgruvan, og at prøver med 5% mineaffald har en højere trykstyrke end prøver med 10% mineaffald.

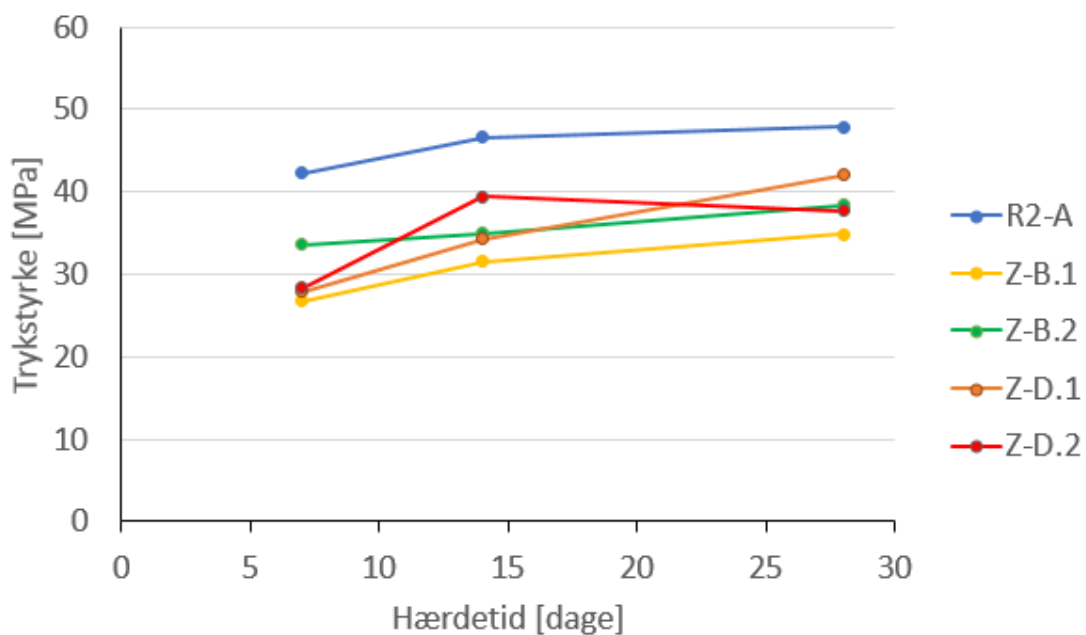
Det bemærkes i tabel 4.13, at densiteten generelt er højere end for prøverne inden optimering i tabel 4.7. Dette tyder på, at den optimerede bearbejdelighed har medført en bedre kompaktion af prøverne.

Nedenfor på figur hhv. 4.13 og 4.14 sammenlignes trykstyrkeudviklingen for prøver med hhv. Nussir og Zinkgruvan med ikke optimerede prøver samt referencen.

Den procentvise forbedring af 14 døgns prøverne kan ses i tabel 4.14.



Figur 4.13: Styrkeudvikling N-D.3 og N-D.4 sammenlignet med N-B.1 og N-B.2 samt R2-A



Figur 4.14: Styrkeudvikling Z-D.1 og Z-D.2 sammenlignet med Z-B.1 og Z-B.2 samt R2-A

Tabel 4.14: Procentvis stigning i trykstyrke ved justering af vandindholdet for optimering af bearbejdigheden 14 døgns prøver.

Før optimering ± std.afv. [MPa]			Efter optimering ± std.afv. [MPa]			Ændring [%]
Z-B.1	v/c=0,53	31,58 ± 0,49	Z-D.1	v/c=0,55	42,03 ± 1,22	+33,1 %
Z-B.2	v/c=0,56	34,92 ± 1,47	Z-D.2	v/c=0,59	39,37 ± 1,51	+12,7 %
N-B.1	v/c=0,53	43,35 ± 1,21	N-D.3	v/c=0,52	43,00 ± 1,8	-0,81 %
N-B.2	v/c=0,56	34,50 ± 3,58	N-D.4	v/c=0,54	41,36 ± 1,83	+19,0 %

På figur 4.13 ses trykstyrkeudviklingen for N-D.3 og N-D.4, samt N-B.1, N-B.2 og R2-A. Det fremgår, at N-D.3 ikke er forbedret i forhold til N-B.1. I tabel 4.14 ses det, at trykstyrken er faldet med 0,81% for 14 døgnsprøven. Forringelsen af trykstyrken er lille og kan skyldes, at ændringen i v/c-forholdet fra 0.53 til 0.52 er for lille, til at give en målbar en forskel i trykstyrken. Det ses også, at N-D.4 er forbedret i forhold til N-B.2, hvor 14 døgns prøven er forbedret med +19% i følge tabel 4.14.

På figur 4.14 ses trykstyrkeudviklingen for Z-D.1 og Z-D.2, samt Z-B.1, Z-B.2 og R2-A. Det ses, at Z-D.1 er forbedret i forhold til Z-B.1. Det ses også, at styrkeudviklingen fremgår mere stejl. Ifølge tabel 4.14 haves en forbedring på 33,1% for 14 døgns prøven. Det ses, at 7 døgns og 28 døgns prøven for Z-D.2 ikke er forbedret. Det er 14 døgns prøven derimod, med 12,7% ifølge tabel 4.14. Styrkeudviklingen for Z-D.2 forekommer meget stejl fra 7 døgns til 14 døgns og dernæst negativ fra 14 døgns til 28 døgns. Det bemærkes i tabel 4.13, at densiteten for 14 døgns prøven er højere, hvilket kan forklare dette spring i udviklingen.

Der haves ikke en klar sammenhæng, men tendensen er, at trykstyrken bliver forbedret. Dette kan skyldes den forbedrede bearbejdighed, som har gjort det nemmere at vibrere luften ud og at fordele massen homogent i formen. For Zinkgruvan gælder det også, at en tilsætning af vand er med til at undgå en ufuldstændig hydratisering. For Nussir kan det reducerede v/c-forhold være med til forbedring af trykstyrken.

Det kan konkluderes, at det ved justering af vandindholdet med henblik på optimering af flydesæt målet har været muligt at forøge trykstyrken med 12,7 - 33,1%.

#### 4.4 Delkonklusion for optimering af vandindhold

Ved justering af vandindholdet med henblik på reduktion af v/c-forholdet, blev det observeret, at bearbejdigheden for alle blandinger forværredes. Bearbejdigheden for blandinger med mineaffald blev dårligere end referencens, hvilket understreger, at mineaffaldet har en absorptionsevne. Der blev ikke bekræftet en sammenhæng imellem absorptionsevnen og størrelsen på flydesæt målet, sandsynligvis da den lave bearbejdighed giver misvisende resultater.

Trykstyrken blev kun undersøgt for prøver med 5% cementerstatning med mineaffald bl.a. pga. den lave bearbejdighed. I overensstemmelse med teorien kunne en stigning af trykstyrken på 25,9% observeres for prøver med 5% Zinkgruvan ved en reduktion af v/c-forholdet fra 0.53 til 0.5. Dette kan forklares ud fra en reduktion af porøsiteten. For prøver med 5% Nussir forværredes trykstyrken med 6,62% ved samme reduktion af v/c-forholdet. Dette kan skyldes en forværret bearbejdighed samt en nedsat hydratiseringsgrad.

Resultaterne stemmer ikke overens med mineaffaldets absorptionsevne.

Ved justering af vandindholdet med henblik på optimering af bearbejdigheden, blev en sammenhæng mellem mineaffaldets vandabsorptionsevne og flydesæt mål observeret. For at få et flydesæt mål svarende til referencens viste det sig, at v/c-forholdet skulle øges for blandinger med Zinkgruvan, hvorimod v/c-forholdet skulle reduceres for blandinger med Nussir.

Trykstyrken for blandinger med optimeret bearbejdighed viste som forventet en generel forbedring. For 14 døgns prøverne blev en maksimal forbedring for Z-B.1 på +33,1% observeret. Trykstyrken for Z-B.2 og N-B.2 viste en stigning på 12,7% og 19,0%, hvorimod trykstyrken for N-B.1 faldt med 0,81%. Forbedringen af trykstyrken kan forklares ved en generel stigning i densiteten for alle prøverne, som hænger sammen med en øget bearbejdighed for prøver med Zinkgruvan og et reduceret v/c-forhold for prøver med Nussir.

Den største forøgelse i trykstyrken observeres ved justering af vandindholdet med henblik på bearbejdigheden. Det kan altså konkluderes, at bearbejdigheden i denne opgave har vist sig som en væsentlig faktor, hvis en højere trykstyrke skal opnås.

*[Blank side]*



## 5 Konklusion

Formålet med dette projekt er at sammenligne to forskellige slags mineaffald og undersøge muligheden for at anvende disse som delvis cementerstatning i beton. Der er fokuseret på mineaffaldets indflydelse på betons trykstyrke og optimering af denne ved justering af vandindholdet. Den ene slags mineaffald kommer fra kobber-, guld-, platinum-, og palladiumminen Nussir i Nord Norge, og den anden slags mineaffald kommer fra zink-, bly-, kobber- og sølvminen Zinkgruvan i Syd Sverige.

Karakteristikken af de to slags mineaffald samt egenskaber for mørtelblandinger og -prøver med hhv. 5% og 10% cementerstatning med mineaffald fra hhv. Zinkgruvan og Nussir er blevet undersøgt.

Kornstørrelsefordelingen viser, at Nussir overholder fillergrænsen på 250  $\mu\text{m}$ . Derimod ligner kornstørrelsefordeling for Zinkgruvan i højere grad kornkurven for søsand end cement.

Indholdet af tungmetaller i mineaffaldet fra Nussir overholder grænseværdien for jordkvalitetskriteriet sat af miljøstyrelsen [18], hvorimod mineaffaldet fra Zinkgruvan ikke overholder grænseværdierne for barium, cadmium, zink og bly.

XRD-analysen viser at mængden af amorft materiale i begge slags mineaffald er lav. For Zinkgruvan blev det jf. [19] bekræftet, at mineralerne beskrevet i [11] er tilstede. I Nussir blev det understøttet, at mineraler beskrevet i [13] forefindes i materialet. Karbonatindholdet blev fundet til 4,31% i Zinkgruvan og 0,41% i Nussir. Dette bekræfter mineralet calcits tilstedeværelse i Zinkgruvan.

pH-værdien for begge slags mineaffald er tættere på neutral end basisk, og det organiske glødetab er som forventet lavt, imens glødetabet for letfordampende mineraler er højt for mineaffald fra Nussir. Korndensiteten for begge slags mineaffald er lav sammenlignet med cement og indikerer at mineaffald fra Zinkgruvan har en større porøsitet end mineaffaldet fra Nussir.

Vandabsorptionsevnen for mineaffald fra Zinkgruvan er 0,78% og er for mineaffald fra Nussir 0,13%, hvilket kan skyldes Zinkgruvans højere porøsitet.

Vandindholdet i mineaffaldet ved støbning vurderes negligerbar.

Generelt er flydesætmålene højere for prøver med mineaffald, hvilket indikerer at mineaffaldet suger mindre vand end cementen. Bearbejdigheden er højere for mørtelblandinger med Nussir end med Zinkgruvan, sandsynligvis pga. Nussirs lavere absorptionsevne.

Afbindingstiden for mørtelblandinger med Nussir er hurtigere end for referencen, hvilket kan skyldes heterogen kimdannelse, som accelerer hydratiseringsprocessen. For mørtelblandinger med Zinkgruvan blev der ikke fundet en sammenhæng for afbindingstiden. Den endelige afbindingstid forsinkes ved forøgelse af mængden af mineaffald fra 5% til 10% pga. reduktionen af cementindhold til hydratiseringen.

Det kan konkluderes, at prøverne med mineaffald generelt resulterer i en lavere trykstyrke. Teoretisk vil en øget procentvis cementerstatning med mineaffald forøge v/c-forholdet og dermed forringe trykstyrken. Dette bekræftes i forsøgene for prøver med Nussir. For prøver med Zinkgruvan stiger trykstyrken ved tilsætning af mere mineaffald, hvilket hænger sammen med den forøgede bearbejdighed.

Trykstyrken for mørtelprøver med Nussir er højere end for Zinkgruvan, hvilket kan skyldes pakning af betonen pga. Nussirs potentiale som filler. Trykstyrkeudviklingen for N-B.1 er stejl mellem 7 og 14 døgn, hvorefter den stopper. Dette kan skyldes den accelererede afbindingstid pga. heterogen kimdannelse.

Ved justering af vandindholdet med henblik på reduktion af v/c-forholdet, blev det observeret, at bearbejdigheden for alle blandinger forværres. Bearbejdigheden for blandinger med mineaffald blev dårligere end referencens, hvilket understreger, at mineaffaldet har en absorptionsevne. Der blev ikke bekræftet en sammenhæng imellem absorptionsevnen og størrelsen på flydesætmålet.

Trykstyrken stiger med 25,9% for prøver med 5% Zinkgruvan ved en reduktion af v/c-forholdet fra 0.53 til 0.5. Dette kan forklares ud fra en reduktion af porøsiteten. For prøver med 5% Nussir forværres trykstyrken med 6,62% ved samme reduktion af v/c-forholdet. Dette kan skyldes en forværret bearbejdighed samt en nedsat hydratiseringsgrad.

Ved justering af vandindholdet med henblik på optimering af bearbejdigheden, blev en sammenhæng imellem vandabsorptionsevne og flydesætmål observeret. For at få et flydesætmål svarende til referencens viste det sig, at v/c-forholdet skulles øges for blandinger med Zinkgruvan, hvorimod v/c-forholdet skulle

reduceres for blandinger med Nussir.

Trykstyrken for blandinger med optimeret bearbejdelighed viser som forventet en generel forbedring. For 14 døgnprøverne observeres en maksimal forbedring for Z-B.1 på +33,1%. Trykstyrken for Z-B.2 og N-B.2 viser en stigning på 12,7% og 19,0%, hvorimod trykstyrken for N-B.1 falder med 0,81%. Forbedringen kan forklares ved en generel stigning i densiteten for alle prøverne, som hænger sammen med en øget bearbejdelighed for prøver med Zinkgruvan og et reduceret  $v/c$ -forhold for prøver med Nussir.

På baggrund af undersøgelserne kan det konkluderes, at mineaffaldet kan benyttes som delvis cementstatning i beton. Det erkendes dog, at trykstyrken generelt bliver dårligere ved udskiftning af cement med mineaffaldet, og at beton med mineaffald ikke kan benyttes i større konstruktioner. Det kan derudover også slutes, at mineaffaldet fra Nussir er mere egnet som tilsætning i beton end mineaffaldet fra Zinkgruvan, da det har potentiale som filler og giver en højere trykstyrke. Mængden af tungmetaller skal reduceres i Mineaffaldet fra Zinkgruvan, for at det kan bruges.

Trykstyrken kan forbedres mest ved at optimere bearbejdeligheden og dermed tage hensyn til mineaffaldets absorptionsevne.

## 6 Videre undersøgelse

Benyttelse af mineaffald i byggematerialer er et område med minimal erfaring og med få foretagne undersøgelser. Der kan derfor foretages mange forskellige relevante undersøgelser i forbindelse med emnet. I afsnit 4.2 blev der på baggrund af de indledende undersøgelser opstillet forskellige forslag til videre undersøgelse. På grund af projekts begrænsede omfang blev kun to af disse undersøgt nærmere. Derfor er resten af de nævnte undersøgelser stadig relevante.

Eftersom både Zinkgruvan og Nussir har en forholdsvis neutral pH-værdi, er det relevant at undersøge korrosionsmiljøet af beton indeholdende mineaffaldet. pH-værdien for hærdet beton kunne bl.a. undersøges, for at observere effekten af mineaffaldets pH-værdi.

Det kunne undersøges om Zinkgruvan er bedre som substitut for sand end cement, da kornstørrelsefordelingen i højere grad lignede sands kornkurve. Dette vil naturligvis ikke opfylde hele motivationen for dette projekt, men vil stadig være økonomisk og miljøskånende i forhold til deponi af mineaffaldet.

Det kunne være interessant at undersøge, om Nussirs fillereffekt kan udnyttes i højere grad. Bl.a. kan afbindingstiden i forbindelse med heterogen kimdannelse undersøges.

Det viste sig, at Zinkgruvan ikke overholdte grænseværdierne for indhold af tungmetaller jf. [18]. Det kan derfor undersøges, hvordan tungmetallerne kan fjernes fra mineaffaldet og i så fald, hvilken effekt dette vil have på betonen.

Det blev efter de videregående undersøgelser konkluderet, at bearbejdigheden er en vigtig faktor, når trykstyrken skal forbedres. Det kunne undersøges, om en højere trykstyrke kan opnås ved reduktion af v/c-forholdet, når der tilsættes plastificerende midler.

Generelt er det relevant at undersøge en større erstatningsprocent af cement med mineaffald, da dette vil forstørre de økonomiske og miljømæssige aspekter for projektet. Dette vil i højere grad skildre mineaffaldets effekt i beton.

*[Blank side]*

# Litteratur

- [1] Aalborg Portland. (2015). <http://www.aalborgportland.dk>. Hentet: 2017-06-03.
- [2] Aalborg Portland. (2012). Cement og beton. Aalborg Portland.
- [3] Christensen, G.N., Dahl-Andersen, G.A.P., Gaardsted, F., Leikvin, Ø., Palerud, R., Velvin, R., Vögele, B. (2011). Marin grundlagsundersøgelse i Repparfjorden, Finnmark 2010-2011. Akvaplan-niva AS. Tromsø, Norge.
- [4] Cullity, B.D., Stock, S.R. (1956). Elements of X Ray Diffractions. (3. udg.). Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [5] DS/EN 1015-3 (1999). Prøvningsmetoder til undersøgelse af mørtel til murværk - del 3: Bestemmelse af frisk mørtels konsistens. (1. udg.). *Dansk Standard*.
- [6] DS/EN 1097-5 (2008). Metoder til prøvning af tilslags egenskaber - Del 5: Bestemmelse af vandindholdet ved tørring i ventileret ovn. (3. udg.). *Dansk Standard*.
- [7] DS/EN 1097-6 (2013). Metoder til prøvning af tilslags egenskaber - Del 6: Bestemmelse af korndensitet og vandabsorption. (2. udg.). *Dansk Standard*.
- [8] DS/EN 196-1 (2005). Metoder til prøvning af cement - Del 1: Styrkebestemmelse. (2. udg.). *Dansk Standard*.
- [9] DS/EN 196-3 (2009). Metoder til prøvning af cement - Del 3: Bestemmelse af afbindingstid og volumenbestandighed. (3. udg.). *Dansk Standard*.
- [10] Flannery, Tim. (2006). Vejrsmagerne: Det menneskeskabte klima. Ries Forlag.
- [11] Hansen, K.K., Geiker, M. Nielsen, A. (2008). Bygningsingeniørernes Materialer - Uddrag af Materialebogen. (1. udg.) Nyt Teknisk Forlag.
- [12] Jensen, P.E., Ottosen, L.M., Hansen, H.K., Bollwerk, S., Belmonte, L. J., Kirkelund, G.M. (2016). Suspended eletrodialytical extraction of toxic elements for detoxification of three different mine tailings. International Journal of Sustainable Development and Planning.
- [13] Kudahl, M.M. Henning, M.V. (2016). Miljøundersøgelse af Cu minetailings fra Repparfjorden. Bachelorprojekt, Danmarks Tekniske Universitet.
- [14] Lawrence, P., Cyr, M., Ringot. E. (2005). Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. Cement and Concrete Research 35.
- [15] Lottermoser, B. (2007). Mine wastes - Characterization, Treatment, Environmental Impacts. (2. edition). Springer.
- [16] Lunding Mining Corporation. (2017). <http://www.lundinmining.com>. Hentet: 2017-06-04.
- [17] Mehta, P.K. Monteiro, P.J.M. (2014). Concrete - Microstructure, properties, and materiales. (4. udg). Mc Graw Hill education.
- [18] Miljøstyrelsen (2014). Liste over kvalitetskriterier i relation til forurennet jord og kvalitetskriterier for drikkevand. *Miljøministeriet*.
- [19] Nielsen, M.R. (2017). Anvendelse af mineaffald som delvis cementerstatning i beton. Afgangsprojekt, Danmarks Tekniske Universitet.
- [20] Nussir ASA. (2012). <http://www.nussir.no/>. Hentet: 2017-06-03.
- [21] Zinkgruvan Mining AB. (2012). <http://www.nussir.no/>. Hentet: 2017-06-03.

DTU Civil Engineering  
Department of Civil Engineering  
Technical University of Denmark

Brovej, Building 118  
2800 Kgs. Lyngby  
Telephone 45 25 17 00

[www.byg.dtu.dk](http://www.byg.dtu.dk)

# Bilag

## A Forsøgsvejledninger

### A.1 Vandindhold

#### Vandindhold

##### A Princip

I forbindelse med den elektrodialytiske jordrensning har jordens vandindhold stor betydning, da den elektriske strøm ledes gennem jorden via jordvæsken. Er vandindholdet i jorden mindre end ca. 15 %, er det nødvendigt for forsøgets gennemførelse at tilføre jorden ekstra væske.

##### B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et varmeskab.

##### C Analysens udførelse

###### ***Ved meget præcis måling:***

3 bægerglas stilles i varmeskab ved 105°C natten over. Bægerglassene stilles til afkøling i eksikator og vejes på analysevægt.

###### **Dette gøres vha. en tang, fingrene afsætter fugt.**

Der afvejes 5 g jord i hvert bægerglas og prøverne tørres ved 105°C i varmeskab. Bægerglassene med den tørrede jord vejes på analyse vægt efter afkøling i eksikator.

###### ***Ved mindre præcis måling (mest anvendt):***

3 bægerglas afvejes på teknisk vægt. Der overføres en vis mængde til hvert bægerglas som igen vejes på teknisk vægt. Bægerglassene stilles i varmeskab natten over ved 105°C. Bægerglassene med den tørrede jord vejes efter afkøling på teknisk vægt.

**D Beregning af resultat**

Vandindholdet angives i procent af vægten af den fugtige jord.

$$\% \text{ vandindhold} = \frac{m(\text{våd prøve}) - m(\text{tør prøve})}{m(\text{våd prøve})} \cdot 100$$

**E Affaldshåndtering**

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald og bægerglassene rengøres.



## A.2 Vandabsorptionsevne

### 4.3 Fastlæggelse af vandmættet, overfladetør (s.s.d.) tilstand

#### 4.3.1 Apparat og materialer

- Kogeplade
- Stegepande
- Tragt
- Metalbakke
- Ske til omrøring
- Kegleform med stamper
- Vandlagret sand, ca. 1 kg
- Keramikskål

#### 4.3.2 Fremgangsmåde

Der udtages en prøve på ca. 1 kg sand fra spanen med vandlagret sand ved at fylde målebægeret op til randen. Sandprøven hældes derefter over i gruppens keramikskål. Sandet spredes ud på stegepanden og udtørres forsigtigt ved svag varme under omrøring for at sikre en jævn udtørring. Tørringen afbrydes for det tidspunkt hvor sandkornene tilsyneladende ikke længere klæber til hinanden. Sandet skal afkøles i metalbakken under omrøring før det ifyldes den kegleform, der er vist i fig. 6. Efter at sandet er løst ifyldt formen stryges langs overkanten og der stemples let 25 gange med stamperen. Der efterfyldes ikke. Formen løftes af, og såfremt sandkeglen ikke falder sammen, er der stadig overfladevand tilstede hvorfor udtørringen skal fortsættes som ovenfor beskrevet indtil sandkeglen netop falder sammen når formen fjernes, jf. fig. 7. Sandet siges nu at være i vandmættet, overfladetør (s.s.d.) tilstand. Metalbakken med sand i s.s.d.-tilstand dækkes med bakkens låg eller plastfolie for at undgå yderligere udtørring indtil de øvrige forsøg er udført.

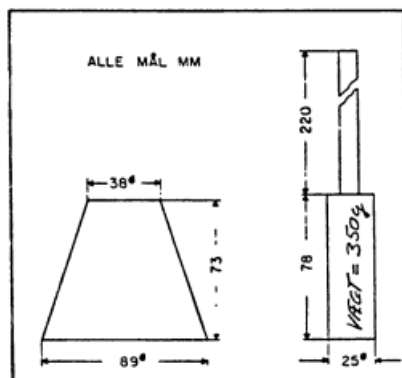


Fig. 6. Kegleform og stamper.

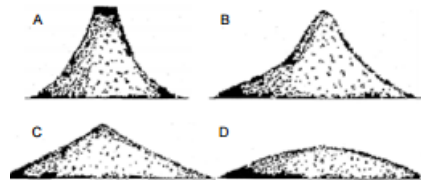


Fig. 7. Sandkegle i fire forskellige tilstande: (A) meget fugtig tilstand hvor sandkeglen næsten har bevaret metalkeglens form, (B) fugtig tilstand hvor et markant sammenfald ses, (C) vandmættet, overfladetør tilstand hvor der er et næsten komplet sammenfald men hvor en spids top er synlig, (D) næsten ovntør tilstand med komplet sammenfald og uden spids top.

### 4.4 Bestemmelse af vandabsorptionsevne

#### 4.4.1 Apparat og materialer

- Keramikskål
- Ske til omrøring
- Stegepande
- Kogeplade
- Vægt
- Sand i s.s.d.-tilstand

#### 4.4.2 Fremgangsmåde

Til dette forsøg benyttes ca. 250 g sand i vandmættet, overfladetør tilstand fra forrige forsøg. Mængden afvejes og prøven udtørres til konstant masse i et varmeskab ved  $105 \pm 5$  °C. Prøvens tørmasse noteres. Af tidsmæssige grunde fremskyndes udtørringen af sandet ved brug af stegepanden. Denne metode er mindre nøjagtig end udtørring i varmeskab og bør ikke bruges i praksis. I skema G2 i bilag 2 anføres forsøgsresultater.

## A.3 pH-værdi

### pH i 1 M KCl opslemning. L/S: 2,5

#### A Princip

Jordens pH måles potentiometrisk i en opslemning af jord og kaliumchlorid i forholdet 1:2,5

#### B Specielt apparatur

Til målingen benyttes pH-meter

#### C Kemikalie sikkerhed

**Kaliumchlorid** - Der foreligger ikke information, der gør det muligt at klassificere stoffet. Bruges med omtanke.

**Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.**

#### D Reagenser

- 1) **Kaliumchlorid 1 M KCl:**  
74,56 g KCl afvejes på teknisk vægt og opløses i destilleret vand i en 1000,00 mL målekolbe.
- 2) **Bufferopløsning, pH 4,00:**  
Radiometer pH 4.
- 3) **Bufferopløsning, pH 7,00:**  
Radiometer pH 7

#### E Analysens udførelse

5,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i en 20 mL plast-vials.

Der tilsættes 12,5 mL 1 M KCl med finpipette. Prøverne stilles på rystebord i 1 time.

Prøverne tages af og sedimenteres i 10 min. Der måles pH på prøverne.

**F**    **Beregning af resultat**

Resultatet aflæses direkte på apparatet og angives som pH (KCl) med en decimal. Aflæsningen anses for stabil når der står "STAB" på displayet.

**G**    **Affaldshåndtering**

Kaliumchlorid og Metrohm pH 4 og pH 7 hældes i vasken.

Plast-vials med jordopslemningen skal opsamles i beholder til jordaffald.

## A.4 Glødetab i jord

### Glødetab i jord

#### A **Princip**

Jordens indhold af organisk materiale svarer stort set til det opnåede glødetab ved 550°C. I en tungmetalforurenede jord vil tungmetallerne i høj grad reagere med det organiske materiale i jorden og sidder bundet i denne fraktion.

#### B **Specielt apparatur**

Til analysen benyttes et muffelovn.

#### C **Analysens udførelse**

3 digler sættes i muffelovn, som er opvarmet til 550°C, hvor de står i 30 minutter (1 time hvis ovnen er kold). Diglerne afkøles i eksikator og vejes på analyse vægt.

**NB: Diglerne transporteres med tang, da fingrene afsætter fugt og derved ændrer vægten.**

Derefter afvejes 2,5 g tør, knust jord på analysevægt til hver digel. Diglerne med den tørre jord stilles i en opvarmet muffelovn og glødes ved 550°C i 1 time.

Diglerne med den glødede jord afkøles i eksikator og vejes på analyse vægt.

#### D **Beregning af resultat**

Glødetabet, som nogenlunde svarer til prøvens indhold af organisk stof, angives i procent af tørstofindholdet.

$$\% \text{ glødetab} = \frac{m(\text{muffelovn}) - m(\text{efter muffelovn})}{m(\text{før muffelovn})} \cdot 100$$

**E Affaldshåndtering**

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

## A.5 Carbonatindhold

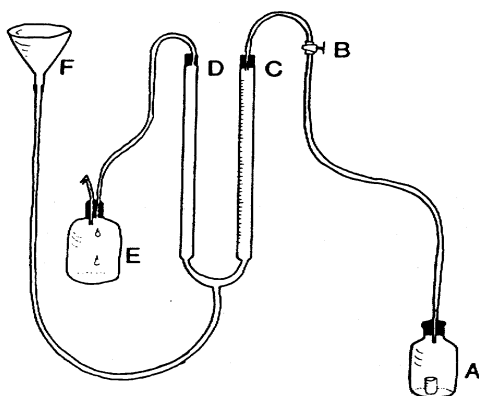
### Carbonat, volumetrisk

#### A Princip

Jordens indhold af carbonat bestemmes volumetrisk efter reaktion med saltsyre.

#### B Specielt apparatur

Til målingen benyttes et Scheibler apparat. Opbygning og virkemåde fremgår af figur 1, samt punkt F (analysens udførelse).



Figur 1: Principskitse af Scheibler apparat.

- A - reaktionsflaske
- B - hane
- C - glasrør med inddelinger
- D - glasrør med inddelinger
- E - overløbskolbe
- F - glastragt

**C Kemikalie sikkerhed**

**Calciumcarbonat** - Der foreligger ikke information, der gør det muligt at klassificere stoffet. Bruges med omtanke, overvej brug af engangs-handsker og vejekabinet ved afvejning.

**Saltsyre** - Ætsende; Ætsningsfare. Irriterer åndedrætsorganerne. Brug syrehandsker og stinkskaab ved afmåling.

**Saltsyre 10 %** - Lokalirriterende; Irritere øjnene, åndedrætsorganerne og huden. Brug engangshandsker.

**Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.**

**D Reagenser**

1) **Calciumcarbonat, CaCO<sub>3</sub>**

2) **Saltsyre, 10 % HCl :**

Et rumfang koncentreret 37 % HCl overføres forsigtigt til måleglas indeholdende 2 rumfang destilleret vand. Efter blandingen overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

**E Standardkurve**

Der fremstilles en standardkurve, ved at afveje henholdsvis 0,05 - 0,10 - 0,15 - 0,20 - 0,25 og 0,30 g CaCO<sub>3</sub> på analysevægt i små præparatglas. Målingerne af de afvejede CaCO<sub>3</sub> mængder foretages på samme måde som ved målingerne af jordprøven - se 'analysens udførelse' nedenfor.

**F Analysens udførelse**

2,5000 g tør, knust jord afvejes på analysevægt i et lille 5mL bægerglas.

Hanen (B) skal være åben og vandet i glaserørene (C og D) bringes i niveau ved 0 (nulstilles).

Med måleglas overføres 20 mL saltsyre til bunden af reaktionsflaske (A). Bægerglasset sættes forsigtigt ned i reaktionsflasken, således at glassets indhold ikke kommer i kontakt med syren.

Glasset lukkes godt og der aftappes ca. 50 mL vand fra glasrøret (D) til glastragten (F), ved at flytte tragten nedad.

Ved rystning af reaktionsflasken, væltes bægerglasset og bringer indholdet af calciumcarbonat i kontakt med syren, hvorved der udvikles CO<sub>2</sub>. Rystningen af reaktionsflasken fortsættes indtil CO<sub>2</sub>-udviklingen er ophørt (ca. 1 minutter).

Ved hjælp af vandet i glastragten (F) stilles vandsøjlerne i glasrørene i niveau, og glasrøret (C) aflæses.

### **G Beregning af resultat**

På baggrund af standardkurven beregnes jordens indhold af calciumcarbonat og angives i % med 1 decimal.

$$CaCO_3 \% = \frac{A \cdot 100}{B}$$

hvor

A = g CaCO<sub>3</sub> i jorden ifølge standardkurven

B = g jord afvejet

Resultatet angives med 1 decimal.

### **H Affaldshåndtering**

Reagenser og jord opsamles i affaldsdunk tungmetal mærket X 4.41



## A.6 Oplukning af jord

### Oplukning af jord- og askeprøve efter DS 259

#### A Princip

Denne oplukningsmetode er en Dansk Standard (DS 259) til bestemmelse af syreopløselige metaller i jorden. Metalkoncentrationen fundet ved denne metode svarer til en "total-koncentration" af det pågældende metal i jorden. Ved en fuldstændig destruktion af jorden, vil man dog have mulighed for at finde en højere værdi af de forskellige metaller, så DS 259 giver derfor snarere et fastlagt niveau for en metalkoncentration, end en fuldstændig bestemmelse af metalkoncentrationen i jorden.

#### B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ICP  
Autoklave

#### C Kemikalie sikkerhed

**Salpetersyre** - Brandnærende; Ætsende; Brandfarlig ved kontakt med brandbare stoffer. Alvorlig ætsningfare. Undgå indånding af dampe. Brug syrehandsker, plastikforklæder, sikkerhedsbriller og stinkskab ved afmåling.

**Salpetersyre halv konc. (1:1)** - Lokalirriterende; Irriterer øjnene og huden. Brug engangshandsker, sikkerhedsbriller og stinkskab ved afmåling.

**Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.**

#### D Reagenser

##### 1) **Salpetersyre halvkonc, (1:1) HNO<sub>3</sub>:**

500 mL koncentreret HNO<sub>3</sub> overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er ½ fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

**E Analysens udførelse**

1,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i et pyrex-glas med skruelåg (autoklaveglas) og der tilsættes 20,00 mL halvkoncentreret HNO<sub>3</sub> med fuld pipette (skal foregå i stinkskab).

Autoklavflaskerne lukkes helt, da HNO<sub>3</sub> ellers ville fordampe. Flaskerne stilles i autoklaven.

Der hældes 1,5L destilleret vand i autoklaven og låget lukket helt og den orange låseknop lukkes. Den sorte ventil midt på låget åbnes helt og drejes derefter en ½ omgang tilbage. Autoklaven tændes og der går ca. 10-15 min indtil den er varmet op. Efter 3 min med damp ud at ventilen lukkes denne og trykket begynder at sige. Når trykket er kommet op i det blå felt på manometeret tages der tid på autoklaveringen (30min). Derefter slukkes autoklaven.

Flaskerne afkøles derefter til stuetemperatur.

Prøverne filtreres med sug gennem et 0,45 µm filter i stinkskab. **Brug engangshandsker.** Autoklaveflasken skylles med 3 gange destilleret vand. Filtreret skal suges tør mellem hvert skyl.

Filtratet hældes i en 100,00 mL målekolbe og der tilsættes destilleret vand til mærket og blandes. Væsken hældes på en 20 mL plast-vials og gemmes til ICP.

**F Bestemmelse af metaller**

Ekstraktens indhold af metaller måles på ICP under benyttelse af de standarder som hører til de enkelte metaller.

**G Beregning af resultat**

På baggrund af standardkurverne beregnes jordens indhold af metaller angivet i mg/kg.

$$mg / kg = \frac{A \cdot 0,100L \cdot C}{B \cdot 10^{-3} kg / g \text{ jord}}$$

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm

B = g jord afvejet

C = fortyndingsfaktor

## H **Affaldshåndtering**

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskalet.

Jorden og asken skal opsamles i beholder til jordaffald.

## A.7 Pyknometer-partiklernes densitet

### Pyknometer-partiklernes densitet

#### A **Princip**

Denne metode bruges til at bestemme Partiklernes densitet.  
DS/EN ISO 17892-3:2015

#### B **Specielt apparatur**

Pyknometer glas  
Termometer  
Luftfrit vand

#### C **Analysens udførelse**

Afvej tom tør pyknometer på analysevægt og noter vægten.  
Afvej 4,000 g tør prøve på analyse vægt i vejebåde.  
Tilsæt prøven i pyknometer og luk den med prop og vej og noter vægten.  
Tilsæt destilleret vand og fyld op til den halvfylt. Sæt pyknometer og den mængde destilleret vand i vakuum sug og lad den stå natten over.

Tjek på vandets temperatur og noter  
Fyld pyknometeret næsten helt op med luftfrit vand og luk med prop.  
Fjern de overskyende vand udvendigt og fjern den dråbe vand der er oven på proppen.  
Afvej pyknometer og noter

#### E **Beregning af resultat**

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_3 - W_0}{\frac{W_2 - W_0}{\rho_{w;k}} - \frac{W_1 - W_3}{\rho_{w;t}}} \quad \rho_s = \frac{m_4}{\frac{m_1 - m_0}{\rho_{w;1}} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{w;3}}}$$

Se excel arket for mere information.

#### F **Affaldshåndtering**

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

## A.8 Laserdiffraktion



### Laserdiffraktion, våde prøver

#### Prøve forberelse:

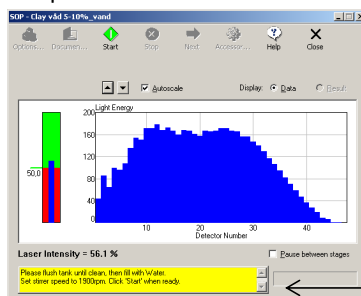
- Halv teske skal hældes på 20 ml vials og tilføje 0.005M Natriumpyrofosfat.
- Tilføj destilleret vand til den prøve kammeret.

#### Software:

- Klik på Mastersizer på skrivebordet og Klik ok når den spørger om username.
- Klik på: *file* i hovedmenu → *new*: enter; fil navngivning skal være: YYDDMM
- Klik på *configure* → existing SOP: Der burde allerede være en SOP med det materiale du skal bruge.
- Klik på det materiale du arbejder med. (Hvis det materiale du skal bruge ikke er der skal der laves en ny SOP, se nederst eller kald på en laborant).

#### Måling:

- Klik på *measure* → start SOP → Klik på den SOP du skal bruge, og du vil få dette billede:



Det er vigtigt at læse hvad der står på den gule fane; der står nemlig hvad man skal gøre.



**New SOP:** tryk *next*

Sampler handling units: Hydro 2000SM(A)

Materiale: Find det materiale du har. Dispensant er altid vand

Labels: Generel prøvenavn

Report savings: ✓ ved always print results

✓Export template

Target file: 080310

Measurement: Measurement time: 12 sec. Measurement snaps: 12000

Background time: 12 sec. Background snaps: 12000

Sampler settings: 1600 rpm

Measurement cycles: 3 + ✓ ved create average results

Quantities: ingen ændringer her

finish

**Edit results:**

-Højre klik på de resultater du vil rette; *toppe du vil fjerne eller ændre navnet.*

-Edit results

-Pick up settings-OK

-Specify new results-calculation

-advanced

-New ranged og vælg så hvilket størrelse det skal starte fra eller slutte.

## A.9 XRD-analyse

### Quick guide – XRD data treatment

#### Data treatment in X'Pert HighScore Plus

A Basic phase identification procedure will involve at least a background determination, a peak search and matching the peaks with the ICDD database. This is the simple guide for data treatment. For more in-depth, use the manual or play around with the HighScore Plus programme. It is time consuming.

#### Starting the program:

1. Log on using your own DTU password. Check if there are any system updates and install them before proceeding.

If you are using the remote desktop (byg-f0127) make sure no one is running samples on the XRD or doing data treatment (can be seen in the Outlook calendar BYG-z-Equipment-XPERT)

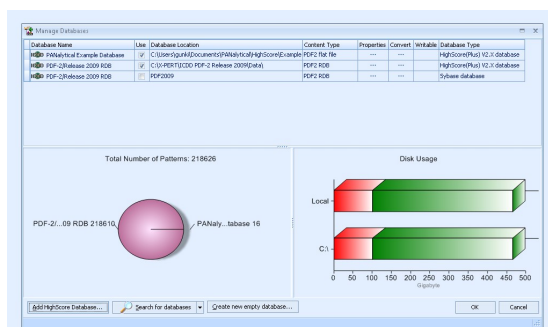
2. Start the programme *HighScore*



3. Firstly, check if the database is loaded properly. The following ICDD logo must show when opening the programme.

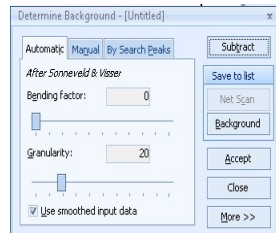


If not, find the database under *Customize* → *Manage databases*. Check that there is > 20,000 patterns available (if there is only about 20, only the example database is on).



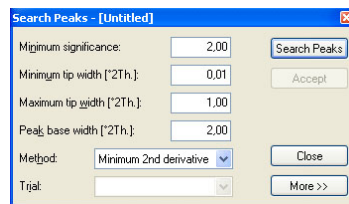
The folder for the converted database is: C:\Program Files\ICDD PDF-2 Release and the box should be checked off.

4. If there are some problems with getting into the database, try to restart the computer
5. Choose *file* → *open* → *find the file you want to work on*. The file format for diffractograms are called .XRDML.
6. Choose *treatment* → *determine background*. The following pop-up window will now appear:



There are 3 different methods for determining the background: Automatic, Manual and by search peak. (read more about the different methods in the full manual). **Choose Automatic.**

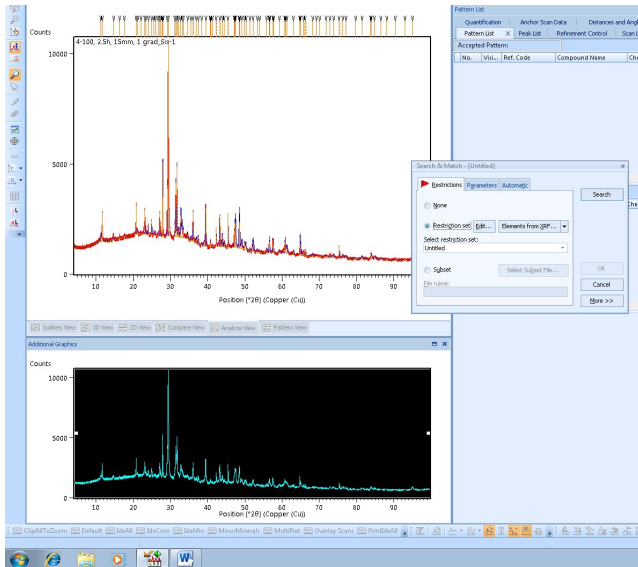
7. When a satisfying background has been fitted to the profile, press “accept”. The background will now appear as a black line in the profile window.
8. Choose *treatment* → *search peaks*. The following window will appear:



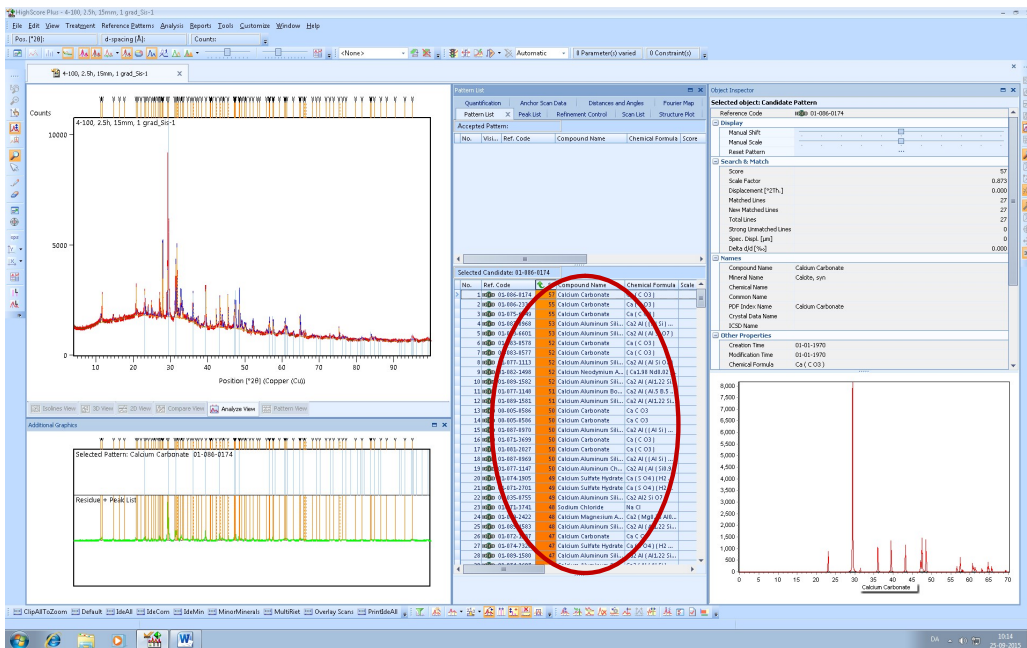
The “Search peak”-function uses 5 parameters to define what parts of the profile that are peaks and what parts that are not. The 5 parameters are: minimum significance, minimum and maximum tip widths, Peak base width and method. (read more about the 5 parameters in the full manual). Press **search peaks and then accept**.

9. Choose *analyse* → *Search & Match* → *Execute Search & Match...*. The Following window will appear:



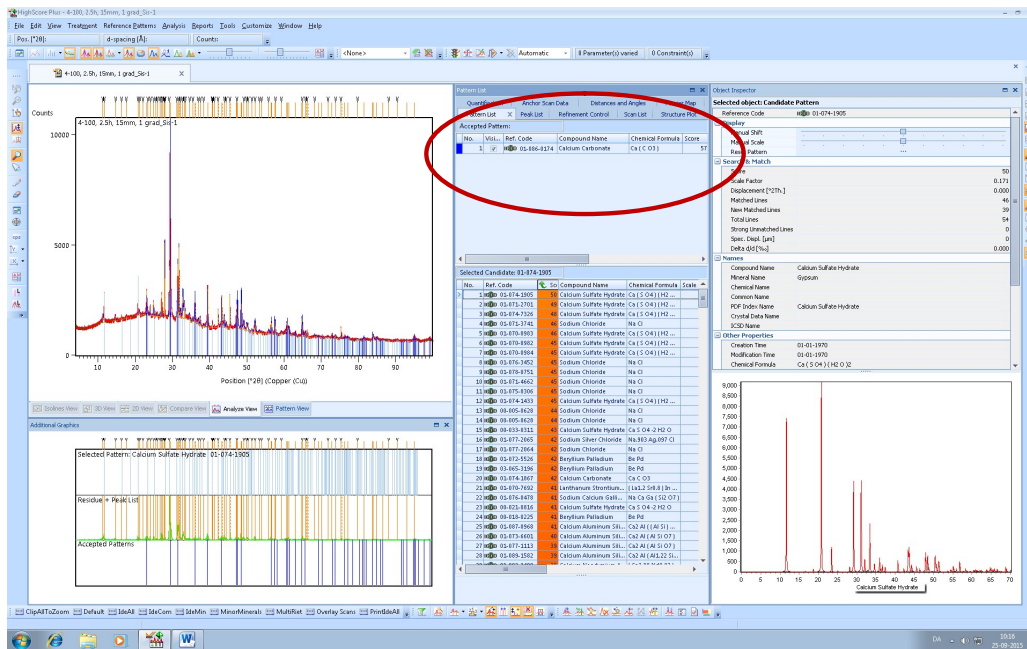


10. Press search (then the program compares your diffractogram to the > 20,000 patterns in the database, so it take a few minutes).

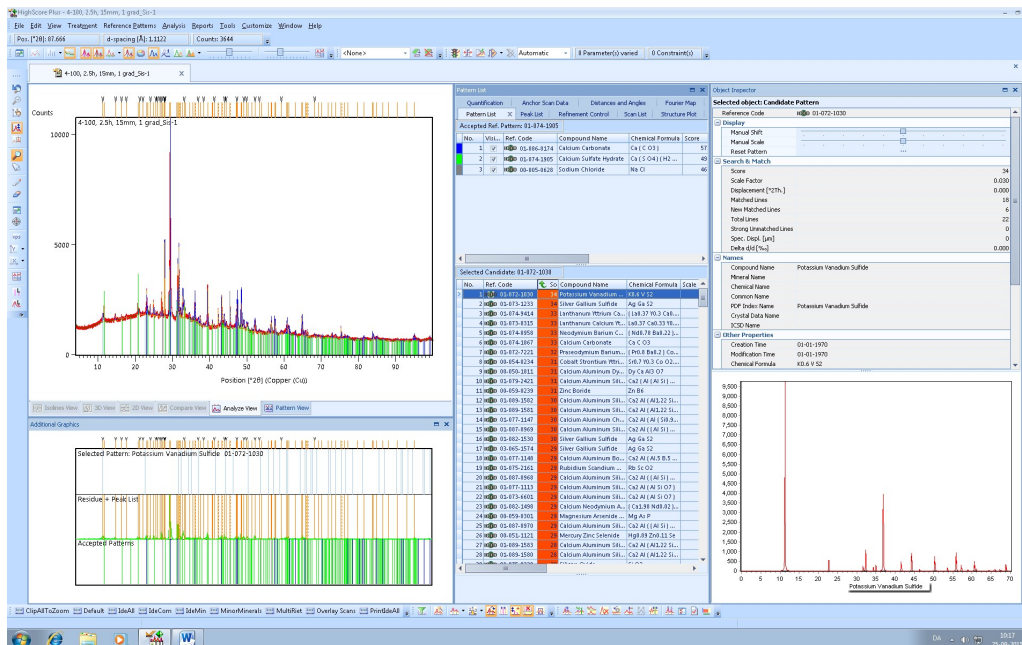


You will have a list of all possible minerals. Score can be used to evaluate the possibility of the presence of the mineral, **but be critical! If you know what you are looking for, this step is much easier! Look in published literature for similar materials.**

- Click on the mineral candidate you want to accept and drag it into the Accepted patterns box. (or rightclick and accept).
- Repeat this step until you have identified the main peaks. (for most environmental samples it will not be possible to identify all peaks.)



- When you have identified the main minerals save the file as a HPF-file.

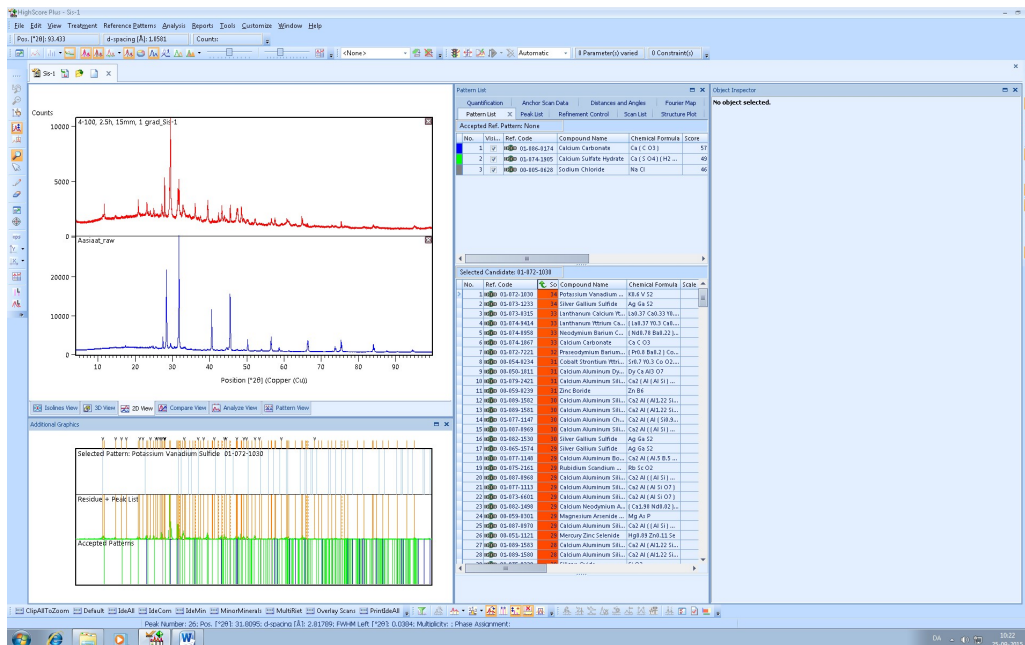


## Making graphs

The method you choose depends on what you want to display and the visual result, this is individual. There are many features in these programmes, you can play with it to fit your need.

### Method 1 – using HighScore Plus

1. Save the XRDML file with the name you want to have shown for your sample.
2. Open the XRDML file in HighScore Plus
3. For the next sample choose *Insert* → *then the other XRDML file*
4. Choose 2 D view to have the patterns above each other instead of on top of each other.



- Continue with as many patterns you want in one graph.
- You can rightclick and zoom.
- Save as a photo: JPEG or BMP.
- Export to Word or other programme to add mineral names or notation in graphs.

between the grains, which changed to a more crystalline and less porous surface of the carbonized sample (Fig. 2 e). A similar change was also observed by Jiang et al. [29], where the crystallinity was caused by reaction products from the carbonization reaction. Both the raw and carbonized APC residue changed when electrochemically upgraded. The EDU residues lost some of the granularity and crystalline appearances, which could be due to the removal of soluble salts.

The XRD diffractograms are seen in Fig. 3, from where the major crystalline phases in the different APC residues are specified based on interpretation.

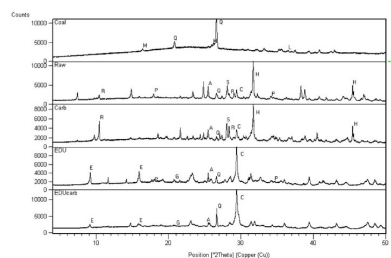


Figure 3 – XRD diffractograms with main minerals: M-mullite, Q-quartz, L-lime, R-richierite, P-portlandite, A-anhydrite, S-sylvite, C-calcite, H-halite, E-enningsite, G-gypsum

The diffractograms for the MSWI residues were noisy due to the complex mineralogy and heterogeneity of the samples. The main minerals in the coal residue were identified as quartz, lime and mullite, which are mineral minerals in coal (see table 156). The main mineral components

## A.10 Blanding og støbning af mørtelprøver

### Blanding af mørtel og støbning af mørtelprøver

#### **A Princip**

DS/EN 196-1 2.udgave.

Denne metode beskriver blanding af mørtel og støbning af mørtelprøver.

HUSK: Før arbejdet udføres skal der tørres sand (0,4mm) i 105 °C. Dette gøres i den store ovn i betonstøberiet i min 24 timer, hvorefter ovnen slukkes og sandet køler ned natten over før det tages ud. Dette gøres for at sikre, at vandindholdet ikke overstiger 0,2% i forhold til tørvægten jf. DS/EN 196-1. Sandet skal være helt koldt ved brug.

HUSK: Hvis der tilsættes aske (eller andre mineralske tilsætninger) skal der også tages højde for vandindholdet af dette, enten ved at regne vandmængden ud og trække fra den tilsatte mængde vand eller ved at tørre asken.

Der bruges basis cement (CEM II) til støbning.

#### **B Specielt apparatur**

Røremaskine (Toni industrie eller Hobart mixer)  
Støbningsforme (40mm x 40mm x 160mm)  
Formolie  
Afretter  
Vibratorbord

HUSK: At reservere røremaskine og vibratorbord, som reserveres i betonstøberiet ved indgangen til mørtelstøberiet.

#### **C Sikkerhed**

Brug altid sikkerhedssko og kittel i støberiet. Hav maske på når der afvejes cement (og aske), og når cement (og aske) blandes med vand i røremaskinen. HUSK at sætte sug til (tændes til venstre for døren til mørtelstøberiet).

#### **D Reagenser**

Aske eller anden mineralsk tilsætning  
Basis cement (CEM II)  
Sand str 0-4mm tørret ved 105 °C og efterfølgende afkølet  
Destilleret vand (orange vandhane).

**E Støbeskema**

Opskriften til referenceprøverne er jf. 196-1. Herfra regnes mængderne for fx 5 og 10 % cementerstatning, se tabel 1.

**Tabel 1: Mængder**

	<b>Cement (g)</b>	<b>Mineralsk tilsætning (g)</b>	<b>Sand (g)</b>	<b>Dest.vand (g)</b>
<b>REF</b>	450 ± 2	0	1350 ± 5	225 ± 1
<b>5%</b>	427,5 ± 2	22,5	1350 ± 5	225 ± 1
<b>10%</b>	405 ± 2	45	1350 ± 5	225 ± 1

HUSK: Ved afvejning af materialer skriv de præcise mængder ned.

**F Udførelse**

Afvej de forskellige ting der skal bruges. Cement og aske kan evt. komme i den samme skål.

Herefter blandes mørtlen på røremaskinen som beskrevet herunder:

- Hvis der skal tilsættes aske eller anden mineralsk tilsætning skal begge være i skålen tilhørende røremaskinen.
- Der tilsættes vand til cementen (og aske) til tiden 0 sek og der røres på lav hastighed i 30 sek (husk maske og sug). (00:30)
- Efter 30 sek tilsættes sandet gradvist over 30 sek, til totaltiden er 1 min. (01:00)
- Røremaskinen slukkes hurtigt, mens der skiftes til middel hastighed og der røres yderligere 30 sek ved middel hastighed (01:30).
- Røremaskinen stoppes i 90 sek. De første 30 sek bruges på, at skrabe evt. mørtel ned fra siderne af skålen. (03:00).
- Røremaskinen startes på middel hastighed og køre 60 sek. (04:00)
- Herefter er mørtlen klar til brug.

**Indstilling for røremaskiner:**

Toni industri: lav=1  
Middel=2  
Hobart mixer: Lav= 1  
Middel=2  
Høj=3

## **G Støbning af mørtelprøver**

Når mørtlen er blandet kan den bruges til at støbe mørtelprøver. Støbeformen sprøjtes med formolie og placeres på vibratorbordet. Støbeformen fyldes halvt og der vibreres i 20 sek (ved hastighed ca. 50 på det store vibratorbord – det lille vibratorbord har inden indstilling). Herefter fyldes formen helt og der vibreres igen i 20 sek imens der afrettes med afretteren.

Sæt formen på et sikkert sted og dækkes med plastik, lad det tørre natten over.

Dagen efter (så vidt muligt 24 timer efter) afformes prøverne. Støbeformene rengøres, samles og sættes på plads, så de er klar til de næste brugere. Mørtelprøverne nedsænkes i vand og opbevares her indtil der skal udføres test.

**HUSK:** Tjek jævnligt, at prøverne stadig befinder sig under vandet – ellers skal der straks tilføres mere vand.

Prøverne skal testes inden for bestemte tidsintervaller jf. DS/EN 196-1, se tabel 2.

**Tabel 2: Udførelse af tests**

<b>Prøvetid</b>
24 t ± 15 min
48 t ± 30 min
72 t ± 45 min
7 d ± 2 t
≥ 28 d ± 8 t

## **H Affaldshåndtering**

Evt. overskydende mørtel smides i containeren til frisk beton.

## A.11 Bearbejdelighed af mørtel

### Bearbejdelighed

#### A Princip

EN 1015-3 1.udgave

#### B Specielt apparatur

Tamper

Form (60 mm  $\pm$  0,5mm høj, 100 mm  $\pm$  0,5mm indvendig diameter i bund, 70 mm  $\pm$  0,5mm indvendig diameter i top. NB: den tilgængelige form i støberier er kun 50 mm.)

Flydebord med håndsving

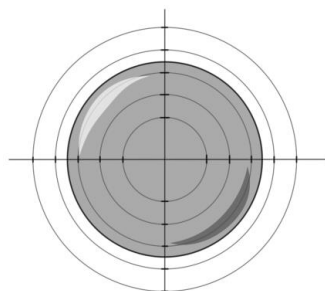
Afretter

#### C Sikkerhed

Brug altid sikkerhedssko og kittel i støberiet

#### D Udførelse

Den ønskede mørtelblanding blandes jf. vejledningen Blanding af mørtel. Formen fyldes halvt op med den friske mørtel og komprimeres med 10 korte slag med tamperen. Formen fyldes helt op og komprimeres med 10 korte slag med tamperen. Toppen afrettes med afretteren og evt. mørtel eller vand som siver ud under formen tørres af. Efter ca. 15 sekunder løftes formen og der køres med håndtaget 15 gange med ca. 1 sek. interval.



Figur 1: Måling af flydesætmål

Flydesætmålet måles lod-og vandret, jf. figur 1, i cm. Testen udføres to gange og resultatet er gennemsnit af de 4 målinger. Der skal laves en ny mørtel mellem de to tests.

#### E Affaldshåndtering

Mørtlen smides i containeren til frisk beton.



## A.12 Afbindingsforløb for mørtel

### Afbindingsforløb for mørtel

#### **A Princip**

DS/EN 196-3+A1 3.udgave

#### **B Specielt apparatur**

Vicatronic  
Bæger i plastik  
Kalibreringsring 40 mm.

#### **C Sikkerhed**

Brug altid sikkerhedssko og kittel i støberiet.

#### **D Udførelse**

##### 1. Kalibrering af vicatronic

- Placer kalibreringsringen i bægeret og tegn langs kanten.
- Bægeret med kalibreringsringen placeres på pladen ved forsigtigt at trække nålen op. PAS PÅ NÅLEN – den knækker let.
- Indstillinger på Vicatronic
  - o Instrument
  - o Needle kalibration
  - o Kalibrer til 0 mm (nålen på bunden af bægeret)
  - o Confirm
  - o Kalibrer til 40mm (tag forsigtigt nålen op på toppen af kalibreringsringen).
  - o Confirm

##### 2. Mørtelprøve

- Bland den ønskede mørtelblanding blandes jf. vejledningen Blanding af mørtel.
- Fyld mørtel i bægeret op til stregen (40mm). Sørg for at overfalden er så jævn som muligt.
- Placer bægeret med mørtelblandingen på pladen ved forsigtigt at trække nålen op. PAS PÅ NÅLEN – den knækker let.
- Indstillinger på Vicatronic
  - o Execution
  - o Kind of test: EN 196-3-2005
  - o Strat test
  - o Testen kører til dagen efter

### 3. Print af resultater

Print direkte fra Vicatronic til papir:

- Indstillinger på Vicatronic
  - o File test
  - o S for print
  - o Partial
  - o >> på siden for at få det hele papiret ud efter print

Dataoverførelse til computer i mørtellab:

1. Både computer (log på med dit eget ID/Studiekonto) og VICAT skal være tændt.
2. Programmet Realterm tændes på computeren
  - a. I fanen Display sættes flueben ved Hex CSV
  - b. I fanen Port sættes Baud til 38400 og der trykkes på knappen  $\surd$  Change
  - c. Gå til fanen Capture
3. Gå ind i File Test på VICAT'en (hvis VICAT'en ikke reagerer kan den genstartes (kontakt på bagsiden af VICAT'en))
  - a. Tryk på c for computer
  - b. Tryk igen for complete
4. Nu vil alle data komme fra VICAT'en til Realterm, hvorfra de kan kopieres til excel.
  - a. Marker alle data i vinduet i Realterm.
  - b. Tryk ctrl + c
  - c. Gå til excel og tryk ctrl + v
5. Excel-arket kan gemmes på U-drevet. Studerende kan evt. bruge USB.

## **E     Databehandling**

Udprint fra Vicatronic til papir

1. Lav et punktdiagram med tiden [min] (I[m.s]) på x-aksen og penetrationen [mm] (PEN.[mm]) på y-aksen.
2. Indledende og endelig afbindingstid kan aflæses jf. DS/EN 196-3.

Dataoverførelse til computer

1. ID, PEN [mm], P[m.s] og I[m.s] opdeles i separate koloner (I excel: marker kolonnen, vælg fanen Data og derefter Tekst til kolonner).
2. Hvis nødvendigt konverteres tekst til tal.
3. Hvis nødvendigt laves punktum til komma.
4. Tomme rækker imellem datamålingerne slettet (ellers kan der ikke laves en linje mellem punkterne i diagrammet).

5. Lav et punktdiagram med tiden [min] ( $t$ [m.s]) på x-aksen og penetrationen [mm] (PEN.[mm]) på y-aksen.
6. Indledende og endelig afbindingstid kan aflæses jf. DS/EN 196-3.

**F    Affaldshåndtering**

Prøven tages ud af plastik bægeret og smides i containeren for hærdet beton.

## A.13 Tryktest af mørtelprøver

### Tryktest af mørtelprøver

#### **A Princip**

DS/EN 196-1 2.udgave.

Denne metode bestemmer trykstyrken af mørtelprøver.

#### **B Specielt apparatur**

Trykprøvemaskinen 'Toni 300' bagerst i betonstøberiet (gennem porten).

HUSK: Reserver Toni 300 i hallen.

#### **C Sikkerhed**

Brug altid sikkerhedssko og kittel. Brug sikkerhedsbriller ved tryk.

#### **E Udførelse**

Før tryk skal alle prøver måles: 3 x højde, 3 x bredde og 2 gange længde. Alle prøver skal desuden vejes.

Forsøgsopstillingen for Toni 300 kan ses på figur 1.



**Figur 1: Forsøgsopstilling**

Trykkraften noteres fra Toni 300 (angives i kN). Alle prøver tests i hver ende.

## **G Beregning af resultat**

Trykstyrken beregnes:

Calculate the compressive strength  $R_c$  in megapascals from:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2)$$

where

$R_c$  is the compressive strength, in megapascals;

$F_c$  is the maximum load at fracture, in newtons;

1 600 is the area of the platens or auxiliary plates (40 mm × 40 mm), in square millimetres.

For hver mørtelblanding fås 6 resultater. Jf. DS/EN 196-1 beregnes gennemsnittet ± 10%. Resultater som falder uden for dette interval skal kasseres og der beregnes et nyt gennemsnit med de resterende resultater. Hvis mere end to resultater skal kasseres skal hele prøven jf. DS/EN 196-1 laves om. Inden dette gøres – tag en snak med din vejleder om hvad vedkommende anbefaler og om hvorvidt vedkommende er interesseret i denne form for statistik.

## **H Affaldshåndtering**

Hvis de afprøve mørtelbarer ikke skal gemmes smides de i containeren for hærdet beton.

## A.14 Porøsitet og densitet af mørtelprøver

### Porøsitet og densitet (LBM-standard)

#### A Princip

Porøsiteten i et materiale fortæller hvor porøst materialet er, dvs. hvor skrøbeligt det er. Jo højere porøsiteten er, des større evne har materialet til at optage vand. Det betyder også at en god evne til at optage vand. Densiteten er materialets masse pr. volumenenhed. Massen af et porøst materiale kan være en tør masse eller en masse med vand i de åbne porer, dvs. ved at finde densiteten kan man udregne massen ved forskellige forhold.

#### B Specielt apparatur

Til målingen benyttes vakuumpumpe, teknisk vægt med mulighed for at veje under vand.

#### C Analysens udførelse

Prøven tørres ved 105°C til prøven er hel tør dvs. ved kontant vægt.

Hvis der er tale om en betonprøve skal denne tørres ved 50°C i min 3 uger, da en tørring ved høj temperatur vil medføre ændring i porestrukturen.

Prøven vejes på teknisk vægt og vægten noteres som ( $m_{105}$ )

Prøven placeres i en eksikator med låg og hane. Eksikatoren tilsluttes vakuumpumpen og pumpes ned i minimum 3 timer.

Destilleret vand med rumtemperatur ledes ind i eksikatoren vha en slange og undertrykket i eksikatoren. Hanen lukkes lige så snart vandstanden er 3 cm over prøvelegemet. Derefter skal den stå lukket i 1 time.

Herefter lukkes luften ind og prøven skal stå under vand natten over ved atmosfæretryk.

Den vandmættede prøve vejes først under vand på en teknisk vægt med ophæng under. Vandet i karret skal have rumtemperatur. Vægten noteres som ( $m_{sw}$ ).

Prøven duppes med en hårdt opvredet klud inden den vejes over vand. Vægten noteres som ( $m_{ssd}$ ).

For at kontrollere om der er sket en udvaskning af prøven ved vandmætning tørres prøven ved 105°C og kontrolvejes.

**D Beregning af resultat**

Rumtemp:	°C	Vandtemp:	°C	Vanddensitet $\rho_w$ =	kg/m <sup>3</sup>
Kontrollod:					
Før:	kg				
Efter:	kg				
Prøvelegement nr:					
$m_{105}$	Kg				
$m_{ssd}$	Kg				
$m_{sw}$	Kg				
$V = (m_{ssd}-m_{sw})/\rho_w$	m <sup>3</sup>				
$V_{p\grave{a}} = (m_{ssd}-m_{105})/\rho_w$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>				
$P_{\grave{a}} = V_{p\grave{a}}/V$	Kg/m <sup>3</sup>				
$\rho_d = m_{105}/V$	Kg/m <sup>3</sup>				
$\rho_f = m_{105}/(V-V_{p\grave{a}})$	Kg/m <sup>3</sup>				
$\rho_{ssd} = m_{ssd}/V$	Kg/m <sup>3</sup>				
$u_{ssd} = (m_{ssd}-m_{105})/m_{105}$	Kg/kg				

Definitioner, begreber og symboler

- $m_{105}$  Masse af prøvelegemet efter tørring ved 105°C (kg)
- $m_{ssd}$  Masse af prøvelegemet over vand efter vakuumvandmætning (kg)
- $m_{sw}$  Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme vejet i vand (kg)
- $V$  Prøvelegemets volumen (m<sup>3</sup>)
- $V_{p\grave{a}}$  Volumen af åbne porer (m<sup>3</sup>)
- $\rho_f$  Faststoffdensitet (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_d$  Tørdensitet (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_{ssd}$  Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet overfladetør tilstand (kg/m<sup>3</sup>)
- $p_{\grave{a}}$  Prøvelegemets åbne porøsitet (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)
- $u_{ssd}$  Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet overfladetør tilstand (kg/kg)

## A.15 Støbning af farveprøver

Arktisk Teknologi og Bæredygtige Løsninger, F 2017

### Støbning af farveprøver

#### A Princip

Farveprøver til visuel analyse af mørtel med og uden cement/sanderstatninger.

#### B Specielt apparatur

From til farveprøver, se beskrivelse under udførelse. Findes i betonstøberiet.

Grundpapir

Cirkelskærer

Hobbykniv

Skæreplade

Tapetbørste

Malertape

Spand

Skruemaskine

Blyant

Materialer til blanding af mørtel jf. "Blanding af mørtel og støbning af mørtelprøver jf. 196-1"

**HUSK:** At reservere røremaskine og vibratorbord, som reserveres i betonstøberiet ved indgangen til mørtelstøberiet.

#### C Sikkerhed

Brug altid sikkerhedssko og kittel i støberiet. Maske og sug bruges ved blanding af mørtel.

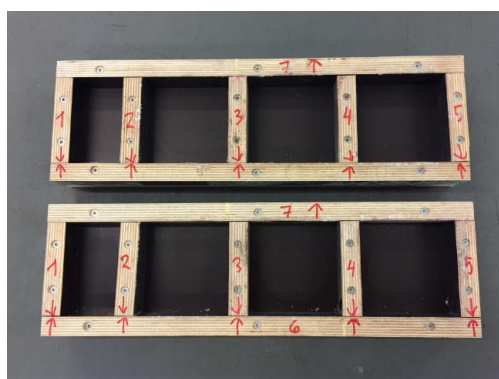
#### D Udførelse

*FORMENE TIL FARVEPRØVER ER  
MEGET SKRØBELIGE – PAS PÅ DEM!*

##### Forme til farveprøver

Forme til farveprøver, se figur 1, findes i betonstøberiet.

Formene opbevares 2 og 2, tapet sammen med oversiderne (med tal og pile) mod hinanden for at undgå støv i formene. De holdes sammen af malertape.



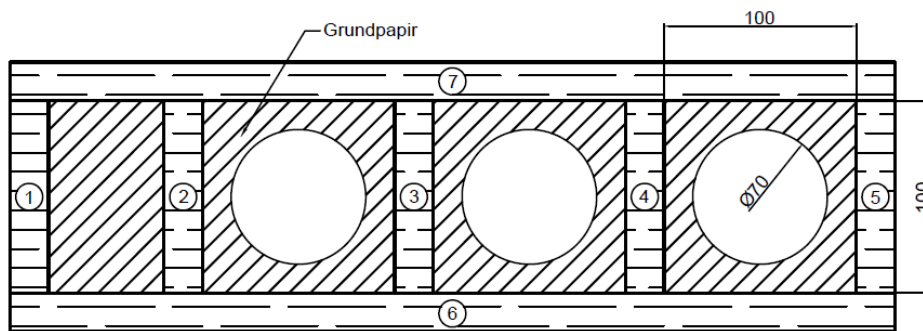
Figur 1: 2 stk. forme til farveprøver



### Klargøring af skabelon i grundpapir

Formen ligges på grundpapiret og der tegnes med blyant langs formens yderkant (rektangel ca. 140 x 460mm). Rektangleret skæres ud med hobbykniven på skærepladen eller klippes med saks.

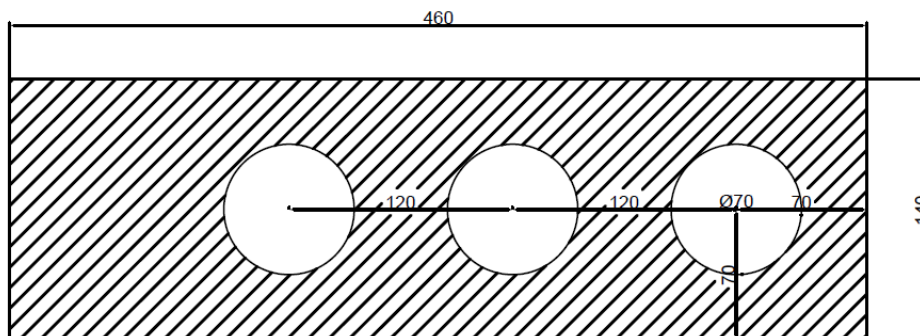
Der måles op til tre huller i hver firkant (mellem side nr. 2 og 3, nr. 3 og 4, nr. 4 og 5). Hullerne skal have en diameter på 70mm og skal så vidt muligt placeres centreret i firkanterne, se figur 2. Hullerne tegnes med blyant og skæres ud med en cirkelskære på skærepladen.



**Figur 2: Skitse over form til farveprøver med skabelon i grundpapir (alle mål er vejledende og i mm)**

Lav altid ekstra skabeloner – det går ofte galt, når skabelonen i efterfølgende skal placeres på formens bund.

Vejledende skitse af skabelon i grundpapir kan ses på figur 3.



**Figur 3: Vejledende skitse af skabelon i grundpapir (alle mål i mm)**

### Klargøring af formen

Toppen (nr. 7), siderne (nr. 1, 2, 3, 4 og 5) og til sidst bunden (nr. 6) skrues forsigtigt af i nævnte rækkefølge.

Formen smøres med olie med en klud eller papir (ved vaskene i betonlaboratoriet). Olien sprøjtes på bundpladen og klud evt. Det er vigtigt, at formene smøres grundigt, men forsigtigt. Formene skal ikke glinse af olie, men eftertørres så der kun er et fint lag olie på bundpladen og siderne. Oversiden skal ikke have olie.

### Blanding af mørtel

Når skabelonen af lavet og formen er smurt (men endnu ikke samlet) blandes mørtlen jf. "Blanding af mørtel og støbning af mørtelprøver jf. 196-1".

### Samling af form

Da det er vigtigt at skabelonen er våd når der støbes, derfor gøres dette trin først **efter** mørtlen er blandet og klar til brug.

Der hældes vand i en spand og hele skabelonen dyppes i. Herefter placeres på formens bundplade og lufthuller og folder børstes væk med tapetbørsten. Skruehullerne til toppen (nr. 7), siderne (nr. 1, 2, 3, 4 og 5) og bunden (nr. 6) vil være synlige i from af lufthuller.

Formen skrues sammen igen i rækkefølgen toppen (nr. 7), siderne (nr. 1, 2, 3, 4 og 5) og til sidst bunden (nr. 6). Formen skrues forsigtigt sammen, da skabelonen let krøller. Når alle dele af skruet fast kan skrueerne strammes efter.

Oversiden (med tal og pile) af formens top, sider og bund skal dækkes til med malertape.

Formen er nu klar til støbning.

### Støbning af farveprøver

Formen fyldes og vibreres jf. "Blanding af mørtel og støbning af mørtelprøver jf. 196-1".

Der ligges plastic over formen og afformes dagen efter.

### Afformning af farveprøver

Dagen efter støbning kan farveprøverne afformes.

Toppen (nr. 7), bunden (nr. 6) og til sidst siderne (nr. 1, 2, 3, 4 og 5) skrues forsigtigt af i nævnte rækkefølge.

Skabelonen bør slippe af sig selv – vær forsigtig, når farveprøverne løftes ud af formen.

Der kan sidde papir og fnuller fra skabelonen på farveprøverne. Dette lades i første omgang være.

Farveprøverne stilles et godt sted og hærder i 14 dage yderligere. Herefter kan de vaskes og evt. papir og fnuller fra skabelonen kan vaskes af.

#### Rengøring af forme

Når formen er skilt ad og farveprøverne af fjernet skal den forsigtigt rengøres og skrues sammen.

Formen rengøres vha. olie og klud/papir (ved vaskene i betonlaboratoriet). **Der må ikke bruges værktøj, som spartel eller skruetrækker eller vand, da formene ellers bliver ridset og/eller ødelagt hvis de bliver våde.** Gøres dette forsigtigt kan de anvendes mange gange. Kommer der ridser i formene kan det ses på de næste prøver der støbes.

Når formen er **helt** rengjort, skrues den forsigtigt sammen i rækkefølgen top (nr. 7), sider (nr. 1, 2, 3, 4 og 5) og til sidst bund (nr. 6).

Herefter tapes de sammen igen 2 og 2, med oversiderne mod hindanden, og ligges på plads.

#### **E     Affaldshåndtering**

Evt. overskydende mørtel smides i containeren til frisk beton.

# B Resultatbehandling

## B.1 Data for vandindhold 1 af 2

Forsøgsdat Sand	17-02-2017
105 grader Cement	06-04-2019
Zinkgruvan	06-04-2019
Nussir	06-04-2019

	Sand				Vandindhold [%]
	Inden tørring		Efter tørring		
	Bægerglas vægt [g]	Prøve vægt [g]	Samlet vægt [g]	Prøve vægt [g]	
Prøve A	5,05	2,06	7,09	2,04	1,06
Prøve B	5,04	2,05	7,07	2,03	0,99
Prøve C	5,04	2,40	7,42	2,38	0,87
Gennemsnit					<b>0,97</b>

	Cement				Vandindhold [%]
	Inden tørring		Efter tørring		
	Bægerglas vægt [g]	Prøve vægt [g]	Samlet vægt [g]	Prøve vægt [g]	
Prøve A	19,19	4,75	23,93	4,74	0,21
Prøve B	19,51	4,83	24,31	4,80	0,62
Prøve C	19,04	4,72	23,74	4,70	0,42
					<b>0,42</b>

	Zinkgruvan				Vandindhold [%]
	Inden tørring		Efter tørring		
	Bægerglas vægt [g]	Prøve vægt [g]	Samlet vægt [g]	Prøve vægt [g]	
Prøve A	19,13	5,49	24,06	4,93	10,20
Prøve B	21,33	5,04	25,88	4,55	9,72
Prøve C	22,51	5,17	27,17	4,66	9,86
					<b>9,93</b>

	Nussir				Vandindhold [%]
	Inden tørring		Efter tørring		
	Bægerglas vægt [g]	Prøve vægt [g]	Samlet vægt [g]	Prøve vægt [g]	
Prøve A	19,15	4,94	24,07	4,93	0,30
Prøve B	21,33	4,94	26,26	4,93	0,18
Prøve C	19,52	5,05	24,56	5,04	0,26
					<b>0,25</b>

Forsøgsdato	Sand	-
50 grader	Cement	17-02-2017
	Zinkgruvan	02-02-2017
	Nussir	27-02-2017

**Cement**

	Inden tørring		Efter tørring		Vandindhold [%]
	Bægerglas vægt [g]	Prøve vægt [g]	Samlet vægt [g]	Prøve vægt [g]	
Prøve A	5,06	2,38	7,43	2,37	0,21
Prøve B	5,04	2,13	7,16	2,13	0,23
Prøve C	5,04	2,44	7,48	2,44	0,20
					<b>0,22</b>

**Zinkgruvan**

	Inden tørring		Efter tørring		Vandindhold [%]
	Bægerglas vægt [g]	Prøve vægt [g]	Samlet vægt [g]	Prøve vægt [g]	
Prøve A	5,02	2,89	7,58	2,65	8,30
Prøve B	4,99	2,71	7,46	2,47	8,86
Prøve C	5,02	3,11	7,77	2,79	10,29
					<b>9,15</b>

**Nussir**

	Inden tørring		Efter tørring		Vandindhold [%]
	Bægerglas vægt [g]	Prøve vægt [g]	Samlet vægt [g]	Prøve vægt [g]	
Prøve A	5,05	5,21	10,26	5,20	0,10
Prøve B	5,04	5,52	10,56	5,51	0,12
Prøve C	5,05	5,14	10,18	5,13	0,15
					<b>0,12</b>

## B.2 Data for vandabsorption

1 af 1

Forsøgsdatoer	Sand	01-06-2017
	Cement	-
	Zinkgruvan	01-06-2017
	Nussir	01-06-2017

	<b>Sand</b>	<b>Zinkgruvan</b>	<b>Nussir</b>
m_glas [g]	127,70	129,30	128,50
m_ssd_total [g]	348,20	324,70	354,50
m_d_total [g]	347,90	324,00	353,50
m_ssd [g]	220,50	195,40	226,00
m_d [g]	220,20	194,70	225,00
wa [%]	<b>0,14</b>	<b>0,36</b>	<b>0,44</b>

## B.3 Data for pH-værdi

1 af 1

Forsøgsdatoer	Sand	17-02-2017
	Cement	17-02-2017
	Zinkgruvan	02-02-2017
	Nussir	06-03-2017

Sand		
	Vægt [g]	pH [-]
Prøve A	5,00	9,93
Prøve B	5,01	9,60
Prøve C	5,00	9,54
Prøve D	5,00	9,33
Prøve E	5,00	9,54
Gennemsnit		<b>9,59</b>

Cement		
	Vægt [g]	pH [-]
Prøve A	5,00	12,36
Prøve B	5,00	12,37
Prøve C	5,01	12,35
Prøve D	5,00	12,27
Prøve E	5,00	12,24
Gennemsnit		<b>12,32</b>

Zinkgruvan		
	Vægt [g]	pH [-]
Prøve A	5,00	8,39
Prøve B	5,00	8,39
Prøve C	5,00	8,39
Prøve D	5,00	8,39
Prøve E	5,00	8,47
Gennemsnit		<b>8,41</b>

Nussir		
	Vægt [g]	pH [-]
Prøve A	5,01	8,85
Prøve B	5,01	8,86
Prøve C	5,01	8,86
Prøve D	5,01	8,83
Prøve E	5,00	8,85
Gennemsnit		<b>8,85</b>

## B.4 Data for glødetab

1 af 1

Forsøgsdatoer	Sand	13-02-2017
	Cement	13-02-2017
	Zinkgruvar	13-02-2017
	Nussir	13-02-2017

G = Glødetab

### Sand

	Vægt inden tørring		Vægt efter 550°C		Vægt efter 950°C		G 550°C [%]	G 950°C [%]
	Bægerglas [g]	Prøve [g]	Samlet [g]	Prøve[g]	Samlet [g]	Prøve[g]		
A	15,52	2,50	18,02	2,49	17,94	2,42	0,29	3,10
B	14,56	2,50	17,05	2,50	16,98	2,42	0,27	2,90
C	14,88	2,50	17,37	2,49	17,31	2,43	0,30	2,70
							<b>0,29</b>	<b>2,90</b>

### Zinkgruvar

	Vægt inden tørring		Vægt efter 550°C		Vægt efter 950°C		G 550°C [%]	G 950°C [%]
	Bægerglas [g]	Prøve [g]	Samlet [g]	Prøve[g]	Samlet [g]	Prøve[g]		
A	14,25	2,51	16,75	2,50	16,61	2,36	0,48	5,40
B	14,32	2,50	16,81	2,49	16,67	2,36	0,41	5,51
C	12,26	2,50	14,75	2,49	14,62	2,36	0,39	5,43
							<b>0,43</b>	<b>5,45</b>

### Cement

	Vægt inden tørring		Vægt efter 550°C		Vægt efter 950°C		G 550°C [%]	G 950°C [%]
	Bægerglas [g]	Prøve [g]	Samlet [g]	Prøve[g]	Samlet [g]	Prøve[g]		
A	13,82	2,50	16,29	2,47	16,15	2,33	1,29	5,53
B	13,60	2,50	16,08	2,47	15,95	2,35	1,18	5,02
C	10,37	2,50	12,84	2,47	12,72	2,35	1,13	5,13
							<b>1,20</b>	<b>5,22</b>

### Nussir

	Vægt inden tørring		Vægt efter 550°C		Vægt efter 950°C		G 550°C [%]	G 950°C [%]
	Bægerglas [g]	Prøve [g]	Samlet [g]	Prøve[g]	Samlet [g]	Prøve[g]		
A	11,26	2,50	13,76	2,50	13,34	2,07	0,25	16,97
B	12,39	2,50	14,89	2,49	14,46	2,07	0,34	16,94
C	12,41	2,50	14,90	2,49	14,49	2,08	0,37	16,61
							<b>0,32</b>	<b>16,84</b>



## B.5 Data for carbonatindhold

1 af 1

Forsøgsdatoer	Sand	17-02-2017
	Cement	17-02-2017
	Zinkgruvan	06-02-2017
	Nussir	17-02-2017

### Sand

	Vægt [g]	Aflæst CO <sup>2</sup> [mL]	CaCO <sub>3</sub> standardkurve [g]	CaCO <sub>3</sub> indhold [%]
Prøve A	2,50	41,30	0,18	7,24
Prøve B	2,50	39,20	0,17	6,88
Prøve C	2,50	47,00	0,21	8,25
Gennemsnit				<b>7,46</b>

### Zinkgruvan

	Vægt [g]	Aflæst CO <sup>2</sup> [mL]	CaCO <sub>3</sub> standardkurve [g]	CaCO <sub>3</sub> indhold [%]
Prøve A	2,50	10,90	0,05	1,91
Prøve B	2,50	28,80	0,13	5,06
Prøve C	2,51	34,00	0,15	5,96
Gennemsnit				<b>4,31</b>

### Cement

	Vægt [g]	Aflæst CO <sup>2</sup> [mL]	CaCO <sub>3</sub> standardkurve [g]	CaCO <sub>3</sub> indhold [%]
Prøve A	0,50	21,00	0,09	18,45
Prøve B	0,50	18,80	0,08	16,40
Prøve C	0,50	18,90	0,08	16,48
Gennemsnit				<b>17,11</b>

### Nussir

	Vægt [g]	Aflæst CO <sup>2</sup> [mL]	CaCO <sub>3</sub> standardkurve [g]	CaCO <sub>3</sub> indhold [%]
Prøve A	0,50	0,20	0,00	0,18
Prøve B	0,50	1,00	0,00	0,87
Prøve C	0,50	0,20	0,00	0,18
Gennemsnit				<b>0,41</b>

## B.6 Standardrække for carbonatindhold

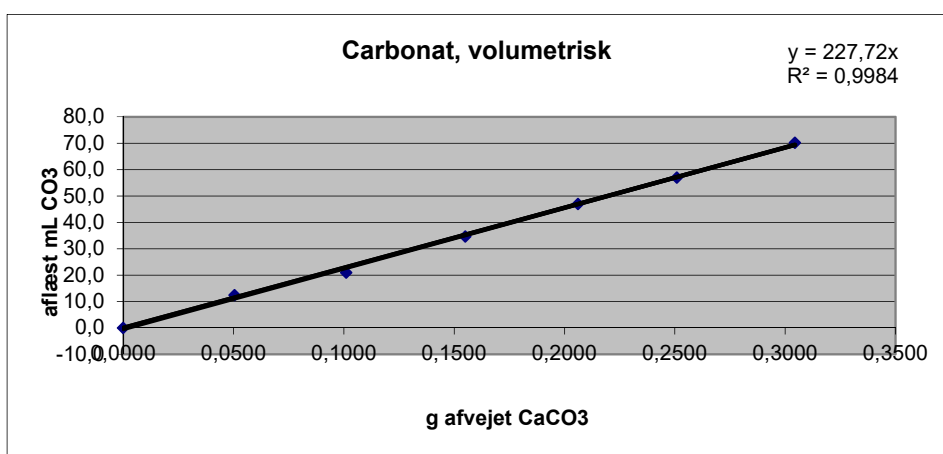
1 af 1

### Carbonat, volumetrisk

Dato: 07/02-2017

Udført af: malm

Standardrække:	g afvejet CaCO <sub>3</sub>	aflæst mL CO <sub>2</sub>
Nulprøve	0,0000	0,0
Standard: 0,05	0,0504	12,4
Standard: 0,10	0,1010	21,0
Standard: 0,15	0,1550	34,7
Standard: 0,20	0,2061	47,0
Standard: 0,25	0,2509	57,0
Standard: 0,30	0,3044	70,2



## B.7 Data for tungmetalindhold

1 af 3

Zinkgruvan							
	A	B	C	D	E		
Vægt [g]	1,01	1,03	1,01	1,02	1,00		
<b>Metal koncentration [mg/L]</b>							
As	0,56	0,62	0,47	0,58	0,57		
Ba	2,55	2,53	2,61	2,66	2,58		
Cd	0,14	0,16	0,15	0,16	0,15		
Cu	2,89	2,71	2,85	2,77	2,57		
Ni	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20		
Pb	40,55	41,46	39,94	43,56	42,09		
Zn	92,80	101,80	92,63	100,54	95,84		
<b>Metal koncentration [mg/kg]</b>						<b>Gennemsnit</b>	<b>Std. Afv.</b>
As	55,38	59,73	46,15	56,93	57,34	55,10	5,24
Ba	252,91	245,99	258,39	260,77	258,06	255,22	5,90
Cd	14,18	15,45	14,71	15,27	15,32	14,99	0,53
Cu	285,91	262,92	281,99	271,83	256,61	271,85	12,37
Ni	21,18	20,55	20,74	20,23	19,86	20,51	0,50
Pb	4014,70	4025,24	3954,07	4270,94	4208,54	4094,70	136,95
Zn	9188,37	9883,88	9171,08	9856,47	9584,30	9536,82	346,44

Cement							
	A	B	C	D	E		
Vægt [g]	1,03	1,03	1,02	1,03	1,01		
<b>Metal koncentration [mg/L]</b>							
As	0,04	0,07	0,06	0,08	0,07		
Ba	1,52	2,47	2,56	2,55	2,32		
Cd	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01		
Cu	0,56	0,89	0,93	0,93	0,84		
Ni	0,14	0,22	0,23	0,23	0,21		
Pb	0,19	0,27	0,30	0,28	0,28		
Zn	1,64	2,63	2,75	2,75	2,47		
<b>Metal koncentration [mg/kg]</b>						<b>Gennemsnit</b>	<b>Std. Afv.</b>
As	3,515387612	6,757711	5,887073	7,831857	7,324311	6,263267953	1,697287
Ba	148,4719517	239,9085	250,9032	248,3166	228,9262	223,3053064	42,70393
Cd	0,407382158	0,559794	0,479695	0,568689	0,693569	0,54182564	0,107245
Cu	54,18465134	86,66187	90,81652	90,17097	82,81547	80,92989448	15,28775
Ni	13,4776977	21,33395	22,50602	21,989	20,70078	20,00148881	3,709689
Pb	18,34865602	26,66877	29,31647	27,28566	28,04653	25,93321733	4,353395
Zn	160,1636151	255,7215	269,1291	268,1871	244,2142	239,4830994	45,4985

<b>Nussir</b>					
---------------	--	--	--	--	--

A	B	C	D	E	
Vægt [g]	1,02	1,01	1,02	1,01	1,01

<b>Metal koncentration [mg/L]</b>					
-----------------------------------	--	--	--	--	--

As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,65	0,62	0,65	0,62	0,66
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu	2,52	2,45	2,51	2,50	2,50
Ni	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11
Pb	0,11	0,00	0,11	0,05	0,04
Zn	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09

<b>Metal koncentration [mg/kg]</b>					
------------------------------------	--	--	--	--	--

						<b>Gennemsnit</b>	<b>std. Afv.</b>
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	63,80	61,47	63,80	60,74	65,43	63,05	1,91
Cd	0,16	0,17	0,11	0,11	0,18	0,15	0,03
Cu	248,46	242,07	246,52	246,27	246,53	245,97	2,35
Ni	10,95	11,02	10,20	10,82	11,06	10,81	0,35
Pb	10,91	0,00	11,19	5,12	3,57	6,16	4,84
Zn	10,25	9,52	9,95	9,71	9,00	9,68	0,47

<b>Sand</b>					
-------------	--	--	--	--	--

A	B	C	D	E	
Vægt [g]	1,00	1,00	1,01	1,02	1,00

<b>Metal koncentration [mg/L]</b>					
-----------------------------------	--	--	--	--	--

As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,02	0,05	0,03	0,01	0,03
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zn	0,05	0,06	0,06	0,02	0,06

<b>Metal koncentration [mg/kg]</b>					
------------------------------------	--	--	--	--	--

						<b>Gennemsnit</b>	<b>Std. Afv.</b>
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	2,31	4,92	2,55	0,79	2,68	2,65	1,48
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	1,14	1,69	1,42	0,43	1,13	1,16	0,47
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zn	4,52	5,71	5,48	1,86	5,51	4,61	1,61

	Tungmetaller						
	Arsen, As	Barium, Ba	Cadmium, Cd	Kobber, Cu	Nikkel, Ni	Zink, Zn	Bly, Pb
Sand,	0	2,68±1,5	0	0	1,17±0,48	4,66±1,64	0
Cement	6,26±1,7	223,31±42,7	0,54±0,11	80,93±15,29	20±3,71	239,48±45,5	25,93±4,35
Zinkgruven	55,10±5,24	255,2±5,9	14,99±0,53	271,85±11,2,37	20,51±0,5	9536,82±346,44	4094,7±136,95
Nussir	0	63,05±1,91	0,15±0,03	245,97±2,35	10,81±0,35	9,68±0,47	6,16±4,84
	<20	<100	<0,5	<500	<30	<500	<40

## B.8 Data for pyknometer-partiklernes densitet

1 af 4

Dato	04-04-2017
Navn	Maja
Projekt	
Prøvemateriale	Cement

Metode:  
Efter Laboratoriehåndbogen, dgf-bulletin 15 (dgf15)  
Efter DS/CEN ISO/TS 17892-3

Resultat
Beregning
Input

### Bestemmelse af kornrumvægt Cement

				1	2	3
<b>Fra kalibrering af pyknometer</b>						
Pyknometer nummer				176	173	139
Pykn. + prop (tomt)		m <sub>0</sub>	g	31,3964	32,5943	31,4882
Pykn. + prop (vandfyldt)	W <sub>2</sub>	m <sub>1</sub>	g	81,6107	81,7491	80,938
Temperatur ved kalibrering	T <sub>k</sub>	T <sub>1</sub>	°C	22	22	22
Densitet af vand ved T <sub>k</sub> *	ρ <sub>w,k</sub>	ρ <sub>w;1</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0,9978	0,9978	0,9978
<b>Måling</b>						
Pykn.+ prop + jord		m <sub>2</sub>	g	35,147	36,5879	35,4881
Pykn.+ prop + jord + vand	W <sub>1</sub>	m <sub>3</sub>	g	84,2736	84,5749	83,7664
Temperatur	T	T <sub>3</sub>	°C	25	25	25
Densitet af vand ved T *	ρ <sub>w,t</sub>	ρ <sub>w;3</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0,9971	0,9971	0,9971
Jord - masse	W <sub>s</sub>	m <sub>4</sub>	g	3,7506	3,9936	3,9999
Jord - volumen	V <sub>s</sub>		cm <sup>3</sup>	1,05553354	1,13661195	1,14011515
Korndensitet	ρ <sub>s</sub>	ρ <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	3,55327412	3,51360022	3,50832983
Resultat - middel	ρ <sub>s</sub>	ρ <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	<b>3,5251</b>		
Betegnelser fra	dgf15	DS				

\* [Se faneblad med vands densitet](#)

Dgf-bulletin 15:

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_3 - W_0}{\frac{W_2 - W_0}{\rho_{w,k}} - \frac{W_1 - W_3}{\rho_{w,t}}}$$

DS/CEN ISO/TS 17892-3:

$$\rho_s = \frac{m_4}{\frac{m_1 - m_0}{\rho_{w;1}} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{w;3}}}$$

Der bør ikke være stor forskel på temperaturen ved kalibrering og måling.

Der kan evt. foretages kalibrering ved flere temperaturer, eller udføres en teoretisk korrektion af volumen af pyknometer:

$$V_{pyk;test} = \frac{W_2 - W_0}{\rho_{w,k}} \alpha$$

$$\alpha = 1 + 3 \cdot 0.000003 (T - T_k)$$

$$V_{pyk;3} = \frac{m_1 - m_0}{\rho_{w;1}} \alpha$$

$$\alpha = 1 + 3 \cdot 0.000003 (T_1 - T_3)$$

Dato	04-04-2017
Navn	Maja
Projekt	
Prøvemateriale	Sand

Metode:  
Efter Laboratoriehåndbogen, dgf-bulletin 15 (dgf15)  
Efter DS/CEN ISO/TS 17892-3

Resultat  
Beregning  
Input

### Bestemmelse af kornrumvægt Sand

				1	2	3
<b>Fra kalibrering af pyknometer</b>						
Pyknometer nummer				14	11	4
Pykn. + prop (tomt)		m <sub>0</sub>	g	47,3907	48,0464	43,1983
Pykn. + prop (vandfyldt)	W <sub>2</sub>	m <sub>1</sub>	g	149,4482	150,313	142,46
Temperatur ved kalibrering	T <sub>k</sub>	T <sub>1</sub>	°C	22	22	22
Densitet af vand ved T <sub>k</sub> *	ρ <sub>w,k</sub>	ρ <sub>w;1</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0,9978	0,9978	0,9978
<b>Måling</b>						
Pykn.+ prop + jord		m <sub>2</sub>	g	51,0504	52,3918	47,1997
Pykn.+ prop + jord + vand	W <sub>1</sub>	m <sub>3</sub>	g	151,9811	152,8768	145,0055
Temperatur	T	T <sub>3</sub>	°C	18	18	18
Densitet af vand ved T *	ρ <sub>w,t</sub>	ρ <sub>w;3</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0,99862	0,99862	0,99862
Jord - masse	W <sub>s</sub>	m <sub>4</sub>	g	3,6597	4,3454	4,0014
Jord - volumen	V <sub>s</sub>		cm <sup>3</sup>	1,2123447	1,86822165	1,5395987
Korndensitet	ρ <sub>s</sub>	ρ <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	3,01869591	2,32595527	2,59898894
Resultat - middel	ρ <sub>s</sub>	ρ <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2,6479		
Betegnelser fra	dgf15	DS				

\* Se faneblad med vands densitet

Dgf-bulletin 15:

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_3 - W_0}{\frac{W_2 - W_0}{\rho_{w,k}} - \frac{W_1 - W_3}{\rho_{w,t}}}$$

DS/CEN ISO/TS 17892-3:

$$\rho_s = \frac{m_4}{\frac{m_1 - m_0}{\rho_{w;1}} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{w;3}}}$$

Der bør ikke være stor forskel på temperaturen ved kalibrering og måling.  
Der kan evt. foretages kalibrering ved flere temperaturer, eller udføres en teoretisk korrektion af volumen af pyknometer:

$$V_{pyk;test} = \frac{W_2 - W_0}{\rho_{w,k}} \alpha$$

$$\alpha = 1 + 3 \cdot 0.000003 (T - T_k)$$

$$V_{pyk;3} = \frac{m_1 - m_0}{\rho_{w;1}} \alpha$$

$$\alpha = 1 + 3 \cdot 0.000003 (T_1 - T_3)$$

C:\Users\Maja\Desktop\Bachelorprojekt - Mineaffald i beton\Resultater fra forsøg\Pyknometer \_ Sand

Dato	04-04-2017
Navn	Maja
Projekt	
Prøvemateriale	Zinkgruvan

Metode:  
Efter Laboratoriehåndbogen, dgf-bulletin 15 (dgf15)  
Efter DS/CEN ISO/TS 17892-3

Resultat  
Beregning  
Input

### Bestemmelse af kornrumvægt Zinkgruvan

				1	2	3
<b>Fra kalibrering af pyknometer</b>						
Pyknometer nummer				176	173	139
Pykn. + prop (tomt)		m <sub>0</sub>	g	31,3964	32,5943	31,4882
Pykn. + prop (vandfyldt)	W <sub>2</sub>	m <sub>1</sub>	g	81,6107	81,7491	80,938
Temperatur ved kalibrering	T <sub>k</sub>	T <sub>1</sub>	°C	22	22	22
Densitet af vand ved T <sub>k</sub> *	ρ <sub>w,k</sub>	ρ <sub>w;1</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0,9978	0,9978	0,9978
<b>Måling</b>						
Pykn.+ prop + jord		m <sub>2</sub>	g	35,3902	36,5873	35,4802
Pykn.+ prop + jord + vand	W <sub>1</sub>	m <sub>3</sub>	g	84,2778	84,372	83,6041
Temperatur	T	T <sub>3</sub>	°C	11	11	11
Densitet af vand ved T *	ρ <sub>w;t</sub>	ρ <sub>w;3</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0,9996	0,9996	0,9996
Jord - masse	W <sub>s</sub>	m <sub>4</sub>	g	3,9938	3,993	3,992
Jord - volumen	V <sub>s</sub>		cm <sup>3</sup>	1,41785217	1,45935747	1,41567216
Korndensitet	ρ <sub>s</sub>	ρ <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2,81679578	2,73613566	2,81986191
Resultat - middel	ρ <sub>s</sub>	ρ <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	<b>2,7909</b>		
Betegnelser fra	dgf15	DS				

\* [Se faneblad med vands densitet](#)

Dgf-bulletin 15:

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_3 - W_0}{\frac{W_2 - W_0}{\rho_{w,k}} - \frac{W_1 - W_3}{\rho_{w,t}}}$$

DS/CEN ISO/TS 17892-3:

$$\rho_s = \frac{m_4}{\frac{m_1 - m_0}{\rho_{w;1}} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{w;3}}}$$

Der bør ikke være stor forskel på temperaturen ved kalibrering og måling.

Der kan evt. foretages kalibrering ved flere temperaturer, eller udføres en teoretisk korrektion af volumen af pyknometer:

$$V_{pyk;test} = \frac{W_2 - W_0}{\rho_{w,k}} \alpha$$

$$\alpha = 1 + 3 \cdot 0.000003 (T - T_k)$$

$$V_{pyk;3} = \frac{m_1 - m_0}{\rho_{w;1}} \alpha$$

$$\alpha = 1 + 3 \cdot 0.000003 (T_1 - T_3)$$

C:\Users\Maja\Desktop\Bachelorprojekt - Mineaffald i beton\Resultater fra forsøg\Pyknometer \_ Zinkgruvan



Dato	04-04-2017
Navn	Maja
Projekt	
Prøvemateriale	Nussir

Metode:  
Efter Laboratoriehåndbogen, dgf-bulletin 15 (dgf15)  
Efter DS/CEN ISO/TS 17892-3

Resultat  
Beregning  
Input

### Bestemmelse af kornrumvægt Nussir

				1	2	3
<b>Fra kalibrering af pyknometer</b>						
Pyknometer nummer				19	11	14
Pykn. + prop (tomt)		m <sub>0</sub>	g	42,8721	48,0464	47,3907
Pykn. + prop (vandfyldt)	W <sub>2</sub>	m <sub>1</sub>	g	140,7496	150,313	149,4482
Temperatur ved kalibrering	T <sub>k</sub>	T <sub>1</sub>	°C	22	22	22
Densitet af vand ved T <sub>k</sub> *	ρ <sub>w,k</sub>	ρ <sub>w;1</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0,9978	0,9978	0,9978
<b>Måling</b>						
Pykn.+ prop + jord		m <sub>2</sub>	g	46,8721	52,0513	51,3896
Pykn.+ prop + jord + vand	W <sub>1</sub>	m <sub>3</sub>	g	143,2652	152,8186	151,9317
Temperatur	T	T <sub>3</sub>	°C	23	23	23
Densitet af vand ved T *	ρ <sub>w,t</sub>	ρ <sub>w;3</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0,9975	0,9975	0,9975
Jord - masse	W <sub>s</sub>	m <sub>4</sub>	g	4	4,0049	3,9989
Jord - volumen	V <sub>s</sub>		cm <sup>3</sup>	1,45861855	1,47223296	1,48843633
Korndensitet	ρ <sub>s</sub>	ρ <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2,7423208	2,7202896	2,68664498
Resultat - middel	ρ <sub>s</sub>	ρ <sub>s</sub>	g/cm <sup>3</sup>	<b>2,7164</b>		
Betegnelser fra	dgf15	DS				

\* Se faneblad med vands densitet

Dgf-bulletin 15:

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_3 - W_0}{\frac{W_2 - W_0}{\rho_{w,k}} - \frac{W_1 - W_3}{\rho_{w,t}}}$$

DS/CEN ISO/TS 17892-3:

$$\rho_s = \frac{m_4}{\frac{m_1 - m_0}{\rho_{w;1}} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{w;3}}}$$

Der bør ikke være stor forskel på temperaturen ved kalibrering og måling.

Der kan evt. foretages kalibrering ved flere temperaturer, eller udføres en teoretisk korrektion af volumen af pyknometer:

$$V_{pyk;test} = \frac{W_2 - W_0}{\rho_{w,k}} \alpha$$

$$\alpha = 1 + 3 \cdot 0.000003 (T - T_k)$$

$$V_{pyk;3} = \frac{m_1 - m_0}{\rho_{w;1}} \alpha$$

$$\alpha = 1 + 3 \cdot 0.000003 (T_1 - T_3)$$

C:\Users\Maja\Desktop\Bachelorprojekt - Mineaffald i beton\Resultater fra forsøg\Pyknometer \_ Nussir

## B.9 Data for kornstørrelser

1 af 4

Forsøgsdatoer	Sand	02-02-2017
	Cement	02-02-2017
	Zinkgruvan	02-02-2017
	Nussir	02-02-2017

Zinkgruvan				Cement			
Maskevidde	Volume	Akkumuleret		Maskevidde	Volume	Akkumuleret	
[ $\mu\text{m}$ ]	[%]	[%]		[ $\mu\text{m}$ ]	[%]	[%]	
0,55	0	0	0	0,55	0,08	0,08	0,08
0,631	0	0	0	0,631	0,19	0,27	0,27
0,724	0	0	0	0,724	0,35	0,62	0,62
0,832	0	0	0	0,832	0,53	1,15	1,15
0,955	0	0	0	0,955	0,74	1,89	1,89
1,096	0	0	0	1,096	0,97	2,86	2,86
1,259	0	0	0	1,259	1,21	4,07	4,07
1,445	0	0	0	1,445	1,47	5,54	5,54
1,66	0	0	0	1,66	1,72	7,26	7,26
1,905	0	0	0	1,905	1,97	9,23	9,23
2,188	0	0	0	2,188	2,21	11,44	11,44
2,512	0	0	0	2,512	2,42	13,86	13,86
2,884	0,06	0,06	0,06	2,884	2,62	16,48	16,48
3,311	0,09	0,15	0,15	3,311	2,79	19,27	19,27
3,802	0,11	0,26	0,26	3,802	2,92	22,19	22,19
4,365	0,12	0,38	0,38	4,365	3,03	25,22	25,22
5,012	0,13	0,51	0,51	5,012	3,11	28,33	28,33
5,754	0,14	0,65	0,65	5,754	3,16	31,49	31,49
6,607	0,15	0,8	0,8	6,607	3,21	34,7	34,7
7,586	0,16	0,96	0,96	7,586	3,26	37,96	37,96
8,71	0,18	1,14	1,14	8,71	3,32	41,28	41,28
10	0,21	1,35	1,35	10	3,42	44,7	44,7
11,482	0,24	1,59	1,59	11,482	3,56	48,26	48,26
13,183	0,28	1,87	1,87	13,183	3,75	52,01	52,01
15,136	0,32	2,19	2,19	15,136	3,98	55,99	55,99
17,378	0,36	2,55	2,55	17,378	4,22	60,21	60,21
19,953	0,4	2,95	2,95	19,953	4,43	64,64	64,64
22,909	0,44	3,39	3,39	22,909	4,58	69,22	69,22
26,303	0,46	3,85	3,85	26,303	4,62	73,84	73,84
30,2	0,47	4,32	4,32	30,2	4,51	78,35	78,35
34,674	0,47	4,79	4,79	34,674	4,24	82,59	82,59
39,811	0,48	5,27	5,27	39,811	3,82	86,41	86,41
45,709	0,51	5,78	5,78	45,709	3,28	89,69	89,69
52,481	0,62	6,4	6,4	52,481	2,67	92,36	92,36
60,256	0,83	7,23	7,23	60,256	2,05	94,41	94,41
69,183	1,19	8,42	8,42	69,183	1,49	95,9	95,9
79,433	1,74	10,16	10,16	79,433	1,01	96,91	96,91
91,201	2,49	12,65	12,65	91,201	0,65	97,56	97,56
104,713	3,43	16,08	16,08	104,713	0,4	97,96	97,96

120,226	4,53	20,61	120,226	0,27	98,23
138,038	5,68	26,29	138,038	0,21	98,44
158,489	6,81	33,1	158,489	0,21	98,65
181,97	7,77	40,87	181,97	0,23	98,88
208,93	8,45	49,32	208,93	0,25	99,13
239,883	8,74	58,06	239,883	0,26	99,39
275,423	8,6	66,66	275,423	0,24	99,63
316,228	8,02	74,68	316,228	0,21	99,84
363,078	7,07	81,75	363,078	0,13	99,97
416,869	5,87	87,62	416,869	0,03	100
478,63	4,54	92,16	478,63	0	100
549,541	3,27	95,43	549,541	0	100
630,957	2,14	97,57	630,957	0	100
724,436	1,26	98,83	724,436	0	100
831,764	0,63	99,46	831,764	0	100
954,993	0,25	99,71	954,993	0	100
1096,478	0,1	99,81	1096,478	0	100
1258,925	0,08	99,89	1258,925	0	100
1445,44	0,06	99,95	1445,44	0	100
1659,587	0,05	100	1659,587	0	100
1905,461	0,03	100,03	1905,461	0	100
2187,762	0,01	100,04	2187,762	0	100
2511,886	0	100,04	2511,886	0	100

Sand			Nussir		
Maskevidde [ $\mu\text{m}$ ]	Volume [%]	Akkumuleret [%]	Maskevidde [ $\mu\text{m}$ ]	Volume [%]	Akkumuleret [%]
0,55	0,03	0,03	0,55	0	0
0,631	0,05	0,08	0,631	0	0
0,724	0,05	0,13	0,724	0,03	0,03
0,832	0,05	0,18	0,832	0,09	0,12
0,955	0,05	0,23	0,955	0,16	0,28
1,096	0,05	0,28	1,096	0,22	0,5
1,259	0,05	0,33	1,259	0,3	0,8
1,445	0,06	0,39	1,445	0,4	1,2
1,66	0,08	0,47	1,66	0,5	1,7
1,905	0,09	0,56	1,905	0,62	2,32
2,188	0,11	0,67	2,188	0,76	3,08
2,512	0,13	0,8	2,512	0,92	4
2,884	0,14	0,94	2,884	1,09	5,09
3,311	0,16	1,1	3,311	1,28	6,37
3,802	0,17	1,27	3,802	1,48	7,85
4,365	0,18	1,45	4,365	1,69	9,54
5,012	0,19	1,64	5,012	1,89	11,43
5,754	0,2	1,84	5,754	2,08	13,51
6,607	0,2	2,04	6,607	2,25	15,76
7,586	0,2	2,24	7,586	2,39	18,15
8,71	0,19	2,43	8,71	2,49	20,64
10	0,19	2,62	10	2,55	23,19
11,482	0,18	2,8	11,482	2,58	25,77
13,183	0,18	2,98	13,183	2,58	28,35
15,136	0,18	3,16	15,136	2,57	30,92
17,378	0,19	3,35	17,378	2,58	33,5
19,953	0,19	3,54	19,953	2,62	36,12
22,909	0,2	3,74	22,909	2,72	38,84
26,303	0,21	3,95	26,303	2,9	41,74
30,2	0,2	4,15	30,2	3,17	44,91
34,674	0,19	4,34	34,674	3,53	48,44
39,811	0,17	4,51	39,811	3,95	52,39
45,709	0,15	4,66	45,709	4,4	56,79
52,481	0,17	4,83	52,481	4,81	61,6
60,256	0,25	5,08	60,256	5,12	66,72
69,183	0,43	5,51	69,183	5,28	72
79,433	0,76	6,27	79,433	5,24	77,24
91,201	1,27	7,54	91,201	4,99	82,23
104,713	1,97	9,51	104,713	4,52	86,75
120,226	2,83	12,34	120,226	3,91	90,66
138,038	3,82	16,16	138,038	3,18	93,84
158,489	4,81	20,97	158,489	2,43	96,27
181,97	5,74	26,71	181,97	1,72	97,99
208,93	6,47	33,18	208,93	1,11	99,1
239,883	6,95	40,13	239,883	0,61	99,71

275,423	7,11	47,24	275,423	0,26	99,97
316,228	6,98	54,22	316,228	0,01	99,98
363,078	6,61	60,83	363,078	0	99,98
416,869	6,08	66,91	416,869	0	99,98
478,63	5,51	72,42	478,63	0	99,98
549,541	4,95	77,37	549,541	0	99,98
630,957	4,46	81,83	630,957	0	99,98
724,436	4,02	85,85	724,436	0	99,98
831,764	3,61	89,46	831,764	0	99,98
954,993	3,17	92,63	954,993	0	99,98
1096,478	2,68	95,31	1096,478	0	99,98
1258,925	2,13	97,44	1258,925	0	99,98
1445,44	1,53	98,97	1445,44	0	99,98
1659,587	0,85	99,82	1659,587	0	99,98
1905,461	0,2	100,02	1905,461	0	99,98
2187,762	0	100,02	2187,762	0	99,98
2511,886	0	100,02	2511,886	0	99,98

## B.10 Blandingsrecepter for mørtler i indledende forsøg

1 af 1

Forsøgsdatoer	REF	23-02-2017
	5% ZG	16-03-2017
	10% ZG, 5% NU, 10% NU	
	7 døgn	28-03-2017
	14 døgn	11-04-2017
	28 døgn	21-03-2017
	Porøsitet	09-03-2017

### R1-A

Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Porøsitet	Vicat	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	1347,69	1350,34	1350,22	1350,40	1350,18	1350,25	1350,24
Basis cement [g]	450,08	450,30	450,04	450,21	450,11	450,68	450,14
Destilleret vand [g]	225,07	224,83	225,35	225,17	225,87	225,08	225,73

### R2-A

Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Porøsitet	Vicat	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	1350,16	1350,13	1350,07	-	-	1350,19	1350,08
Basis cement [g]	450,17	450,08	450,12	-	-	450,10	450,17
Destilleret vand [g]	224,91	225,34	225,08	-	-	224,66	224,96

### Z-B.1

Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Porøsitet	Vicat	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	1350,08	1350,15	1350,09	1350,26	1350,09	1350,40	1350,37
Basis cement [g]	427,31	427,47	427,57	427,52	427,58	427,53	427,50
Destilleret vand [g]	22,85	22,49	22,54	225,15	22,55	22,62	22,53
Tailing [g]	225,21	225,24	225,09	22,55	225,44	225,13	225,59

### Z-B.2

Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Porøsitet	Vicat	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	1350,24	1350,01	1350,06	1350,00	1350,24	1350,06	1350,06
Basis cement [g]	405,06	405,17	404,99	405,11	405,15	405,15	405,05
Destilleret vand [g]	45,01	225,07	45,08	224,95	45,14	45,08	45,01
Tailing [g]	225,45	45,03	224,98	45,04	225,19	224,96	225,00

### N-B.1

Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Porøsitet	Vicat	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	1350,12	1350,35	1350,11	1350,11	1350,16	1350,10	1350,03
Basis cement [g]	427,57	427,56	427,63	427,67	427,60	427,60	427,51
Destilleret vand [g]	22,52	225,36	22,54	225,19	22,58	22,51	22,55
Tailing [g]	225,41	22,53	225,27	22,52	225,13	225,26	225,06

### N-B.2

Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Porøsitet	Vicat	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	1350,08	1350,16	1350,27	1350,11	1350,33	1350,19	1350,38
Basis cement [g]	405,01	405,05	405,01	404,99	405,03	404,96	405,12
Destilleret vand [g]	44,99	225,10	45,00	225,09	225,40	45,00	45,00
Tailing [g]	224,97	45,01	225,27	45,00	45,00	225,05	224,96

## B.11 Blandingsrecepter for mørtler med $v/c=0,5$

1 af 1

### Z-C.1

Blanding	7 dage	14 dage	28 dage	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	1350,18	1350,13	1350,14	1350,2	1350,1
Basis cement [g]	427,46	427,48	427,53	427,61	427,55
Destilleret vand [g]	213,94	214,06	213,74	213,72	213,75
Tailing [g]	22,57	22,73	22,58	22,6	22,53

### Z-C.2

Blanding	7 dage	14 dage	28 dage	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	-	-	-	1350,24	-
Basis cement [g]	-	-	-	404,99	-
Destilleret vand [g]	-	-	-	202,69	-
Tailing [g]	-	-	-	45,02	-

### N-C.1

Blanding	7 dage	14 dage	28 dage	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	1350,17	1350,02	1350,11	1350,59	-
Basis cement [g]	427,43	427,46	427,55	427,49	-
Destilleret vand [g]	213,51	213,89	213,66	214,01	-
Tailing [g]	22,48	22,56	22,51	22,52	-

### N-C.2

Blanding	7 dage	14 dage	28 dage	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2
Søsand 0-4mm [g]	-	-	-	1350,05	-
Basis cement [g]	-	-	-	405,18	-
Destilleret vand [g]	-	-	-	202,63	-
Tailing [g]	-	-	-	45,03	-

## B.12 Blandingsrecepter for mørtler med optimeret flydesætmål

1 af 1

<b>Z-D.1</b>						
Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2	Flydesætmål 3
Søsand 0-4mm [g]	1350,01	1350,10	1350,15	1350,15	1350,31	1350,07
Basis cement [g]	427,51	427,46	427,49	427,60	427,52	427,43
Destilleret vand [g]	237,51	237,31	237,28	215,16	220,40	230,20
Tailing [g]	22,57	22,53	22,55	22,70	22,52	22,53
<b>Z-D.2</b>						
Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2	Flydesætmål 3
Søsand 0-4mm [g]	1350,01	1349,98	1349,96	1350,00	1349,99	1350,42
Basis cement [g]	405,06	405,10	405,01	405,13	404,97	404,98
Destilleret vand [g]	238,07	238,37	238,34	215,03	230,46	240,55
Tailing [g]		45,08	45,07	45,17	45,09	45,19
<b>N-D.3</b>						
Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2	Flydesætmål 3
Søsand 0-4mm [g]	1350,13	1350,08	1349,98	1350,06	1350,09	1350,10
Basis cement [g]	427,54	427,56	427,49	427,55	427,55	427,60
Destilleret vand [g]	221,49	221,42	221,59	210,11	219,93	230,13
Tailing [g]	22,55	22,60	22,54	22,51	22,49	22,53
<b>N-D.4</b>						
Blanding	7 døgn	14 døgn	28 døgn	Flydesætmål 1	Flydesætmål 2	Flydesætmål 3
Søsand 0-4mm [g]	1350,08	1350,31	1350,03	1350,19	1350,16	1350,44
Basis cement [g]	405,10	405,06	404,94	405,14	405,01	404,99
Destilleret vand [g]	218,90	218,83	218,94	210,15	220,11	230,12
Tailing [g]	44,98	45,08	45,03	45,00	45,01	45,00



## B.13 Data for indledende mørtlers bearbejdelighed

1 af 1

Forsøgsdatoer	REF 1	23-02-2017
	REF 2	18-04-2017
	5% ZG	16-03-2017
	10% ZG	30-03-2017
	5% NU	30-03-2017
	10% NU	30-03-2017

<b>Flydesætmål</b>	<b>R1-A</b>	<b>R2-A</b>	<b>Z-B.1</b>	<b>Z-B.2</b>	<b>N-B.1</b>	<b>N-B.2</b>
F1.1 [mm]	118,00	113,00	113,50	117,00	133,00	124,00
F1.2 [mm]	117,00	112,00	115,00	116,00	134,50	129,00
F2.1 [mm]	112,00	111,00	111,00	118,00	127,00	113,00
F2.2 [mm]	118,00	111,00	115,50	123,50	133,00	117,00
Gennemsnit	116,25	111,75	113,75	118,63	131,88	120,75
Standardafvigelse	2,87	0,96	2,02	3,35	3,33	7,14

## B.14 Data for mørtlers bearbejdelighed med $v/c=0,5$

1 af 1

<b>Flydesætmål</b>	<b>R2-A</b>	<b>Z-C.1</b>	<b>Z-C.2</b>	<b>N-C.1</b>	<b>N-C.2</b>
F1.1 [mm]	113,00	104,00	101,00	100,00	100,00
F1.2 [mm]	112,00	101,00	101,00	101,00	100,00
F2.1 [mm]	111,00	104,00	101,00	99,00	101,00
F2.2 [mm]	111,00	103,00	100,00	100,00	101,00
Gennemsnit	111,75	103,00	100,75	100,00	100,50
Standardafvigelse	0,96	1,41	0,50	0,82	0,58

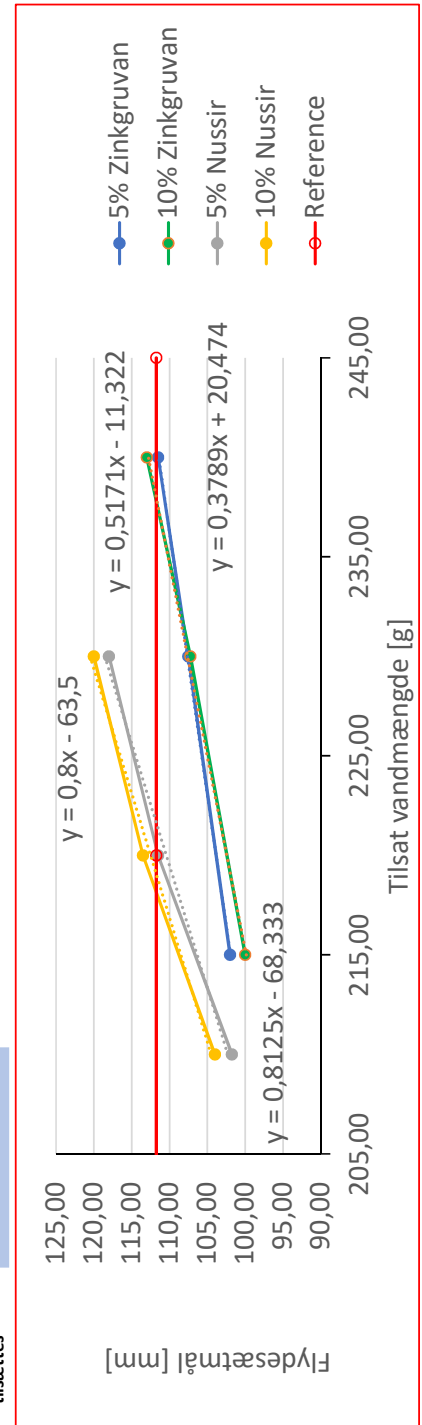
## B.15 Data for mørtlers bearbejdelighed med optimeret flydesætmål

1 af 2

R2-A				Z-D.1			
	Vandmængde [g]	Flydesætmål [mm]	Gennemsnit	Vandmængde [g]	Flydesætmål [mm]	Gennemsnit	
Prøve 1	225,00	111,00	111,75	215,00	104,00	102,00	
Prøve 2	200,00	-	-	230,00	107,00	107,50	
Prøve 3	250,00	-	-	240,00	112,00	111,50	
Mængde vand som tilsættes				<b>237,27</b>	111,75		

Z-D.2				Z-D.3			
	Vandmængde [g]	Flydesætmål [mm]	Gennemsnit	Vandmængde [g]	Flydesætmål [mm]	Gennemsnit	
Prøve 1	215,00	99,50	100,50	210,00	101,00	101,75	
Prøve 2	230,00	107,50	107,25	220,00	111,00	111,50	
Prøve 3	240,00	113,50	113,00	230,00	118,50	118,00	
Mængde vand som tilsættes	<b>238,00</b>	111,75		<b>221,64</b>	111,75		

Z-D.4			
	Vandmængde [g]	Flydesætmål [mm]	Gennemsnit
Prøve 1	210,00	104,50	104,00
Prøve 2	220,00	114,00	113,50
Prøve 3	230,00	120,00	120,00
Mængde vand som tilsættes	<b>219,06</b>	111,75	





## B.16 Data for afbindingsforløb for mørtler i indledende forsøg

1 af 4

Reference		5% Zinkgruvan		10% Zinkgruvan	
tid [min]	dybde [mm]	tid [min]	dybde [mm]	tid [min]	dybde [mm]
0	0	0	0	0	0
10	0	10	0,1	10	0
20	0,1	20	0	20	0
30	0	30	0	30	0
40	0	40	0	40	0
50	0	50	0	50	0
60	0	60	0	60	0
70	0,2	70	0	70	0
80	0	80	0	80	0
90	0	90	0	90	0
100	0	100	0	100	0
110	0,1	110	0	110	0
120	0	120	0	120	5,4
130	0,1	130	0	130	1,6
140	0	140	0	140	0
150	0	150	0	150	1,4
160	0,02	160	0,1	160	0,4
170	13,4	170	0,1	170	4,9
180	9,9	180	4,5	180	2,8
190	19,7	190	29,5	190	29,3
200	15,9	200	31,2	200	25,5
210	22,1	210	30,1	210	27,9
220	30,5	220	34,5	220	25,2
230	28,3	230	34,6	230	33,4
240	31,2	240	36	240	34,8
250	32,7	250	37	250	31,9
260	31,9	260	36,2	260	36,8
270	34,3	270	39,3	270	35,9
280	35,8	280	40,3	280	38,2
290	36,2	290	40,4	290	36,6
300	35	300	39,6	300	40,1
310	36,1	310	40,6	310	37,8
320	36,2	320	40,4	320	39,8
330	36,7	330	40,8	330	40,2
340	36,3	340	40,5	340	40,2
350	36,6	350	39,8	350	40,2
360	36,6	360	40,1	360	40,1
370	36,6	370	40,7	370	40,2
380	36,8	380	40,1	380	40,3
390	38,1	390	40,4	390	39,6
400	37,9	400	41,1	400	40,3
410	37,9	410	40,8	410	40,4
420	37,6	420	40,4	420	40,3

430	37,6	430	40,7	430	39,9
440	37,4	440	40,7	440	39,8
450	37,8	450	40,5	450	40,2
460	37,4	460	40,3	460	40,5
470	37,4	470	40,4	470	40
480	37,3	480	40,1	480	40,1
490	36,7	490	39,7	490	40,3
500	38,2	500	40,4	500	40,1
510	38,4	510	41,1	510	40,3
520	38,6	520	40,5	520	40,2
530	38,1	530	40,4	530	40,3
540	38,3	540	40,4	540	40,6
550	37,9	550	40,8	550	40,3
560	37,6	560	40,4	560	40,2
570	37,4	570	40,1	570	40,4
580	37,6	580	40,1	580	40,5
590	38,2	590	40,1	590	41
600	38,5	600	40,1	600	40,7
610	38,8	610	40,9	610	40,5
620	38,6	620	40,9	620	40,5
630	38,1	630	40,3	630	40,5
640	38,1	640	40,3	640	40,5
650	37,9	650	40,5	650	40,2
660	37,8	660	40,5	660	40,4
670	38,3	670	40,4	670	40,8
680	38,4	680	40,4	680	41,1
690	38,9	690	40,8	690	40,4
700	38,9	700	40,8	700	40,6
710	38,6	710	40,4	710	40,6
720	38,4	720	40,4	720	40,8
730	38,5	730	40,3	730	40,6
740	38,2	740	40,3	740	40,4
750	38,3	750	40,2	750	41
760	38,9	760	40,4	760	40,8
770	38,9	770	40,3	770	40,7
780	38,6	780	40,7	780	40,6
790	38,3	790	40,5	790	40,4
800	38,7	800	40,3	800	40,6
810	38,2	810	40,7	810	41,2
820	38,8	820	40,8	820	40,6
830	38,7	830	40,4	830	40,6
840	38,7	840	40,3	840	40,8
850	38,6	850	40,5	850	40,6

5% Nussir		10% Nussir	
tid [min]	dybde [mm]	tid [min]	dybde [mm]
0	0	0	0
10	0	10	0
20	0	20	0
30	0	30	0
40	0	40	0
50	0	50	0
60	0	60	0
70	0	70	0
80	0	80	0
90	0	90	0
100	9,6	100	0
110	0	110	0
120	0	120	0
130	0,1	130	0,1
140	0	140	1,2
150	20,7	150	1,1
160	24,3	160	11
170	12,7	170	9,9
180	26,4	180	18,1
190	27,1	190	32,2
200	30,6	200	29,8
210	30,9	210	31,5
220	29,6	220	35,4
230	28,7	230	34,7
240	34,6	240	37,1
250	35,6	250	37,7
260	36,9	260	38,5
270	39,3	270	39,9
280	40,4	280	39,7
290	41,8	290	38,8
300	41,4	300	41,3
310	41,4	310	41
320	41,3	320	41,4
330	41,6	330	40,8
340	40,9	340	40,8
350	40,7	350	40,1
360	39,9	360	40,2
370	39,8	370	40,6
380	40,2	380	40,2
390	40,9	390	40,9
400	41	400	41
410	41,5	410	40,6
420	41,6	420	41,1

430	41,8	430	41,4
440	41,6	440	41,6
450	42	450	41,4
460	41,3	460	40,8
470	40,3	470	40,6
480	39,6	480	40,8
490	39,9	490	40,8
500	40,6	500	40,1
510	41,2	510	40,9
520	42,3	520	41
530	41,9	530	40,9
540	41,2	540	41,6
550	41,8	550	41,6
560	41,2	560	40,8
570	41,2	570	40,6
580	40,7	580	40,8
590	40,8	590	40,8
600	40,9	600	40,7
610	41,4	610	41
620	41,4	620	40,8
630	41,7	630	41,4
640	41,4	640	41,7
650	40,9	650	40,8
660	40,9	660	40,2
670	40,3	670	41
680	40,8	680	40,8
690	40,8	690	41,3
700	41,5	700	40,7
710	42	710	41,4
720	41,8	720	41,4
730	40,9	730	41,2
740	40,7	740	40,5
750	40,4	750	40,7
760	41,4	760	41,4
770	41,3	770	40,9
780	41,4	780	41,1
790	40,9	790	41,3
800	40,7	800	40,6
810	40,9	810	41
820	41,2	820	41,2
830	41,4	830	41,4
840	41,6	840	40,9
850	40,9	850	41,2



## B.17 Data for tryktest for indledende mørtelprøver

1 af 6

### REFERENCE PRØVE 1

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryk T1		Tryk T2 [MPa]	Trykstyrke 1 [MPa]		Trykstyrke 2 [MPa]	
									[kN]	[MPa]		[kN]	[MPa]	1. average	2. average
A	39	39	40	40	160	531,25	2128,405449	43	27,5641	49	31,41026				
	39	40	40	40	160										
	40	40	40	40	160										
B	40	40	40	40	160	559,31	2184,804688	39	24,375	48	30				
	40	40	40	40	160										
	40	40	40	40	160										
C	39,5	39,16667	40	40	160,5	547,03	2178,896007	52	33,19149	57	36,38298	1. average	2. average	30,541462	
	39	40	40	40	160							-10%	Stand. Dev.	27,439	2,3759419
	41	41	40	40	160							10%		33,536	
A	41	41	40	40	160	578,28	2203,810976	47	28,65854	60	36,58537				
	41	41	40	40	160										
	41	41	40	40	160										
B	41	41	40	40	160,5	571,66	2171,795456	50	30,4878	64	39,02439				
	41	41	40	40	160,5										
	41	41	40	40	160,5										
C	41	40,83333	40	40	160,5	567,4	2167,786303	61	37,34694	60	36,73469	1. average	2. average	34,806	36,889
	40,5	41	40	40	160							-10%	Stand. Dev.	31,326	4,1850999
	41	41	40	40	160							10%		38,287	
A	41	41	40	40	160	572,54	2181,935976	66	40,2439	71	43,29268				
	41	41	40	40	160										
	41	41	40	40	160										
B	40,5	40,66667	40	40	161	568,68	2178,182932	70	43,03279	73	44,87705				
	40,5	41	40	40	160										
	41	41	40	40	160,5										
C	41	41	40	40	160,5	576,73	2191,056911	73	44,5122	73	44,5122	1. average	2. average	43,412	43,411802
	41	41	40	40	160,5							-10%	Stand. Dev.	39,071	1,7182613
	41	41	40	40	160,5							10%		47,753	



## 5% Zinkgruvan

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryk T1		Tryk T2		Trykstyrke 1		Trykstyrke 2	
									[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
A	41		40		161		564,16	2143,302181	46	28,04878	47	28,65854				
	41	41	40	40	160	160,5										
	41		40													
B	40,5	40,33333	40	40	161	160,5	554,82	2142,658531	42	26,03306	52	32,2314				
	40,5		40													
7 døgn	41,5		40	40	160	160	557,69	2116,73836	42	25,50607	42	25,50607			1. average	26,750504
	41	41,16667	40	40	160	160									-10%	1,4948292
	41		40												10%	30,43
A	41		40	40	160	160	555,3	2151,213843	53	32,85124	60	37,19008				
	40	40,33333	40	40	160	160										
	40		40													
14 døgn	41		40	40	160	160,25	565,93	2179,965717	52	32,09877	49	30,24691				
	40,5	40,5	40	40	160,5	160,25										
	40		40													
C	40		40	40	160	160	565,04	2167,617196	51	31,35246	51	31,35246			1. average	31,580367
	41	40,66667	40	40	160,5	160,25									-10%	0,9702882
	41		40												10%	35,767
A	41		40	40	160	160	552,3	2130,787037	59	36,41975	62	38,2716				
	40	40,5	40	40	160	160										
	40,5		40													
28 døgn	40		40	40	160	160	550,38	2132,153926	50	30,99174	36	22,31405				
	40,5	40,33333	40	40	160	160										
	40,5		40													
C	40,5	40,33333	40	40	160	160	553,06	2142,536157	59	36,57025	57	35,33058			1. average	34,828079
	40,5		40	40	160	160									-10%	5,9208965
	40		40												10%	36,648

## 10% Zinkgruvan

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Tryk T1		Tryk T2		Trykstyrke 1		Trykstyrke 2		
									[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]
A	40		40		160												
	40	40,16667	40	40	160	563,79	2193,166494	54	33,60996	55	34,23237						
	40,5		40														
B	40		40		160												
	40	40,16667	40	40	160	559,96	2178,267635	54	33,60996	53	32,98755						
	40,5		40														
C	40		40		160												
	40	40	40	40	160	561,6	2193,75	54	33,75	54	33,75						
	40		40														
A	40		40		160												
	40,5	40,33333	40	40	160	566,36	2194,059917	56	34,71074	54	33,47107						
	40,5		40														
B	40,5		40		160												
	40,5	40,5	40	40	160	569,46	2196,990741	59	36,41975	60	37,03704						
	40,5		40														
C	40,5		40		160												
	40,5	40,5	40	40	160	565,43	2181,442901	55	33,95062	55	33,95062						
	40,5		40														
A	40,5		40		160,5												
	40,5	40,5	40	40	160	558,94	2153,040196	52	32,09877	63	38,88889						
	40,5		40														
B	41		40		160												
	41	41	40	40	160	566,49	2158,879573	63	38,41463	67	40,85366						
	41		40														
C	41		40		160												
	41	41	40	40	160	560,75	2137,004573	62	37,80488	59	35,97561						
	41		40														

## 5% Nussir

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryk T1		Tryk T2	Trykstyrke 1		Trykstyrke 2		
									[kN]	[MPa]		[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]
A	40		40		160											
	40	40	40	40	160	160	562,31	2196,523438	60	37,5	57	35,625				
	40		40													
B	40,5		40		160											
	40,5	40,33333	40	40	160	160	562,78	2180,191116	59	36,57025	64	39,66942				
	40		40													
C	40		40		160											
	40	40	40	40	160	160	561,06	2191,640625	60	37,5	63	39,375	1. average 37,707	2. average 37,573605	-10% 33,936	Stand. Dev. 1,6533142
	40		40										10% 41,477			
A	40,5		40		160,5											
	40,5	40,5	40	40	160	160,25	571,21	2200,304308	70	43,20988	70	43,20988				
	40,5		40													
B	40		40		160											
	40,5	40,33333	40	40	160	160	571,55	2214,165806	72	44,6281	72	44,6281				
	40,5		40													
C	40		40		160											
	40,5	40,5	40	40	160	160	571,92	2206,481481	67	41,35802	70	43,20988	1. average 43,374	2. average 43,345683	-10% 39,037	Stand. Dev. 1,2075177
	41		40										10% 47,711			
A	40		40		160											
	40	40	40	40	160	160	552,7	2158,984375	69	43,125	69	43,125				
	40		40													
B	40		40		160											
	40,5	40,33333	40	40	160	160	562,54	2179,261364	72	44,6281	70	43,38843				
	40,5		40													
C	40,5		40		160											
	40,5	40,5	40	40	160	160	558,4	2154,320988	63	38,88889	67	41,35802	1. average 42,419	2. average 42,418907	-10% 38,177	Stand. Dev. 2,0201058
	40,5		40										10% 46,661			



## B.18 Data for tryktest for mørtelprøver med $v/c=0,5$

1 af 2

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Tryk T1 [kN]	Tryk T2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]		Trykstyrke 2 [MPa]		
											1. average	2. average	1. average	2. average	
A	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	553,99	2155,04	53,00	52,00	32,37				
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00									
	40,50		40,00												
B	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	558,51	2172,63	57,00	57,00	35,48				
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00									
	40,50		40,00												
C	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	554,98	2158,90	53,00	50,00	31,12				
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00									
	40,50		40,00												
A	41,00	41,00	40,00	40,00	160,00	160,00	578,12	2203,20	64,00	66,00	40,24				
	41,00	41,00	40,00	40,00	160,00	160,00									
	41,00	41,00	40,00	40,00	160,00	160,00									
B	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00	573,81	2213,77	67,00	66,00	40,74				
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00									
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00									
C	40,50	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	570,88	2193,44	48,00	61,00	37,50				
	40,50	40,67	40,00	40,00	160,00	160,00									
	41,00		40,00												
A	38,00	39,67	40,00	40,00	160,00	160,00	539,66	2125,76	48,00	57,00	35,92				
	41,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00									
	41,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00									
B	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	522,26	2006,63	26,00	39,00	23,98				
	41,00	40,67	40,00	40,00	160,00	160,00									
	41,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00									
C	40,00	39,67	40,00	40,00	160,00	160,00	522,95	2059,94	35,00	35,00	22,06				
	40,00	39,67	40,00	40,00	160,00	160,00									
	39,00		40,00												
7 døgn												33,40	33,40	33,40	33,40
14 døgn												-0,10	0,10	38,06	39,77
28 døgn												0,10	0,10	34,26	1,53
7 døgn												0,10	0,10	41,87	25,04
14 døgn												0,10	0,10	22,54	7,02
28 døgn												0,10	0,10	27,55	

## 5% Nussir

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryk T1 [kN]	Tryk T2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]
A	41,00		40,00		160,00		561,15	2173,88	57,00	59,00	36,57	
	40,00	40,33	40,00	40,00	160,00	160,00			35,33			
	40,00		40,00									
B	40,00		40,00		160,00		558,90	2183,20	57,00	56,00	35,00	
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00			35,63			
	40,00		40,00									
C	40,50		40,00		160,00		556,96	2166,60	50,00	54,00	33,61	34,54
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00			31,12			2. average
	40,00		40,00						0,10			Stand. Dev.
A	40,50		40,00		160,00		572,64	2200,20	68,00	68,00	41,80	
	41,00	40,67	40,00	40,00	160,00	160,00			41,80			
	40,50		40,00									
B	40,50		40,00		160,00		568,14	2182,91	67,00	65,00	39,96	
	41,00	40,67	40,00	40,00	160,00	160,00			41,19			
	40,50		40,00									
C	40,50		40,00		160,00		566,00	2183,64	61,00	51,00	31,48	38,98
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00			37,65			2. average
	40,50		40,00						0,10			Stand. Dev.
A	40,00		40,00		160,00		544,91	2128,55	54,00	44,00	27,50	
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00			33,75			
	40,00		40,00									
B	38,00		40,00		160,00		538,49	2157,41	64,00	54,00	34,62	
	39,00	39,00	40,00	40,00	160,00	160,00			41,03			
	40,00		40,00									
C	40,00		40,00		160,00		550,62	2150,86	61,00	60,00	37,50	35,42
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00			38,13			2. average
	40,00		40,00						0,10			Stand. Dev.



## B.19 Data for tryktest for mørtelprøver med optimeret flydesæt mål

1 af 4

5% Zinkgruvan

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryk T1		Tryk T2 [MPa]	Trykstyrke 1 [MPa]		Trykstyrke 2 [MPa]		
									[kN]	[MPa]		[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]
A	41,00		40,00		160,00		562,55	2179,30	53,00	32,85	53,00	32,85				
	40,00	40,33	40,00	40,00	160,00	160,00					53,00					
	40,00		40,00													
B	40,00		40,00		160,00		562,13	2214,27	56,00	35,29	54,00	34,03				
	40,00	39,67	40,00	40,00	160,00	160,00					54,00					
	39,00		40,00													
C	41,00		40,00		160,00		564,96	2206,88	57,00	35,63	56,00	35,00				
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00					56,00					
	39,00		40,00													
A	40,00		40,00		160,00		562,48	2197,19	65,00	40,63	68,00	42,50				
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00					68,00					
	40,00		40,00													
B	40,50		40,00		160,00		560,97	2182,20	67,00	41,70	67,00	41,70				
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00					67,00					
	40,00		40,00													
C	40,00		40,00		160,00		563,69	2201,91	64,00	40,00	73,00	45,63				
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00					73,00					
	40,00		40,00													
A	41,00		40,00		160,00		553,03	2142,42	61,00	37,81	64,00	39,67				
	40,00	40,33	40,00	40,00	160,00	160,00					64,00					
	40,00		40,00													
B	41,00		40,00		160,00		549,99	2130,64	62,00	38,43	59,00	36,57				
	40,00	40,33	40,00	40,00	160,00	160,00					59,00					
	40,00		40,00													
C	40,50		40,00		160,00		555,34	2160,30	64,00	39,83	61,00	37,97				
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00					61,00					
	40,00		40,00													
												1. average		2. average		
												34,28		34,28		
												-0,10		Stand. Dev. 1,22		
												0,10		37,70		
												1. average		2. average		
												42,03		42,03		
												-0,10		Stand. Dev. 1,97		
												0,10		46,23		
												1. average		2. average		
												38,38		38,38		
												-0,10		Stand. Dev. 1,23		
												0,10		42,22		

## 10% Zinkgruvan

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryk T1 [kN]	Tryk T2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]
A	39,50		40,00		160,00							
	40,00	40,33	40,00	40,00	160,00	160,00	556,47	2155,75	48,00	48,00	29,75	29,75
	41,50		40,00									
B	40,50		40,00		160,00							
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00	554,38	2156,56	44,00	45,00	27,39	28,01
	40,00		40,00									
C	39,50		40,00		160,00							
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00	556,40	2164,42	46,00	43,00	28,63	26,76
	41,00		40,00									
A	40,00		40,00		160,00							
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	563,04	2199,38	66,00	65,00	41,25	40,63
	40,00		40,00									
B	40,00		40,00		160,00							
	40,50	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00	561,88	2185,74	60,00	61,00	37,34	37,97
	40,00		40,00									
C	40,00		40,00		160,00							
	40,50	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00	565,45	2199,62	63,00	64,00	39,21	39,83
	40,00		40,00									
A	40,00		40,00		160,00							
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00	555,39	2142,71	62,00	61,00	38,27	37,65
	41,00		40,00									
B	40,00		40,00		160,00							
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	552,22	2157,11	60,00	59,00	37,50	36,88
	40,00		40,00									
C	40,00		40,00		160,00							
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	550,86	2151,80	60,00	61,00	37,50	38,13
	40,00		40,00									
7 døgn												
1. average												
2. average												
Stand. Dev.												
0,10												
28,38												
25,54												
31,22												
1,23												
14 døgn												
1. average												
2. average												
Stand. Dev.												
0,10												
39,37												
35,43												
43,31												
1,51												
28 døgn												
1. average												
2. average												
Stand. Dev.												
0,10												
37,65												
33,89												
41,42												
0,50												

## 5% Nussir

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryk T1 [kN]	Tryk T2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]
A	40,00		40,00		160,00							
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	559,67	2177,14	49,00	56,00	30,50	34,85	
	40,50		40,00									
B	40,00		40,00		160,00							
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	564,81	2206,29	55,00	56,00	34,38	35,00	
	40,00		40,00									
C	40,00		40,00		160,00							
	40,50	40,33	40,00	40,00	160,00	566,91	2196,19	58,00	55,00	35,95	34,09	1. average 34,13 2. average 30,72 Stand. Dev. 0,71
	40,50		40,00									37,54
A	40,00		40,00		160,00							
	41,00	40,67	40,00	40,00	160,00	573,60	2203,89	71,00	74,00	43,65	45,49	
	41,00		40,00									
B	40,00		40,00		160,00							
	41,00	40,50	40,00	40,00	160,00	566,86	2186,96	65,00	68,00	40,12	41,98	
	40,50		40,00									
C	41,00		40,00		160,00							
	40,00	40,33	40,00	40,00	160,00	566,97	2196,42	70,00	70,00	43,39	43,39	1. average 43,00 2. average 38,70 Stand. Dev. 1,80
	40,00		40,00									47,30
A	40,50		40,00		160,00							
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	560,08	2160,80	70,00	68,00	43,21	41,98	
	40,50		40,00									
B	40,00		40,00		160,00							
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	559,09	2183,95	67,00	71,00	41,88	44,38	
	40,00		40,00									
C	40,00		40,00		160,00							
	40,50	40,33	40,00	40,00	160,00	563,31	2182,24	62,00	74,00	38,43	45,87	1. average 42,62 2. average 38,36 Stand. Dev. 2,55
	40,50		40,00									46,88

## 10% Nussir

Prøve	Bredde [mm]	Avg. [mm]	Højde [mm]	Avg. [mm]	Længde [mm]	Avg. [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryk T1 [kN]	Tryk T2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]
7 døgn	41,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	560,66	2154,18	45,00	46,00	27,66	28,28
	41,00	40,67	40,00	40,00	160,00	160,00	560,66	2154,18	45,00	46,00	27,66	28,28
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	560,66	2154,18	45,00	46,00	27,66	28,28
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	559,17	2166,21	47,00	46,00	29,13	28,51
	40,50	40,33	40,00	40,00	160,00	160,00	559,17	2166,21	47,00	46,00	29,13	28,51
	40,50	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	559,17	2166,21	47,00	46,00	29,13	28,51
14 døgn	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	559,03	2165,66	42,00	45,00	26,03	27,89
	40,50	40,33	40,00	40,00	160,00	160,00	559,03	2165,66	42,00	45,00	26,03	27,89
	40,50	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	559,03	2165,66	42,00	45,00	26,03	27,89
	41,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	569,25	2196,18	65,00	72,00	40,12	44,44
	40,00	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00	569,25	2196,18	65,00	72,00	40,12	44,44
	40,50	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	569,25	2196,18	65,00	72,00	40,12	44,44
28 døgn	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00	568,29	2192,48	69,00	64,00	42,59	39,51
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00	568,29	2192,48	69,00	64,00	42,59	39,51
	40,50	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	568,29	2192,48	69,00	64,00	42,59	39,51
	41,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	566,63	2186,07	66,00	66,00	40,74	40,74
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00	566,63	2186,07	66,00	66,00	40,74	40,74
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	566,63	2186,07	66,00	66,00	40,74	40,74
28 døgn	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	564,81	2197,13	68,00	67,00	42,32	41,70
	40,00	40,17	40,00	40,00	160,00	160,00	564,81	2197,13	68,00	67,00	42,32	41,70
	40,50	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	564,81	2197,13	68,00	67,00	42,32	41,70
	41,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	564,48	2177,78	65,00	63,00	40,12	38,89
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00	564,48	2177,78	65,00	63,00	40,12	38,89
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	564,48	2177,78	65,00	63,00	40,12	38,89
28 døgn	40,50	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	560,89	2163,93	66,00	62,00	40,74	38,27
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00	560,89	2163,93	66,00	62,00	40,74	38,27
	40,50	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	560,89	2163,93	66,00	62,00	40,74	38,27
	40,00	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	560,89	2163,93	66,00	62,00	40,74	38,27
	40,50	40,50	40,00	40,00	160,00	160,00	560,89	2163,93	66,00	62,00	40,74	38,27
	40,50	40,00	40,00	40,00	160,00	160,00	560,89	2163,93	66,00	62,00	40,74	38,27

## B.20 Data for porøsitet af mørtelprøver

Vandtemp [°C]	23
Vanddensitet [g/cm <sup>3</sup> ]	0,99757
Kontrollod	
Vægt før [g]	999.86
Vægt efter [g]	999.86

			Reference			
			A	B	C	
Masse efter tørring ved 105 grader	<b>m_105</b>	kg	529,87	521,18	534,77	528,61
Masse over vand efter vakuumvandmætning	<b>mssd</b>	kg	585,20	574,20	590,40	583,27
Masse under vand	<b>msw</b>	kg	321,40	316,40	324,20	320,67
Prøvelegemets volumen	<b>V</b>	m <sup>3</sup>	264,44	258,43	266,85	263,24
Volumen af åbne porer	<b>V_på</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	55,46	53,15	55,77	54,79
Åben porøsitet	<b>P_å</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,21	0,21	0,21	0,21
Tørdensitet	<b>ρ_d</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,00	2,02	2,00	2,01
Faststofdensitet	<b>ρ_f</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,54	2,54	2,53	2,54
Densitet i overfladetør tilstand	<b>ρ_ssd</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,21	2,22	2,21	2,22
Vandtørstofsforhold i overfaldetør tilstand	<b>u_ssd</b>	kg/kg	0,10	0,10	0,10	0,10

			Zinkgruvan 5%			
			A	B	C	
Masse efter tørring ved 105 grader	<b>m_105</b>	kg	519,08	518,08	515,51	517,56
Masse over vand efter vakuumvadmætning	<b>mssd</b>	kg	572,80	571,90	571,80	572,17
Masse under vand	<b>msw</b>	kg	316,10	315,50	314,10	315,23
Prøvelegemets volumen	<b>v</b>	m <sup>3</sup>	257,33	257,02	258,33	257,56
Volumen af åbne porer	<b>V_på</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	53,85	53,95	56,43	54,74
Åben porøsitet	<b>P_å</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,21	0,21	0,22	0,21
Tørdensitet	<b>p_d</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,02	2,02	2,00	2,01
Faststofsdensitet	<b>p_f</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,55	2,55	2,55	2,55
Densitet i overfladetør tilstand	<b>p_ssd</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,23	2,23	2,21	2,22
Vandtørstofsforhold i overfaldetør tilstand	<b>u_ssd</b>	kg/kg	0,10	0,10	0,11	0,11

			Zinkgruvan 10%			
			A	B	C	
Masse efter tørring ved 105 grader	<b>m_105</b>	kg	517,97	528,00	520,62	522,20
Masse over vand efter vakuumvadmætning	<b>mssd</b>	kg	576,60	585,80	576,60	579,67
Masse under vand	<b>msw</b>	kg	315,80	322,30	317,70	318,60
Prøvelegemets volumen	<b>v</b>	m <sup>3</sup>	261,44	264,14	259,53	261,70
Volumen af åbne porer	<b>V_på</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	58,77	57,94	56,12	57,61
Åben porøsitet	<b>P_å</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,22	0,22	0,22	0,22
Tørdensitet	<b>p_d</b>	kg/m <sup>3</sup>	1,98	2,00	2,01	2,00
Faststofsdensitet	<b>p_f</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,56	2,56	2,56	2,56
Densitet i overfladetør tilstand	<b>p_ssd</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,21	2,22	2,22	2,21
Vandtørstofsforhold i overfaldetør tilstand	<b>u_ssd</b>	kg/kg	0,11	0,11	0,11	0,11

			Nussir 5%			
			A	B	C	
Masse efter tørring ved 105 grader	<b>m_105</b>	kg	532,32	526,31	524,12	527,58
Masse over vand efter vakuumvandmætning	<b>mssd</b>	kg	586,60	580,80	576,70	581,37
Masse under vand	<b>m<sub>sw</sub></b>	kg	324,20	320,50	318,90	321,20
Prøvelegemets volumen	<b>V</b>	m <sup>3</sup>	263,04	260,93	258,43	260,80
Volumen af åbne porer	<b>V_på</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	54,41	54,62	52,71	53,91
Åben porøsitet	<b>P_å</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,21	0,21	0,20	0,21
Tørdensitet	<b>p_d</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,02	2,02	2,03	2,02
Faststofsdensitet	<b>p_f</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,55	2,55	2,55	2,55
Densitet i overfladetør tilstand	<b>p_ssd</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,23	2,23	2,23	2,23
Vandtørstofsforhold i overfaldetør tilstand	<b>u_ssd</b>	kg/kg	0,10	0,10	0,10	0,10

			Nussir 10%			
			A	B	C	
Masse efter tørring ved 105 grader	<b>m_105</b>	kg	512,55	511,87	518,67	514,36
Masse over vand efter vakuumvandmætning	<b>mssd</b>	kg	568,20	568,50	573,90	570,20
Masse under vand	<b>m<sub>sw</sub></b>	kg	312,00	311,60	315,40	313,00
Prøvelegemets volumen	<b>V</b>	m <sup>3</sup>	256,82	257,53	259,13	257,83
Volumen af åbne porer	<b>V_på</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	55,79	56,77	55,36	55,97
Åben porøsitet	<b>P_å</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,22	0,22	0,21	0,22
Tørdensitet	<b>p_d</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,00	1,99	2,00	1,99
Faststofsdensitet	<b>p_f</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,55	2,55	2,55	2,55
Densitet i overfladetør tilstand	<b>p_ssd</b>	kg/m <sup>3</sup>	2,21	2,21	2,21	2,21
Vandtørstofsforhold i overfaldetør tilstand	<b>u_ssd</b>	kg/kg	0,11	0,11	0,11	0,11

<b>Resultater</b>	REF	ZG 5%	ZG 10%	NU 5%	NU 10%
<b>P_å</b>	0,21	0,21	0,22	0,21	0,22
<b>p_d</b>	2,01	2,01	2,00	2,02	1,99
<b>p_f</b>	2,54	2,55	2,56	2,55	2,55
<b>p_ssd</b>	2,22	2,22	2,21	2,23	2,21
<b>u_ssd</b>	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11



## B.21 Teoretiske trykstyrke med Bolomeys formel

1 af 2

### Vejledende konstanter

BASIS cement	Termin [døgn]	K[-]	$\alpha$ [-]	
		1	17	0,9
		7	26	0,6
		28	30	0,5
Vandabsorption				
	Zinkgruvan	Nussir		
wa [%]		0,62	0,44	
wa [-]		0,01	0,00	
w [g] 5%		0,14	0,10	
w [g] 10%		0,28	0,20	

### Bolomeys formel

Blanderecept B.1 og B.2				
Ikke korrigeret for vandabsorption				
	Zinkgruvan		Nussir	
	0,05	0,10	0,05	0,10
v/c	0,53	0,56	0,53	0,56
Fc [Mpa]7 døgns	33,46	30,83	33,46	30,83
Fc [Mpa]28 døgns	41,60	38,57	41,60	38,57
Korrigeret				
	Zinkgruvan		Nussir	
	0,05	0,10	0,05	0,10
v/c	0,53	0,56	0,53	0,56
v/c korr	0,53	0,55	0,53	0,56
Fc [Mpa]7 døgns	33,83	31,26	33,82	31,24
Fc [Mpa]28 døgns	42,04	39,07	42,03	39,05

### Bolomeys formel

Blanderecept C.1 og C.2				
Ikke korrigeret for vandabsorption				
	Zinkgruvan		Nussir	
	0,05	0,10	0,05	0,10
v/c	0,50	0,50	0,50	0,50
Fc [Mpa]7 døgns	36,40	36,40	36,40	36,40
Fc [Mpa]28 døgns	45,00	45,00	45,00	45,00
Korrigeret				
	Zinkgruvan		Nussir	
	0,05	0,10	0,05	0,10
v/c	0,50	0,50	0,50	0,50
v/c korr	0,50	0,50	0,50	0,50
Fc [Mpa]7 døgns	36,43	36,47	36,42	36,45
Fc [Mpa]28 døgns	45,04	45,08	45,03	45,06

**Bolomeys formel**

<b>Blanderecept D.1, D.2, D.3 og D.4</b>				
Ikke korrigeret for vandabsorption				
	Zinkgruvan		Nussir	
	5%	10%	5%	10%
v/c	0,55	0,59	0,52	0,54
Fc [Mpa]7 døgns	31,67	28,47	34,40	32,55
Fc [Mpa]28 døgns	39,55	35,85	42,69	40,56
Korrigeret				
	Zinkgruvan		Nussir	
	0,05	0,10	0,05	0,10
v/c	0,55	0,59	0,52	0,54
v/c korr	0,56	0,59	0,52	0,54
Fc [Mpa]7 døgns	31,23	28,70	34,60	32,53
Fc [Mpa]28 døgns	39,03	36,11	42,93	40,53

# Anvendelse af mineaffald i beton - Tailings fra Nussir

Maja Østergaard Sørensen, s143871

## Indledning

Denne poster indeholder resultater fra indledende undersøgelser omhandlende tailingen Nussir. Til sammenligning undersøges også basis cement, søsand 0-4mm samt en anden tailing Zinkgruvan.

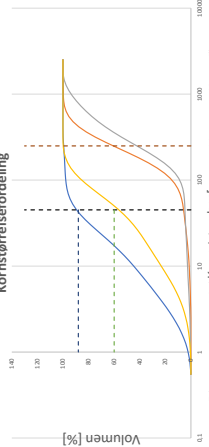
## Karakteristik af mineaffaldets egenskaber

Følgende tabel indeholder resultaterne fra en række karakteriserende forsøg. Det ses, at Nussir har et meget lavt vandindhold og et højt glødetab.

	Sand	Cement	Zinkgruvan	Nussir
Vandindhold [%]	0,97	0,21	10,62	0,12
pH-værdi [-]	9,56	12,32	8,4	8,85
Carbonatindhold [%]	15,71	58,20	12,56	41,65
Glødetab [%]	3,18	6,36	5,85	17,10
Korndensitet [g/cm <sup>3</sup> ]	2,65	3,5251	2,7909	2,7164

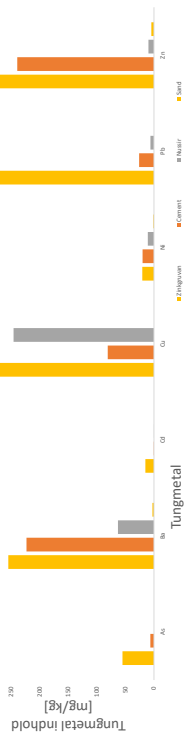
## Kornstørrelsefordeling

Nedenstående diagram illustrerer kornstørrelsefordelingen for cement, sand og tailings. Der er tilmed indsat grænser for kategori S<sup>1</sup>, kategori N<sup>1</sup> og fillergrænsen<sup>2</sup>. Det ses, at Nussir har potentiale som filler.



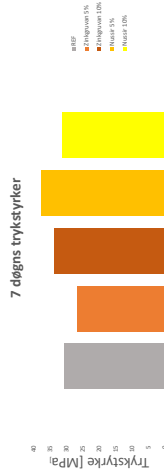
## Indhold af tungmetaller

Følgende diagram viser indholdet af tungmetaller i de undersøgte materialer. Der er indsat grænser fra miljøstyrelsen<sup>3</sup>. Nussir overholder alle grænserne.



## Undersøgelse af mørtelprøvers afbindingstid og trykstyrke

På nedenstående diagram ses 7 døgns trykstyrken for de støbte mørtelprøver. Der er undersøgt en referencoprøve, og prøver hvor hhv. 5% og 10% af cementen er erstattet med hhv. Zinkgruvan og Nussir.



## Afbindingstid for mørtelprøver

Nedenstående tabel viser afbindingstiden for mørtelprøver målt med Vicat.

	Ref	Zinkgruvan 5%	Zinkgruvan 10%	Nussir 5%	Nussir 10%
Indledende afbindingstid [min]	170	180	170	150	-
Endelig afbindingstid [min]	510	310	590	290	-

## Bearbejdélighed

Nedenstående tabel viser flydesætmålet for mørtelprøver. Nussir har et højt flydesætmål.

	Ref	Zinkgruvan 5%	Zinkgruvan 10%	Nussir 5%	Nussir 10%
Flydesætmål [m]	116,25	113,75	118,63	131,86	120,75

## Konklusion

Det ses, at Nussir har et lavt vandindhold. Dette afspejles også i de høje flydesætmål for mørtelprøver, som indeholder Nussir. Det kunne være interessant, at undersøge hvorvidt trykstyrken kan øges ved justering af vandindholdet i mørtelprøverne, således at v/c-forholdet sænkes. Kornstørrelsefordelingen indikerer, at Nussir kan benyttes som filler. Videre kunne korrosionsmiljøet undersøges grundet Nussirs neutrale pH-værdi.

<sup>1</sup> DS/EN 450-1:2012

<sup>2</sup> Hansen, K. K. (2012). Bygningsingenjørerens materialer

<sup>3</sup> Miljøstyrelsen. (2014).