

Anvendelse af mineaffald som delvis cementerstatning i beton

Sammenligning af to slags mineaffald med fokus på optimering af trykstyrke og bearbejdelighed



Mona Randahl Nielsen, s124942

DiplomByg Afgangprojekt

Department of Civil Engineering
2017

DTU Civil Engineering
January 2017

[Blank side]

Forord

Dette projekt er et DiplomByg afgangprojekt udført ved Institutet for Byggeri og Anlæg ved Danmarks Tekniske Universitet.

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

Afgangprojektet er vurderet til 20 ECTS-point og er udarbejdet i efteråret 2016.

Beregninger og grafer er udført i Excel og L^AT_EX er anvendt til tekstbehandling.

Til udarbejdelsen af dokumentet er anvendt hyperref, som gør det muligt for læseren, at komme rundt i dokumentet ved at klikke på titlerne i indholdsfortegnelsen, samt krydshenvisninger og kildehenvisninger.

En ganske særlig tak skal lyde til Lektor Pernille Erland Jensen, Videnskabelig Assistent Nina Marie Sigvardsen og Professor Listbeth M Ottossen, som har virket som vejledere på projektet.

Derudover rettes en stor tak til laborantkoordinator Ebba Schnell, betontekniker Per Leth og laborant Malene Grønvold, samt en generel tak til instituttet for at stille materialer og materiel til rådighed til udførelsen af dette projekt.

[Blank side]

Sammenfatning

I cementindustrien er der generelt en stigende interesse for at anvende affaldsprodukter i beton. Dette skyldes det stadig stigende fokus på at nedbringe CO₂-udledningen, som aldrig har været højere. Cementfremstilling bidrager desuden med ca. 5 % til den samlede CO₂-udledning på verdensplan. Ved at erstatte dele af cementen med affaldsprodukter opnås derved en besparelse på CO₂-regnskabet og i det økonomiske regnskab.

Mineindustrien vil have stor fordel af, at der findes en anvendelsesformål til mineaffald, som ofte volder store problemer i forbindelse med oplagringen. Dette skyldes, at mineaffaldet er af en sådan karakter, at det under oplagringen ofte udgør en miljømæssig risiko, idet det kan volde stor skade både af kemisk og fysisk karakter.

Formålet med dette projekt er at undersøge, om mineaffald kan anvendes som delvis cementerstatning i beton. Mineaffaldet fra den ene mine stammer fra zink-, bly- og kobberminen Zinkgruvan, som er beliggende i Sydsvrige og mineaffaldet fra den anden mine stammer fra guldminen Nalunaq, som er beliggende på Sydgrønland. Til mørtelblandingerne blev anvendt en udskiftningsgrad af cement med mineaffald på 5 % og på 10 % .

Indledningsvis udarbejdes en karakteristik af mineaffaldet for at afdække dets egenskaber. En SEM analyse af mineaffaldet viste, at kornstrukturen for begge typer mineaffald ikke vil bidrage til at gøre betonen mere bearbejdelig. Kornstørrelsesfordelingen blev undersøgt, og her viste det sig, at kornstørrelsesfordelingen ligner mere sand end den ligner cement og flyveaske. Derudover blev det fundet, at mineaffaldet fra Nalunaq overholder grænseværdien for filler på 250 µm. Glødetabet og vandopløseligheden er som forventet lav for begge typer mineaffald, og pH-værdien er neutral. Ledningsevnen er lav sammenlignet med ledningsevnen for kulflyveaske, men det blev fundet, at ledningsevnen er højere for mineaffaldet fra Zinkgruvan end for mineaffaldet fra Nalunaq.

Indholdet af tungmetaller er generelt højt, og lever ikke op til grænseværdierne for kategori 1 jf. Miljøstyrelsen [2015] for anvendelse af restprodukter til bygge- og anlægsarbejder.

En XRD analyse af mineralindholdet kan bekræfte det indhold af mineraler i mineaffaldet, som er beskrevet jf. Jensen et al. [2016]. Amfibole mineralet blev identificeret i begge typer mineaffald, hvorfor det bør undersøges, om mineralet hører inde under kategorien asbest, før mineaffaldet kan anvendes i beton. Et indhold af mikroklin feldspat og kvarts indikerer, at der måske er tuffit i mineaffaldet fra Zinkgruvan. Indholdet af tuffit i Zinkgruvan indikerer, at der kan være puzzolansk aktive mineraler i mineaffaldet.

Det blev undersøgt, om der kan anvendes vådt sand og vådt mineaffald til mørtelblandingerne ved at undersøge trykstyrken. Dette resulterede i høje standardafvigelser, hvorfor det kan konkluderes, at vandindholdet bliver sværere at styre, når der anvendes vådt sand og vådt mineaffald i mørtlen. En undersøgelse af sandets vandindhold viste, at vandindholdet overholder kravet for vandindholdet defineret i DS/EN 196-1 [2005]. I den resterende del af projektets forløb, blev der derfor anvendt tørret sand og tørret mineaffald til alle mørtelblandingerne.

Flydesætmålet for blandingerne med mineaffald viste, at mineaffaldet absorberer mere vand end cementen. Derudover forsinkes afbindingstiden ved tilsætning af mineaffald, hvilket var forventet, idet mængden af cement reduceres.

Ud fra en undersøgelse af styrkeudviklingsforløbet for 7- 14- og 28-døgns trykstyrken for mørtelblandingerne med mineaffald, kan det konkluderes, at trykstyrken reduceres, når dele af cementen erstattes med mineaffald. En sammenligning af trykstyrken for mørtel med de to typer mineaffald viste, at filleregenskaberne for mineaffaldet fra Nalunaq viser sig at bidrage til en høj trykstyrke tidligt i styrkeudviklingsforløbet, men senere i styrkeudviklingsforløbet opnår mørtelblandingen med mineaffald fra Zinkgruvan en højere styrke. Dette indikerer, at der kan være puzzolansk aktivt materiale i mineaffaldet fra Zinkgruvan.

Vandindholdet af mørtelblandingerne med mineaffald blev optimeret ved at optimere flydesætmålet. Her blev

det fundet, at styrken kan øges med op til 4,7 % for mørtelblandingerne. Tendensen kan skyldes den øgede bearbejdelighed og eventuelt også en øget hydratiseringsgrad.

Mineaffaldet fra Zinkgruvan blev knust i en ringknuser for at opnå en optimeret kornstørrelse. Det viste sig, at kornenes struktur blev forbedret og ud fra en bestemmelse af kornstørrelsesfordelingen blev det fundet, at kornstørrelsen overholder grænseværdien for flyveaske kategori N, som er defineret i DS/EN 450-1 [2012]. En undersøgelse af styrkeudviklingen for 7-, 14 og 28 døgns trykstyrken viste, at trykstyrken ikke bliver højere, når mineaffaldet fra Zinkgruvan knuses. Dette kan skyldes, at mineaffaldet absorberer mere vand, når kornstørrelsen bliver mindre. 28 døgns trykstyrken for mørtelblandingerne med knust mineaffald indikerer ikke et indhold af puzzolaner i mineaffaldet fra Zinkgruvan, idet stigningen havde været forventet højere som følge af knusningen.

Der er udført flere studier af anvendelsen af mineaffald i beton og udskiftning af cement med mineaffald, men de undersøgelser der er lavet i dette projekt, er de første der er udført på mineaffald fra minerne Nalunaq og Zinkgruvan. Dette projekt er dermed kun en lille del af en lang række forskningsprojekter, som kan afdække anvendelsen af mineaffald fra Nalunaq og Zinkgruvan specifikt, men også mere generelt anvendelsen af mineaffald fra andre miner.

Abstract

The use of waste products in concrete is a developing field of interest in the cement industry. This is partly due to the increasing focus on decreasing the CO₂-emission, which never has been higher these days. The cement production contributes to the overall CO₂-emission by approximately 5 % world wide. Savings could be achieved both financially and on the CO₂-emission level by replacing parts of the cement with waste products.

In the mining industry it would be a great advantage if parts of the mining wastes could have a useful purpose, as depositing this waste can be problematic otherwise. By depositing the mine waste by the mining site, the mine waste represents an environmental risk, because it might cause damage on both a physical and a chemical level.

The goal of this project is to investigate if mine waste could be used as a partly substituent for cement in concrete. The mine waste investigated in this project originates from Zinkgruvan in southern Sweden, which produces lead, zinc and copper and from the gold mine Nalunaq in Southern Greenland. In this project 5-10 % of the cement is replaced by mine waste.

Firstly an examination of the properties of the mine waste was conducted. A SEM analysis of the mine waste showed, that the structure of the grains for both types of mine waste wouldn't contribute to the workability of the mortar. The grain size distribution was investigated and it showed that the mine waste was more like sea sand than cement and fly ash. Furthermore the grain size distribution showed, that the mine waste from Nalunaq comply with the filler limit which is 250 µm. The loss of ignition and the water solubility is low as expected for both types of mine waste, and the pH is neutral. The conductivity is low compared to coal fly ash but for the Zinkgruvan mine waste it was slightly higher than for the Nalunaq mine waste.

The content of heavy metals is generally high, and it doesn't comply with the limit values for category 1 waste material for use in building and construction works defined by Miljøstyrelsen [2015].

Through an XRD analysis of the mineral content, it can be concluded, that the minerals described by Jensen et al. [2016] is present in the mine waste. Amphibole was identified in both types of mine waste, which could be problematic, if it is of the form asbestos. A content of microcline feldspar and quartz indicates, that tuffite might be present in the mine waste from Zinkgruvan. The content of tuffite in Zinkgruvan indicates a possibility of pozzolans present in the mine waste.

The possibility of using wet mine waste and wet sand in the mortar was investigated by compressive strength tests. The results showed high standard deviations, whereby it was concluded that the water content is hard to control when using wet sand and wet mine waste in the mortar. The water content of the sea sand was measured, and it showed that the water content comply with the requirement defined in DS/EN 196-1 [2005]. It was decided, that dried sand and dried mine waste should be used in the mortar mixes in the rest of the project.

The slump test showed that the mine waste absorbs more water than the cement. Furthermore the initial setting time was delayed, which was expected because the amount of cement was reduced.

From the results of the compressive strength development for 7-, 14- and 28 days when using dried mine waste and sand it was concluded that the compressive strength is reduced, when the cement is partly replaced by mine waste. The filler properties of the mine waste from Nalunaq is showed to contribute to a high early compressive strength when compared to the compressive strength of the mortar with Zinkgruvan mine waste. Later in the strength development the mine waste from Zinkgruvan contributes to an even higher compressive strength, which indicates the possibility of some pozzolanic material in the mine waste from Zinkgruvan.

The water content of the mortar mixes was optimized by the conduction of a slump test of each of the different mixes. 14 days compressive strength tests was conducted on the optimized mortar, and the results showed

an increase in strength development by maximum 4,7 %. This could partly be explained by the optimized workability but also an increase in the hydration rate could explain the tendency.

The mine waste from Zinkgruvan was crushed in order to optimize the grain size. A SEM analysis showed an improvement of the structure of the grains, and the results from the grain size distribution showed that the grain size comply with the limit value for category N fly ash defined in DS/EN 450-1 [2012]. One investigation of the compressive strength development for 7, 14 and 28 days of hydration showed, that the compressive strength doesn't get higher when the mine waste was crushed. This can be explained by the absorption level of water from the mine waste, which is suspected to increase when the grain size gets smaller. The strength development at 28 days for the mortars with crushed mine waste doesn't indicate a content of pozzolans, because then the increase in compressive strength would be expected to be higher than the compressive strength for the uncrushed mine waste.

Other researchers studied of the use of mine waste in concrete as well, but this investigation of the use of mine waste from Zinkgruvan and Nalunaq in concrete are the first to be conducted. This project only contributes with a minor insight in the use of mine waste in concrete, and further projects will be conducted in the nearest future both in order to investigate the use of mine waste from Nalunaq and Zinkgruvan and generally on mine waste from other mining sites.

Indhold

1	Indledning	1
1.1	Baggrund for undersøgelser	1
1.2	Opgavens opbygning	2
1.3	Forkortelser og farvekoder	2
2	Teori	5
2.1	Beskrivelse af mineaffald	5
2.2	Beskrivelse af mørtel	5
2.3	Hydratisering af cement	6
2.4	Afbindingsforløb	7
2.5	Bearbejdelighed	7
2.6	Trykstyrke	8
2.7	Puzzolan	9
2.8	Filler	10
2.9	Armeringskorrosion og Karbonatisering	10
3	Eksperimenter	11
3.1	Karakteristik af mineaffald	12
3.2	Oversigt over støbninger til tryktest	14
3.3	Blanding af mørtel og støbning af prizmer	14
3.4	Afbindingsforløb	17
3.5	Flydesætmål	18
3.6	Trykprøvning af mørtelprismer	19
4	Resultater og Diskussion	21
4.1	Trin 1: Indledende undersøgelser	22
4.1.1	Karakteristik af mineaffald	22
4.1.2	Trykstyrker vådt sand og mineaffald	28
4.1.3	Flydesætmål	29
4.1.4	Afbindingsforløb	31
4.1.5	Målte trykstyrker tørret sand og tørret mineaffald	33
4.1.6	Teoretiske trykstyrker tørret sand og tørret mineaffald for 7-døgns prøver	34
4.2	Delkonklusion for indledende undersøgelser	35
4.2.1	Trin 2: Forslag til videre undersøgelser	36
4.2.2	Trin 3: Valg af videre undersøgelser	36
4.3	Trin 4: Fokus på optimering af trykstyrke og bearbejdelighed	37
4.4	Optimering af vandindhold	37
4.5	Optimering af kornstørrelse	39
4.6	Delkonklusion for optimering af trykstyrke og bearbejdelighed	42
5	Konklusion	43
6	Videre Forskning	45

Litteratur	46
Bilag	47
A Forsøgsvejledninger	49
A.1 Vandopløselighed	49
A.2 Glødetab	52
A.3 Ledningsevne	55
A.4 Carbonat Volumetrisk	57
A.5 Proportioneringsmetoden	61
A.6 XRD Databehandling	62
A.7 Vicatronic manual	69
B Data for karakteristisk af mineaffald	80
B.1 Data for kornstørrelser	80
B.2 Data for vandopløselighed	85
B.3 Data for glødetab	86
B.4 Data for pH og ledningsevne	87
B.5 Data for calciumcarbonat indhold	88
B.6 Data for vandindhold	88
C Data for tryktest	90
C.1 Støbninger til tryktest	90
C.2 Tryktest resultater	95
D Data for flydesætmål	104
D.1 Data for flydesætmål	104
D.2 Data for optimering af flydesætmål	107
E Data for afbindingstid	110
E.1 Data for afbindingstid	110
F Poster fra midtvejspræsentation	113
F.1 Poster fra midtvejspræsentation	113

Tabeller

1.1	Oversigt over forkortelser og farvekoder	3
2.1	Vejledende konstanter til Bolomeys formel	9
3.1	Oversigt over karakteristikkere af mineaffald	11
3.2	Oversigt over karakteristikkere af mørtel	11
3.3	Oversigt over støbninger til tryktest	14
3.4	Blanderecepter	14
4.1	Data for glødetab, pH-værdi, ledningsevne og vandopløselighed	24
4.2	Indhold af tungmetaller i mineaffald jf. Jensen et al. [2016]	25
4.3	Indhold af mineraler ud fra XRD analyse	26
4.4	Indhold af carbonater i N og Z sammenlignet med KFA	27
4.5	Tryktest resultater for RF.b, Z5.b, Z10.b, N5.b, N10.b vurderet efter DS/EN 196-1 [2005]	28
4.6	Vandindhold i sand med forskellige lagringstider	29
4.7	Flydesætmål for RF, Z5, Z10, N5, N10 sammenlignet med flydesætmål for KFA	29
4.8	Indledende afbindingstid	32
4.9	Endelige afbindingstid	32
4.10	Teoretiske trykstyrker sammenlignet med målte trykstyrker for 7-døgns prøver - for RF, Z5, Z10, N5 og N10	34
4.11	Optimeret flydesætmål og procentvis afvigelse fra RF	37
4.12	Procentvis stigning i trykstyrke ved optimeret vandindhold for 14-døgns prøver	39
4.13	Procentvis fald i trykstyrke ved optimeret kornstørrelse for 14-døgns prøver	41

[Blank side]

Figurer

2.1	Billeder af de to typer mineaffald	5
2.2	Hydratiseringsforløb for cementpasta	6
2.3	Volumenandele af faser i en hydratiserende cementpasta	7
2.4	Styrkeudviklingsforløb for cement indeholdende puzzolaner	9
3.1	Ringknuser	12
3.2	Mixer fra Toni Industrie	15
3.3	Forme til mørtelprismer	16
3.4	Støbning af mørtelprismer	16
3.5	Forsøgsoptilling for afbindingstid	17
3.6	Mønster for Vikat efter DS/EN 196-3	17
3.7	Forsøgsoptilling til flydesætmål	18
3.8	Opmåling af flydesætmål	18
3.9	Forsøgsoptilling i Toni 3000	19
4.1	Processdiagram for projektet	21
4.2	SEM analyse af Z og N	22
4.3	SEM analyse af KFA jf. Sigvardsen [2016]	22
4.4	Kornstørrelsesfordeling for Z	23
4.5	Kornstørrelsesfordeling for N	24
4.6	Resultater fra XRD analyse	26
4.7	7-døgns trykstyrker for RF.b, Z5.b, Z10.b, N5.b holdt op imod RF, Z5, Z10, N5, N10	28
4.8	Flydesætmål for mørtelblandinger med mineaffald	30
4.9	Afbindingsforløb for RF, Z5, Z10	31
4.10	Afbindingsforløb for RF, N5, N10	31
4.11	Styrkeudvikling for RF, Z5, Z10, N5, N10	33
4.12	Trykstyrker for RF, Z5, Z10, N5, N10 med standardafvigelser	33
4.13	14-døgns trykstyrker for Zv5, Zv10, Nv5 Nv10, RF, Z5, Z10, N5, N10 givet ved vandindhold	38
4.14	Kornstørrelsesfordeling for Z.k	39
4.15	SEM analyse af Z.k og Z	40
4.16	Styrkeudvikling for Zk5, Zk10 sammenlignet med RF, Z5, Z10	40
4.17	14-døgns trykstyrker for Zv5, Zv10 sammenlignet med Zk5, Zk10 og RF, Z5, Z10	42

[Blank side]

1 | Indledning

Dette projekt har til formål at sammenligne to typer mineaffald og muligheden for anvendelse som delvis erstatning af cement i mørtel.

Hovedfokus er at undersøge mineaffaldets indflydelse på trykstyrken og bearbejdeligheden.

Der undersøges følgende to typer mineaffald:

- Zinkgruvan, som er en zink, bly og kobber mine beliggende i Sydsverige
- Nalunaq, som er en guldmine beliggende i Sydgrønland

Der udarbejdes karakteristikkere af de to typer mineaffald, hvor vandopløselighed, Glødetab, pH-værdier, ledningsevne, kornstørrelsesfordeling samt den mineralske sammensætning undersøges.

Mørtelprismer med en cementerstatning på 5% og 10% mineaffald støbes med en afbindingstid på 7, 14 og 28 dage for at fastlægge styrkeudviklingsforløbet. Afbindingsforløbet og flydesætmålet er undersøgt for at få en indikation af mineaffaldets indflydelse på bearbejdeligheden af mørtlen.

Til slut i projektet undersøges, hvorledes trykstyrken kan optimeres ved 1) at tilsætte ekstra vand og derved øge mørtlens bearbejdelighed og 2) at ringknuse mineaffaldet fra Zinkgruvan og derved opnå en bedre kornstørrelsesfordeling.

1.1 Baggrund for undersøgelser

Hvis dele af cementen i beton kan erstattes med mineaffald, vil der være besparelser at hente både i det økonomiske regnskab, i CO₂-udledningen og i områder omkring minerne.

I mineindustrien volder mineaffald ofte problemer, fordi oplagring af materialet kan være dyrt og ofte indebærer risikoen for miljømæssige belastninger af kemisk og fysisk karakter. Ved at finde et anvendelsesformål til mineaffaldet, vil disse risici nedbringes, og mineselskaberne slipper for at betale den til tider dyre regning for oplagring og reetablering af forurenede områder [Europa-Kommisionen, 2009].

Anvendelse af affaldsprodukter i beton, er et område, der til stadighed får mere opmærksomhed. Dette skyldes til dels den økonomiske gevinst ved at anvende affaldsprodukter frem for at købe den dyrere cement. Men der er også en miljømæssige gevinst ved at bruge mindre cement, idet det på verdensplan skønnes at cementfremstillingen bidrager til CO₂-udledningen med 5 % [Skaarup, 2013]. Hvis dele af cementen kan erstattes med et materiale som mineaffald, der ikke kræver den samme mængde forarbejdning som cement, vil man derved kunne nedbringe CO₂-udledningen.

Tidligere studier har banet vej for en stigende anvendelse af affaldsprodukter såsom flyveaske i beton, som i mange tilfælde er attraktiv grundet dens potentielle filleregenskaber og puzzolanske aktivitet [Thomas, 2007]. Især kulflyveaske har vist sig at være meget anvendelig, men kilden til kulflyveaske er under udfasning, idet Danmark og flere andre europæiske lande udskifter kul med træpiller som brændselstof [Djursling, 2016]. Det er derfor nødvendigt at undersøge, om alternative materialer kan implementeres på samme måde som kulflyveasken.

Ud fra de ovenfor listede miljømæssige og økonomiske fordele, kunne det være interessant, at undersøge om mineaffald har en positiv eller negativ effekt på betonens egenskaber. I dette projekt fokuseres især på mineaffaldets indflydelse på trykstyrken og bearbejdeligheden.

1.2 Opgavens opbygning

Opgavens opbygning er følgende:

Teori

Et teoriafsnit der har til formål at opsummere den teori og de beregningsmetoder, der har været anvendt ved behandling af forsøgsdata.

Eksperimenter

Afsnittet beskriver kort de fremgangsmetoder, der er anvendt ved udførelsen af de forsøg, der danner grundlag for dette projekts forsøgsdata. Der laves henvisninger til standarder og forsøgsvejledninger, hvorfor der ikke gås i detaljen med beskrivelsen af fremgangsmetoderne.

Resultater og diskussion

Dette afsnit er delt op i fire trin, som afspejler den proces, der har givet projektet et fokus.

- *Trin 1:* Indledende undersøgelser
Resultaterne fra de indledende undersøgelser af mineaffald og cementmørtel præsenteres. Karakteristik af mineaffald, som indebærer en analyse af de fysiske og kemiske egenskaber præsenteres. Dernæst præsenteres en karakterisering af mørtlen med fokus på trykstyrke, bearbejdelighed og afbindingsforløb.
- *Trin 2:* Forslag til videre undersøgelser
En delkonklusion for databehandlingen af de indledende undersøgelser hvor der evalueres på de væsentligste resultater og derudfra vurderes, hvad der kan være relevant at undersøge i projektets videre forløb.
- *Trin 3:* Valg af videre undersøgelser
På baggrund af de i trin 2 præsenterede undersøgelser vurderes hvilken undersøgelse, der er mest interessant at arbejde videre med. I dette projekt er valgt at arbejde videre med at optimere bearbejdeligheden og trykstyrken.
- *Trin 4:* Fokus på optimering af trykstyrke og bearbejdelighed
I dette afsnit præsenteres og diskuteres resultaterne fra de videre undersøgelser som blev valgt i trin 3.

Konklusion

Den endelige konklusion på projektet.

Videre forskning

Undervejs i projektføreløbet rejser der sig en række nye spørgsmål, som kunne være interessant at få besvaret i dette projekt, men som der ikke har været tid til at arbejde videre med på grund af tidsrammen for projektet. Disse nye spørgsmål kan danne rammen for en række nye forskningsemner, som vurderes at have høj relevans i forhold til mineaffaldets anvendelsesmuligheder i mørtel.

















1.3 Forkortelser og farvekoder

For at danne et billede af mineaffaldets egenskaber sammenlignes med søsand og cement, som udgør hovedkomponenterne i mørtel. Derudover sammenlignes med en godkendt kulflyveaske fra Avedøreværket. En oversigt over forkortelserne for mineaffald, søsand, cement og kulflyveasken findes nedenfor.

Tabel 1.1 på næste side viser en oversigt over hvilke farvekoder der hører til de forskellige typer af mørtelblandinger.

Forkortelse	Beskrivelse
Z	Mineaffald fra Zinkgruvan
N	Mineaffald fra Nalunaq
CEM II	BASIS cement fra Aalborg Portland CEM II/A-LL
KFA	Kulflyveaske fra Avedøreværket depot 1

Tabel 1.1: Oversigt over forkortelser og farvekoder

Forkortelse	Beskrivelse	Farvekode
RF	Referenceprøve uden tilsat mineaffald	
Z5	5 % af cementen erstattes med mineaffald fra Zinkgruvan	
Z10	10 % af cementen erstattes med mineaffald fra Zinkgruvan	
N5	5 % af cementen erstattes med mineaffald fra Nalunaq	
N10	10 % af cementen erstattes med mineaffald fra Nalunaq	
Zv5	Z 5 med optimeret vandindhold	
Zv10	Z 10 med optimeret vandindhold	
Nv5	N 5 med optimeret vandindhold	
Nv10	N 10 med optimeret vandindhold	
Zk5	5 % af cementen erstattes med knust mineaffald fra Zinkgruvan	
Zk10	10 % af cementen erstattes med knust mineaffald fra Zinkgruvan	
RF b	Referenceprøve med vådt sand	
Z5 b	5 % af cementen erstattes med vådt mineaffald fra Zinkgruvan	
Z10 b	10 % af cementen erstattes med vådt mineaffald fra Zinkgruvan	
N5 b	5 % af cementen erstattes med vådt mineaffald fra Nalunaq	
N10 b	10 % af cementen erstattes med vådt mineaffald fra Nalunaq	

[Blank side]

2 | Teori

2.1 Beskrivelse af mineaffald

I praksis skelnes mellem flere forskellige kategorier af mineaffald, derfor skal det understreges, at dette projekt kun behandler den type mineaffald, som på engelsk kaldes tailings. Tailings er det materiale, der bliver tilbage, når de mineralske råstoffer er udvundet fra værtsbjergarterne. Udvindingen foregår ved hjælp af knusning i en mølle og i nogle tilfælde ved hjælp af kemikalier [Lottermoser, 2010]. Begrebet mineaffald vil blive brugt for tailings i dette projekt. På figur 2.1 ses billeder af de to typer mineaffald, der undersøges i dette projekt.



(a) Zinkgruvan



(b) Nalunaq

Figur 2.1: Billeder af de to typer mineaffald

Mineaffald fra Zinkgruvan

Zinkgruvan er en zink-, bly- og kobbermine beliggende i Sydsverige. Minen har været i brug siden år 1857, og er til dags dato stadig i brug [Owen og Meyer, 2013]. Produktionsraten af mineaffald var 850.000 ton om året, og Mineaffaldet består hovedsageligt af mineralerne kvarts, feldspat og calcit [Jensen et al., 2016].

Kvartsminerale er meget modstandsdygtige overfor kemisk og mekanisk nedbrydning, og med en hårdhed på 7 (Mohs skala), har det en høj holdbarhed, hvorfor det benyttes i mange forskellige byggematerialer. Feldspat forekommer i sand, men er et blødere mineral, hvorfor det lettere eroderes bort end kvarts. Calcit er hovedmineralet i kridt og kalksten, som blandt andet anvendes til cementfremstilling [Larsen og Surlyk, 2012].

Der er identificeret et indhold af sulfid i mineaffaldet på 8890 mg/kg, hvilket er vurderet til at være lavt sammenlignet med andre typer af mineaffald [Lövgren et al., 2011].

Mineaffald fra Nalunaq

Nalunaq er navnet på en guldmine beliggende i Sydgrønland. Minen har været åben fra august 2004 til november 2013 [Bach og Larsen, 2016]. Minen producerede 50.000-70.000 ton per år i perioden, hvor materialet blev indsamlet til forskning beskrevet i Jensen et al. [2016]. Den primære værtsbjergart er en kvartsåre med urenheder i form af amfibolit og dolerit [Jensen et al., 2016].

Dolerit er en fin til mellemkornet basaltbjergart. Den har således samme mineralske sammensætning som basalt, der består af plagioklas feldspat, pyroxen, olivin, amfibol, olivin og kvarts [Christiansen og Aare, 2009]. Amfibolit er en bjergart, som indeholder mineralet amfibole, og nogle typer af amfibole mineraler går under betegnelsen asbest [IARC, 2005]. Det er ifølge Arbejdstilsynet [2005] forbudt at fremstille, importere, anvende eller arbejde med asbest eller asbestholdigt materiale. Derfor skal det undersøges, om mineaffald fra Nalunaq indeholder asbest, før det kan anvendes i byggematerialer.

2.2 Beskrivelse af mørtel

Beton består af sten og sand og bindemiddel i form af vand og cement, også kaldet cementpasta. Når cementpasta og sand blandes haves cementmørtel, som typisk er det svageste led i betonen [Aalborg Portland, 2012]. Derfor

kan det undersøges, hvilken effekt mineaffald har på beton ved at tilsætte det i mørtel. Mørtel blandes efter DS/EN 196-1 [2005].

Portland cement

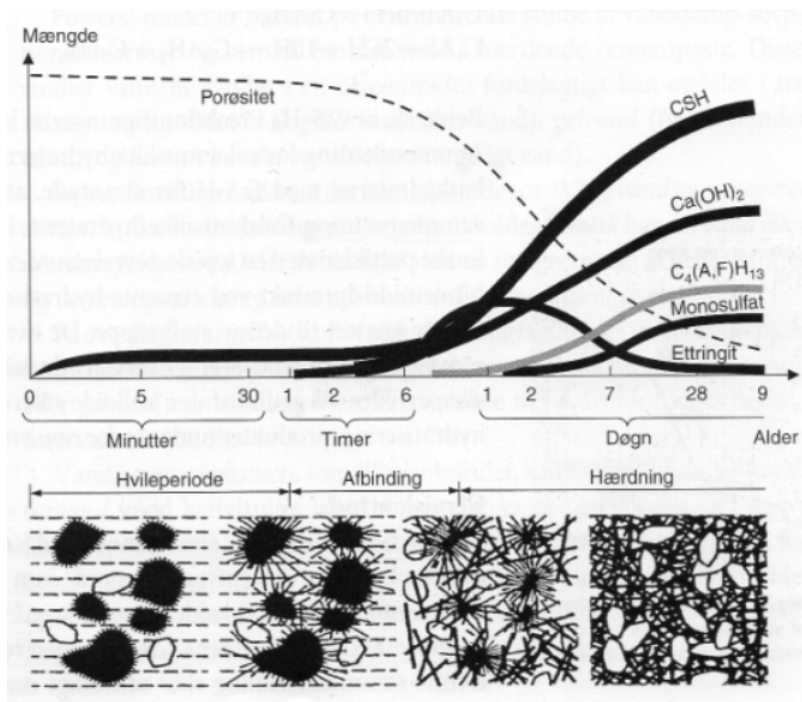
I dette projekt anvendes BASIS cement fra Aalborg Portland, også kaldet CEM II/A-LL, som er fremstillet med maksimalt 20 % kalkfiller og ca. 80 % cementklinker [Aalborg Portland, 2012]. Portland cementklinker er fremstillet ved at brænde kalksten, ler og sand ved høje temperaturer i en roterovn, hvorefter de males fint.

Søsand

Søsand (0-4 mm) anvendes som tilslag i mørtlen. Søsand består af kvarts, der er naturligt afrundet. Tilslag i beton er sten, (>4mm), sand (0-4mm) og filler (0-0,25mm). Tilslag udgør langt størstedelen af beton, idet det er langt billigere end cement, men også fordi det forbedrer styrken og holdbarheden [Geiker et al., 2008]. Vandindholdet i sandet skal svare til højst 0,2 % når mørtel blandes efter DS/EN 196-1 [2005].

2.3 Hydratisering af cement

Hydratisering af cement foregår i det øjeblik vand tilsættes cementpulver. Ved hydratisering af cement foregår en kemisk binding af vand, hvilket resulterer i en række reaktionsprodukter, en række cement hydrater [Geiker et al., 2008]. Selve hydratiseringsprocessen ligger til grund for afbindingen og den efterfølgende hærkning, og er derfor afgørende for styrkeudviklingen. En illustration af hydratiseringsforløbet inddelt i faserne hvileperiode, afbinding og hærkning kan ses på figur 2.2. Den viser blandt andet, at dannelsen af de forskellige typer af hydrater indtræder på forskellige tidspunkter, og hører op umiddelbart efter 28 døgn.



Figur 2.2: Hydratiseringsforløb for cementpasta jf. Geiker et al. [2008]
Cemthydraterne som dannes er C-S-H, Ca(OH)₂, C₄(A,F)H₁₃, Monosulfat og Ettringit

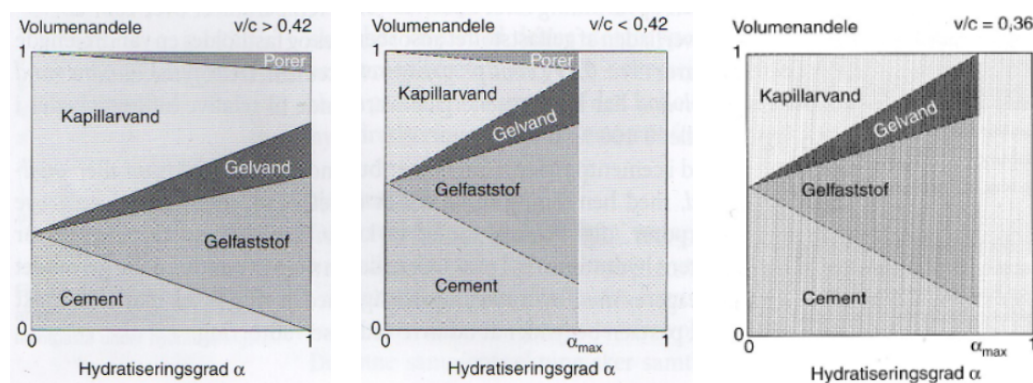
Hydratiseringsgrad

Hydratiseringsgraden er defineret som den masseandel af cement, der er hydratiseret og antager derfor værdier mellem 0 og 1. Dannelse af nye hydrater kræver frit tilgængeligt vand, og efterhånden som hydraterne dannes,

vil der være mindre frit vand, hvorfor der kræves en vis mængde vand for at opnå tilstrækkelig hydratisering [Geiker et al., 2008].

Powers og Brownyard fandt i 1948 ud af, at der for forsegleet cementpasta findes et optimalt forhold mellem vand og cement på 0,42. Forseglet betyder, at der ikke udveksles vand med omgivelserne.

Figur 2.3 viser volumenandelene af faser i en forsegleet hydratiserende cement som funktion af hydratiseringsgraden. Mængden af frit vand kaldes kapillarvand, mens gelvand er delvis kemisk bundet og gelfaststof er fuldstændig kemisk bundet. Gelvand kan i nogle tilfælde bidrage til hydratiseringen, men i dette eksempel ses der bort fra gelvandets bidrag [Geiker et al., 2008].

(a) Forseglet: $v/c > 0,42$ (b) Forseglet: $v/c < 0,42$ (c) Vandlagret: $v/c = 0,3$

Figur 2.3: Volumenandele af faser i hydratiserende cementpasta jf. Geiker et al. [2008]

Som figur 2.3 (b) viser, er hydratiseringen ufuldstændig, hvis der ikke er nok vand i en forsegleet cementpasta. Der kan delvist kompenseres for dette, ved at lade cementpastaen hærde under vand, hvor de dampporer, som dannes under hydratiseringen, vil suge vand til sig. Vandet vil så blive frit tilgængeligt. På figur 2.3 (c) ses det, at ved et v/c forhold på 0,3 og lagring i vand, vil den maksimale hydratiseringsgrad være ca. 0,85 op imod ca. 0,72, hvis cementen er forsegleet [Geiker et al., 2008]. Mørtelprismer der fremstilles og testes efter DS/EN 196-1 [2005] hærder under vand, men det skal understreges, at man i praksis sjældent har mulighed for at hærde betonen under vand.

2.4 Afbindingsforløb

Afbindingsforløbet er det tidsrum hvor cementpasta går fra at være flydende til at antage fast form [Geiker et al., 2008]. Afbindingstiden måles som tiden for opnåelse af modstand mod nedsynkning af en nål i mørtel. Nedsynkningen af en nål styres automatisk med et Vicatronic apparatur eller manuelt med en Vicat.

Indledende og endelige afbindingstid skal angives. Den indledende afbindingstid er tiden, der går, indtil afstanden mellem nålen og grundfladen er 6 ± 3 mm, og endelige afbindingstid er tiden, der går, før nålen kun nedsynker i prøven med 0,5 mm [DS/EN 196-3, 2009]. Tiden for afbinding afhænger blandt andet af mørtlens kemiske sammensætning, kornstørrelse og forholdet mellem vand og cement [Geiker et al., 2008] og [DS/EN 196-3, 2009].

2.5 Bearbejdelighed

Bearbejdeligheden af mørtel beskriver, hvor godt mørtlen kan kompakteres og flyder ud i formen, og den afhænger af forholdet mellem vand og cement og tilsættet. Når der arbejdes med beton i praksis, øges bearbejdeligheden typisk ved at tilsætte plastificerende tilsætningsstoffer [Geiker et al., 2008]

Flydesætmål

Til bestemmelse af mørtels bearbejdelighed anvendes flydesætmålet. Flydesætmålet bestemmes, ved at måle hvor meget mørtel flyder ud under kompakteringen på et rystebord. Flydesætmålet kan bruges til at bestemme, hvor meget vand, der skal tilsættes en mørtel for at opnå tilstrækkelig bearbejdelighed. Når der tilsættes mineaffald i mørtel, kan det være nødvendigt at justere vandindholdet ved at sammenholde flydesætmålet for blandingen med mineaffald med flydesætmålet for en referenceblanding.

Vandindhold

For at opnå en bearbejdelig mørtel kræves en vis mængde vand. Typisk handler det om, at finde en balance i den tilsatte mængde vand, således at mørtlen er tilstrækkelig bearbejdelig, uden at vand-cement forholdet bliver for højt. Mængden af vand, der skal tilsættes for at opnå en bearbejdelig mørtel, er også afhængig af kornstørrelsen på tilslaget, idet en større kornstørrelse og glat struktur typisk vil kræve mindre vand for at opnå en god bearbejdelighed [Mindess et al., 2003].

Tilslag

Tilslagets struktur kan være afrundet eller kantet, hvilket har betydning for bearbejdeligheden. Afrundede materialer mindsker friktion mellem kornene, og øger dermed bearbejdeligheden, hvorimod skarpkantede korn giver større friktion og mindsker bearbejdelighed [Dansk Betonforening, 2013]. En ru overflade giver dog typisk en bedre vedhæftning mellem kornene og cementen [Mindess et al., 2003].

2.6 Trykstyrke

Betons styrke testes i tryk, da beton har lav trækstyrke. Hvis betonen skal optage træk armeres der altid med stænger, kabler eller fibre [Geiker et al., 2008]. Trykstyrken for en beton skal undersøges, for at man kan vurdere hvilket formål betonen kan bruges til. Trykstyrken for mørtelprismerne beregnes ved hjælp af følgende formel:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Hvor σ er trykstyrken i MPa, A er tværsnitsarealet i mm^2 og P er trykkraten i N.

Bolomeys formel

Som tidligere nævnt er det oftest cementpastaen, der er betonens svageste led, hvorfor cementpastaen er afgørende for hvor høj styrke, betonen kan opnå. Styrken af cementpastaen afhænger af porøsiteten, som afhænger af forholdet mellem vand og cement og hærdningsgraden. Bolomeys formel beskriver denne sammenhæng [Aalborg Portland, 2012].

$$F_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/c} - \alpha \right) \quad (2.2)$$

Hvor:

- F_c er trykstyrken af betonen
- K er en konstant, der afhænger af cementtypen og terminen
- v/c er masse-forholdet mellem vand og cement
- α er en konstant, der afhænger af cementtypen og terminen

Det fremgår af ligning 2.2, at et højere v/c forhold, og derved højere porøsitet vil give en lavere trykstyrke. Konstanterne i Bolomeys formel for Aalborg Portland BASIS cement fremgår af tabel 2.1 nedenfor.

Tabel 2.1: Vejledende konstanter til Bolomeys formel

Cementtype	Termin [Døgn]	K^1	α^1
BASIS cement	1	17	0,9
	7	26	0,6
	28	30	0,5

¹ Konstanter jf Aalborg Portland [2012]

¹ Konstanterne er baseret på klasse A søsand og klasse M søsten

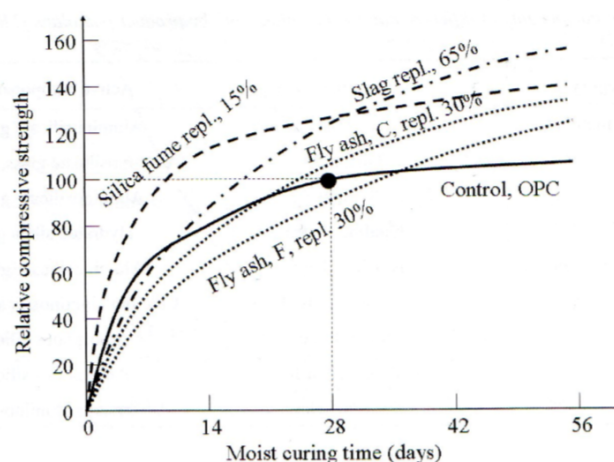
Bolomeys formel i ligning 2.2 forudsætter et naturligt luftindhold på 1%. Hvis luftindholdet øges, vil porøsiteten stige [Aalborg Portland, 2012]. Det er derfor nødvendigt, at betonen er tilstrækkelig bearbejdelig, så luftbobler kan vibreres ud af den friske beton. I nogle tilfælde ønsker man dog en vis mængde af luftbobler i betonen, for at opnå en bedre frostbestandighed [Fisker og Mathiasen, 2014].

Ved anvendelse af Bolomeys formel skal der gøres opmærksom på, at v/c -forholdet defineres som masseforholdet mellem frit tilgængeligt vand og tilsat cement. I praksis vil man derfor korrigere vandindholdet ud fra den mængde vand, som tilslagsmaterialerne absorberer grundet deres porøsitet. Mængden af tilsat vand er derfor ikke altid svarende til mængden af frit tilgængeligt vand [Dansk Betonforening, 2013].

Bolomeys formel kan udvides til at inkludere bidraget fra puzzolaner. I dette projekt er det antaget, at mineaffaldet ikke bidrager væsentligt til styrken ved hjælp af puzzolansk aktivitet, og der tages derfor ikke hensyn til dette ved beregning af den teoretiske trykstyrke.

2.7 Puzzolan

Puzzolan defineres jf. Mindess et al. [2003] som et materiale, der har cementerende egenskaber, når det reagerer med en opløsning af kalcium hydroxid. Materialet forekommer naturligt i nogle typer af vulkansk aske, samt industrielle restprodukter som kulflyveaske og microsilika. Bortset fra microsilikater reagerer puzzolaner langsommere end Portland cement, hvilket også kan ses på et styrkeudviklingsforløb, hvor cementprøver indeholdende puzzolaner sammenlignes med en referenceprøve. Her vil det ofte være en almindelig Portland cement, der har den højeste styrke tidligt i hærdningsforløbet, mens puzzolanerne giver en højere styrke senere i hærdningsforløbet [Mindess et al., 2003].



Figur 2.4: Styrkeudviklingsforløb for cement indeholdende de forskellige typer og mængder af puzzolaner jf. Johanneson [2014]. Der sammenlignes med en referencecementprøve med Portland cement

Figur 2.4 viser styrkeudviklingen for cementprøver tilsat forskellige typer af puzzolaner i forskellige mængder. Det ses, at den tidlige styrkeudvikling er lavere end referenceprøven for prøverne med flyveaske og slagge, men også at styrken bliver højere end referenceprøven efter 28 døgn [Johanneson, 2014].

Typisk indeholder puzzolaner en del amorft materiale [Mindess et al., 2003]. Amorft materiale er et materiale, som ikke antager en fast krystallinsk form [DenStoreDanske, 2013]. De aktive komponenter af nogle naturligt forekommende puzzolanske materialer og industrielle restprodukter er amorf aluminiumsilikat. Amorf aluminiumsilikat forekommer blandt andet i bjergarten Tuff og i nogle former for flyveaske [Mindess et al., 2003].

Kornstørrelse og puzzolansk aktivitet hænger sammen, idet det er fundet, at en mindre kornstørrelse giver en højere pozzolansk aktivitet [Mindess et al., 2003].

2.8 Filler

Filler er tilslag, som er meget finkornet. I litteraturen er der ikke klar enighed om definitionen på størrelsen af filler, hvorfor der nogle steder anvendes et mål på 125 μm og andre steder et mål på 250 μm [Sigvardsen, 2016]. I dette projekt er der taget udgangspunkt i en filler mål på 250 μm , som er defineret af Geiker et al. [2008]. Filler bidrager med en højere trykstyrke, når det blandes i beton [Jaturapitakkul et al., 2011]. Dette skyldes filler effekten, som ikke i sig selv er en kemisk reaktion, men bidrager til betonens kvalitet på følgende måder:

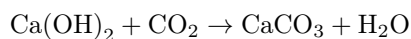
Pakningen: Når meget finkornede materialer tilsættes betonen, har det vist sig at kornene bidrager til at udfylde hulrum, hvorved det finkornede materiale bidrager til en lavere porøsitet og derved en højere trykstyrke [Lawrence et al., 2005]. Pakningen, som refererer til den matrix af forskellige kornstørrelser der forefindes i en beton bliver således forbedret ved de mindre kornstørrelser.

Heterogen kimdannelse: Det viser sig, at meget finkornet materiale kan optimere forholdene for udfældning af krystaller fra de dannede cementhydrater. Dette skyldes, at udfældningen af krystallerne aktiveres, når der er en tilgængelig overflade, som er af en anden mineralisk sammensætning. Den kemiske betegnelse for denne form for krystalvækst er heterogen kimdannelse [DenStoreDanske, 2009]. Ved at anvende små kornstørrelser haves således en stor overflade i forhold rumfang, hvorved krystallerne får bedre vækstbetingelser. Denne tendens menes at kunne accelerere hydratiseringen og derved føre til en hurtigere styrkeudvikling [Lawrence et al., 2005].

2.9 Armeringskorrosion og Karbonatisering

Når beton skal stålarmeres, er det vigtigt, at være opmærksom på dens egenskaber til dette formål. For eksempel kan armeringen korrodere, hvis betonen ikke er basisk nok. Korrosion er oxidering af metal, som nedbryder metallets tværsnit og bæreevne [Geiker et al., 2008]. Betonens pH-værdi er stærkt basisk, primært på grund af den høje mængde af calciumhydroxid, som dannes under hydratiseringen. En af de kemiske processer der kan sænke pH-værdien er karbonatisering.

Karbonatisering er en kemisk proces, som foregår ved, at den dannede calciumhydroxid reagerer med kuldioxid, som optages i betonen ved diffusion. Når calciumhydroxid reagerer med kuldioxid udfældes kalcit i betonen. Den kemiske proces er følgende [Herholdt et al., 1985].



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ fjernes derved fra cementpastaen og bidrager til, at de dannede kalciumpulver afgiver CaO , som efter hydratiseringen også karbonatiserer. Karbonatiseringen foregår langs med revner og på betonens overflade. Når $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fjernes fra betonen, vil dens pH-værdi falde til ca. 7, som ikke længere er høj nok til at beskytte armeringen mod korrosion. For en uarmeret beton vil karbonatiseringen bidrage til at gøre betonen stærkere, idet den øgede mængde af kalcit vil bidrage til en højere tæthed af betonen [Herholdt et al., 1985]. Karbonatiseringsprocessen kræver, at der er en vis mængde vand tilstede i betonen da CO_2 skal opløses i vand for at danne reaktionen med $\text{Ca}(\text{OH})_2$, vandtætning af betonen vil derfor forebygge karbonatisering.

3 | Eksperimenter

I dette kapitel præsenteres de metoder, der er anvendt til at udføre det eksperimentelle arbejde, der danner grundlag for denne rapport. Forsøgene er udført på de to typer mineaffald fra minerne Zinkgruvan og Nalunaq og på mørtel med 5% og 10% mineaffald som cementerstatning.

Det eksperimentelle arbejde inddeles i en karakteristik af mineaffaldet og en karakteristik af mørtlen. Nedenfor ses tabel 3.1 og tabel 3.2, som er oversigt over hvilke forsøgsemner, der er lavet forsøg på.

Tabel 3.1: Oversigt over karakteristikker af mineaffald

	Z mineaffald ¹	N mineaffald ²	Zk mineaffald ³	CEM II ⁴	KFA ⁵	Søsand ⁶
Kornstørrelsesfordeling	X	X	X	X	X	X
Ringknusning af mineaffald	X					
Vandopløselighed	X	X				
Glødetab	X	X				
pH og ledningsevne	X	X				
Carbonat indhold	X	X				
SEM analyse	X	X	X			
XRD analyse	X	X				

¹ Z Zinkgruvan

² N Nalunaq

³ Zk Zinkgruvan knust

⁴ CEM II BASIS cement Aalborg Portland

⁵ KFA Avedøreværket kulflyveaske

Tabel 3.2: Oversigt over karakteristikker af mørtel

Forsøg	RF	Z5	Z10	N5	N10	Zv5	Zv10	Nv5	Nv10	Zk5	Zk10
Tryktest	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Flydesætmål	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Afbindingsforløb	X	X	X	X	X						

3.1 Karakteristik af mineaffald

I dette afsnit præsenteres fremgangsmetoderne for karakteristik af mineaffald. Når mineaffaldet tilsættes i mørtel, er det vigtigt at kende til mineaffaldets kemiske og fysiske egenskaber, idet dette har indflydelse på mørtlens egenskaber og anvendelsesmuligheder.

Kornstørrelsesfordeling

Kornstørrelsesfordelingen bestemmes primært med det formål, at sammenligne mineaffaldets kornstørrelser med cement, søsand og flyveaske, samt for at undersøge om mineaffaldet kan agere som filler, når det indgår i mørtel. Kornstørrelsesfordelingen er undersøgt med laserdiffraktometer af typen Mastersizer 2000, efter at mineaffaldet har tørret i ovn ved 50 °C.

Mineaffald er undersøgt i tør tilstand, våd tilstand og våd med pepsikator, BASIS cement, kulflyveaske og Søsand 0-4 mm er undersøgt i tør tilstand.

Knusning af mineaffald

Ved de videre undersøgelser med mineaffaldet blev der valgt at undersøge mineaffaldet fra Zinkgruvan i knust tilstand. Ved knusning af mineaffaldet anvendes en ringknuser. Mineaffaldet tørres i ovn ved 50 °C, hvorefter det fyldes i ringknuseren. Mineaffaldet knuses i 30 sekunder ved 1100 rpm i ringknuseren Fritzch pulverisette 9. Et billede af ringknuseren ses på figur 3.1.



Figur 3.1: Ringknuser. Billede jf. Bonnerup og Sigvardsen [2014]

Vandopløselighed

Vandopløseligheden viser, om mineaffaldet indeholder kemiske forbindelser, der kan opløses i vand. Vandopløseligheden er bestemt i henhold til forsøgsvejledning i bilag A.1.

Vandindhold

Vandindholdet bestemmes ved at afveje tre prøver med mineaffald, og dernæst tørre dem i ovnen ved 105 °C. De tørre prøver kan dernæst vejes og vandindholdet i % kan bestemmes af nedenstående ligning:

$$v = \frac{m_{\text{våd}} - m_{\text{tør}}}{m_{\text{tør}}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Hvor:

- v er vandindholdet [%]
- $m_{\text{tør}}$ er den tørre masse [g]
- $m_{\text{våd}}$ er den våde masse [g]

Glødetab

Ved at bestemme mineaffaldets glødetab ved 550°C kan der opnås en indikation af, hvor meget organisk materiale prøven indeholder.

Glødetabet er bestemt i henhold til forsøgsvejledning i bilag A.2.

pH og ledningsevne

Mineaffaldets pH-værdi og ledningsevne er bestemt ved at tilsætte 12,5 mL demineraliseret vand til prøverne A, B og C hver med 5,0 g mineaffald. Dernæst stilles prøverne på rystebord i en time, hvorefter mineaffaldet bundfælder i 10 min. Ledningsevne og pH måles med en elektrode prøvernes væskefase.

Forsøgsvejledning til bestemmelse af pH og ledningsevne findes i bilag A.3

Carbonatindhold, volumetrisk

Carbonat indholdet i mineaffaldet kan bestemmes volumetrisk ved at tilsætte fortyndet saltsyre til prøver med mineaffald. Dette skyldes at en reaktion mellem carbonat og saltsyre danner vand, kuldioxid og metalioner. Til målingen benyttes et Scheibler apparat, som kan måle mængden af reageret carbonat ved at måle mængden af dannet kuldioxid.

Indledningsvis dannes en standardkurve med Scheibler apparaturet ved at afveje ren calciumcarbonat t i varierende mængder. Metoden anvendes dernæst på mineaffaldet, og ved sammenligning med standardkurven kan indholdet af calciumcarbonat bestemmes.

Måling og beregning af calciumcarbonat indhold er udført jf. forsøgsvejledning i bilag A.4

SEM analyse

SEM står for Scanning Electron Microscope, og er en metode til at lave billeder af små partikler, som forstørres med elektronmikroskop.

En lille prøve af mineaffaldet forberedes på en plade, som placeres i SEM instrumentet. SEM instrumentet virker, ved at det skanner prøvens overflade med elektroner, efter at der er dannet et vakuum inde i instrumentet. Elektronerne vil da interagere med atomerne i prøven og sende et signal tilbage til SEM instrumentet, som omdanner signalet til et foto af prøven.

XRD analyse

XRD står for X-ray diffractions, røntgendiffraktion. Formålet med en XRD analyse er at bestemme, hvilke mineraler der er i en prøve med knust materiale. Ved metoden anvendes et røntgendiffraktometer.

En meget lille prøve af mineaffaldet, der har tørret ved 50 °C, knuses til meget fint pulver, hvorefter det placeres i apparaturet efter anvisning. Ved metoden udsendes røntgenstråler mod prøven, røntgenstrålerne vil, når de rammer prøven, blive reflekteret tilbage i forskellige afbøjningsvinkler. Apparaturet indsamler intensiteten af de reflekterede røntgenstråler, hvorved der dannes et diffraktogram. Diffraktogrammet analyseres efterfølgende ved at sammenligne med andre diffraktogrammer af mineraler, og således bestemme hvilke mineraler der kan være tilstede i prøven. Til analysen af diffraktogrammet anvendes computerprogrammet X'Pert Highscore Plus.

Vejledning i anvendelse af X'Pert Highscore Plus findes i bilag A.6

Ved anvendelse af røntgendiffraktometer kan der være usikkerhed forbundet med resultaterne af analysen. Dette skyldes blandt andet, at man ved analysen kommer med et kvalificeret gæt på, hvilket mineral prøven indeholder ved at sammenligne med andre røntgendiffraktometer analyser af mineralerne i deres rene form. Af denne årsag bør der altid sammenlignes med anden litteratur, der kan underbygge resultaterne.

3.2 Oversigt over støbninger til tryktest

Tabel 3.3 viser en oversigt over hvilke støbninger, der i denne rapport danner grundlag for tryktest resultaterne. For hver type nævnt i oversigten knytter der sig tre prøver kaldet prøve A, B og C. For eksempel kaldes referenceprøverne fra etape 1 1 RF A, 1 RF B og 1 RF C.

Tabel 3.3: Oversigt over støbninger til tryktest

Etape	Støbedato	Typer	Beskrivelse	Afbindingstid
1	7 sep	RF.b Z5.b Z10.b N5.b N10.b	Vådt sand og vådt mineaffald	7
2	8 sep	RF.b Z5.b Z10.b N5.b N10.b	Vådt sand og vådt mineaffald	28
3	23 sep	RF Z5 Z10 N5 N10	Tørret sand og tørret mineaffald	28
4	26 sep	RF Z5 Z10 N5 N10	Tørret sand og tørret mineaffald	7
5	14 okt	RF Z5 Z10 N5 N10	Tørret sand og tørret mineaffald	14
6	26 okt	RF Zv5 Zv10 Nv5 Nv10	Støbning med optimeret vandindhold	14
7	3 nov	Zk5 Zk10	Knust mineaffald fra Zinkgruvan	7
8	3 nov	Zk5 Zk10	Knust mineaffald fra Zinkgruvan	14
9	17 dec	Zk5 Zk10	Knust mineaffald fra Zinkgruvan	28

3.3 Blanding af mørtel og støbning af prismer

I dette projekt undersøges mørtel med 5% og med 10% cementerstatning. I tabel 3.4 ses blandeforholdene for de forskellige typer af mørtelblandinger. Blanding af mørtel udføres jf. DS/EN 196-1 [2005]

For blanderecepter i de indledende forsøg med vådt mineaffald og vådt sand er anvendt proportioneringsmetoden til at bestemme hvor meget sand, demineraliseret vand og mineaffald der skal tilsættes for at opnå et samlet vandindhold på 225 g, et sandindhold på 1350 g og et indhold af mineaffald som vist i tabel 3.4.

For blanderecepter i de indledende forsøg med tørret sand og tørret mineaffald er anvendt 225 g demineraliseret vand og 1350 g søsand 0-4 mm. Den anvendte cement er CEM II: BASIS cement fra Aalborg Portland.

Tabel 3.4: Blanderecepter

Type	CEM II [g]	Mineaffald [g]
RF & RF.b	450	-
Z5 & Z5.b	427,5	22,5
Z10 & Z10.b	405	45
N5 & N5.b	427,5	22,5
N10 & N10.b	405	45
Zk5	427,5	22,5
Zk10	405	45

Proportioneringsmetoden

Til støbning af mørtelprismer med vådt sand og vådt mineaffald er det nødvendigt, at anvende proportioneringsmetoden til at bestemme hvor meget sand, vand og mineaffald, der skal tilsættes for at opnå det ønskede forhold mellem vand og cement. Dette skyldes, at sandet og mineaffaldet i forvejen indeholder vand, og det er derfor nødvendigt, at justere mængderne, der skal tilsættes, således at indholdet af mineaffald og sand stadig svarer til den masse i tør tilstand, som er opgivet i tabel 3.4.

Vandindholdet i mineaffaldet og sandet bestemmes fra våd tilstand på samme måde som beskrevet i afsnit 3.1.

Efterfølgende beregnes de justerede mål for mineaffald og sand ved hjælp af fremgangsmetoden beskrevet i bilag A.5.



Figur 3.2: Mixer fra Toni Industrie

Til blanding af mørtlen bruges en mixer fra Toni Industrie. Mixeren kan ses på figur 3.2.

Fremgangsmetode ved blanding af mørtel

1. Alle materialer afvejes og redskaber gøres klar. Der haves et stopur til at tage tid på mixeren.
2. Cement hældes i skålen og alt vandet tilsættes. I det øjeblik vandet tilsættes, startes mixeren på lav hastighed. Mixeren kører i 30 sekunder.
3. Sandet tilsættes i tidsperioden fra 0:30 til 1:00 minut.
4. Mixeren sættes på høj hastighed fra tiden 1:00 til 1:30 minutter. Dernæst stoppes mixeren.
5. Cementmørtel skrubes ned fra mixerens sider fra tiden 1:30 til 2:00 minutter.
6. Fra tiden 2:00 til 3:00 minutter er mixeren slukket.
7. Mixeren sættes på høj hastighed fra tiden 3:00 til 4:00 minutter. Hvorefter mørtlen er klar til støbning.



(a) Støbeform til mørtelprismer



(b) Støbte mørtelprismer

Figur 3.3: Forme til mørtelprismer

Til støbning af prizmer bruges støbeforme med plads til tre prizmer. De indvendige mål af støbeformenene er 160 mm i længden, 40 mm i bredden og 40 mm i dybden og lever derved op til kravene jf. DS/EN 196-1 [2005] Et billede af en af støbeformene og de færdige mørtelprøver kan ses på figur 3.3. Til at kompaktere mørtlen i formen anvendes et rystebord. Ved alle støbninger er anvendt et stort rystebord, som er vist på figur 3.4.

Fremgangsmetode ved støbning af prizmer

1. Før støbningen sikres, at formen er tilstrækkelig smurt med formolie.
2. Støbeformen placeres på rystebordet, og støbeformen fyldes halvt op med mørtel.
3. Rystebordets frekvens sættes på 55 Hz og kører i 20 sekunder.
4. Resten af mørtlen hældes i formen.
5. Rystebordets frekvens sættes på 55 Hz og kører i 20 sekunder. I løbet af de 20 sekunder fjernes overskydende mørtel med savende bevægelser ved hjælp af et glitterredskab, som er vist på 3.4.
6. Formen dækkes med tynd plastik og henstilles til afbinding.



(a) Stort rystebord



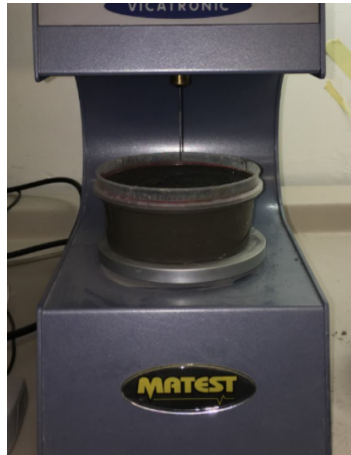
(b) Glitterredskab

Figur 3.4: Støbning af mørtelprismer

3.4 Afbindingsforløb

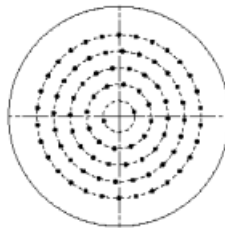
Afbindingsforløbet fastlægges som beskrevet i DS/EN 196-3 [2009]. Til forsøget er anvendt et vicatronic apparatur fra MATEST, manual for anvendelse af apparaturet findes i bilag A.7.

Frisk mørtel, som er fremstillet i henhold til DS/EN 196-1 [2005], hældes i en plasticform med en indvendig diameter på 75 mm. Mørtel hældes op til en streg langs med skålens kant, som markerer en opmålt indvendig højde på 40 mm. Mørtlen vibreres ud i formen, ved at banke formen ned i bordet nogle gange. Dernæst placeres prøven i vicatronic apparaturet, og målingen af afbindingstiden startes. Et billede af en mørtelprøve i Vicatronic apparaturet ses på figur 3.5.



Figur 3.5: Forsøgsopstilling for afbindingstid

Vicatronic virker, ved at en mekanisk styret nål programmeres til at stikke ned i mørtelprøven med 10 minutters mellemrum i et mønster, som er vist på figur 3.6. Efterhånden som mørtlen afbinder, vil nedsynkningsdybden for nålen blive mindre, og således registrerer vicatronic afbindingstiden for mørtlen. Når forsøget er færdig, kan der printes en bon med forsøgsdata for afbindingstiden.



Figur 3.6: Mønster for vikat efter EN 196-3 07-2005 jf. bilag A.7

3.5 Flydesætmål

Flydesætmålet bestemmes for cementmørtel, som er fremstillet i henhold til DS/EN 196-1 [2005]. Opmåling og udførsel af flydesætmålet er i henhold til DS/EN 1015-3 [1999].

Til forsøget anvendes et rystebord, en kegleform, stamper og glitteredskab, som kan ses på figur 3.7. Kegleformen har en højde på 40 mm og en indvendig diameter på 100 mm.

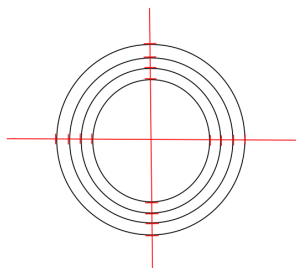


(a) Rystebord til flydesætmål (b) Værktøjer til flydesætmål

Figur 3.7: Forsøgsopstilling til flydesætmål

Flydesætmålet måles, ved at aflæse hvor langt ud til siderne mørtlen er flydt ud. Aflæsningen foretages på alle fire sider af prøven, og de to mål der ligger overfor hinanden lægges sammen, således at der opnås to flydesætmål per mørtelblanding. En illustration af flydesætmålet til aflæsning er vist på figur 3.8.

Pruceduren gentages to gange per mørtelblanding, så der i alt haves fire flydesætmål per mørtelblanding. Flydesætmålet er gennemsnittet af de fire mål.



(a) Måleretninger for flydesætmål (b) Flydesætmål for en mørtelblanding

Figur 3.8: Opmåling af flydesætmål

3.6 Trykprøvning af mørtelprismer

Trykprøvning foretages for at finde mørtlens trykstyrke, som er den last mørtelprismen maksimalt kan belastes med, før der sker brud.

Trykprøvning af mørtelprismer foretages jf. DS/EN 196-1 [2005]

Til trykprøvningen er anvendt en Toni 3000 trykprøvningsmaskine som vist på figur 3.9.



Figur 3.9: Forsøgsopstilling i Toni 3000

Før tryktesten kan påbegyndes måles mørtelprismernes højde, bredde og længde med en skydelære og prøvernes vejes, således at densiteten og tværsnitsarealet kendes før trykprøvningen.

Mørtelprismerne placeres i maskinen, som vist på figur 3.9, og belastes indtil brud. Toni 3000 viser brudkraften i newton, når bruddet er opnået. Hver af prøverne A, B og C trykkes i begge ender således, at der haves seks målinger af trykstyrken for hver type mørtelblanding. Trykstyrken kan dernæst beregnes, som beskrevet i afsnit 2.6.

Da oversiden af mørtelprismerne er mere ru end de andre sider, som følge af glitningen beskrevet i afsnit 3.3, sørges der altid for, at denne side ikke er i kontakt med stålpladerne.

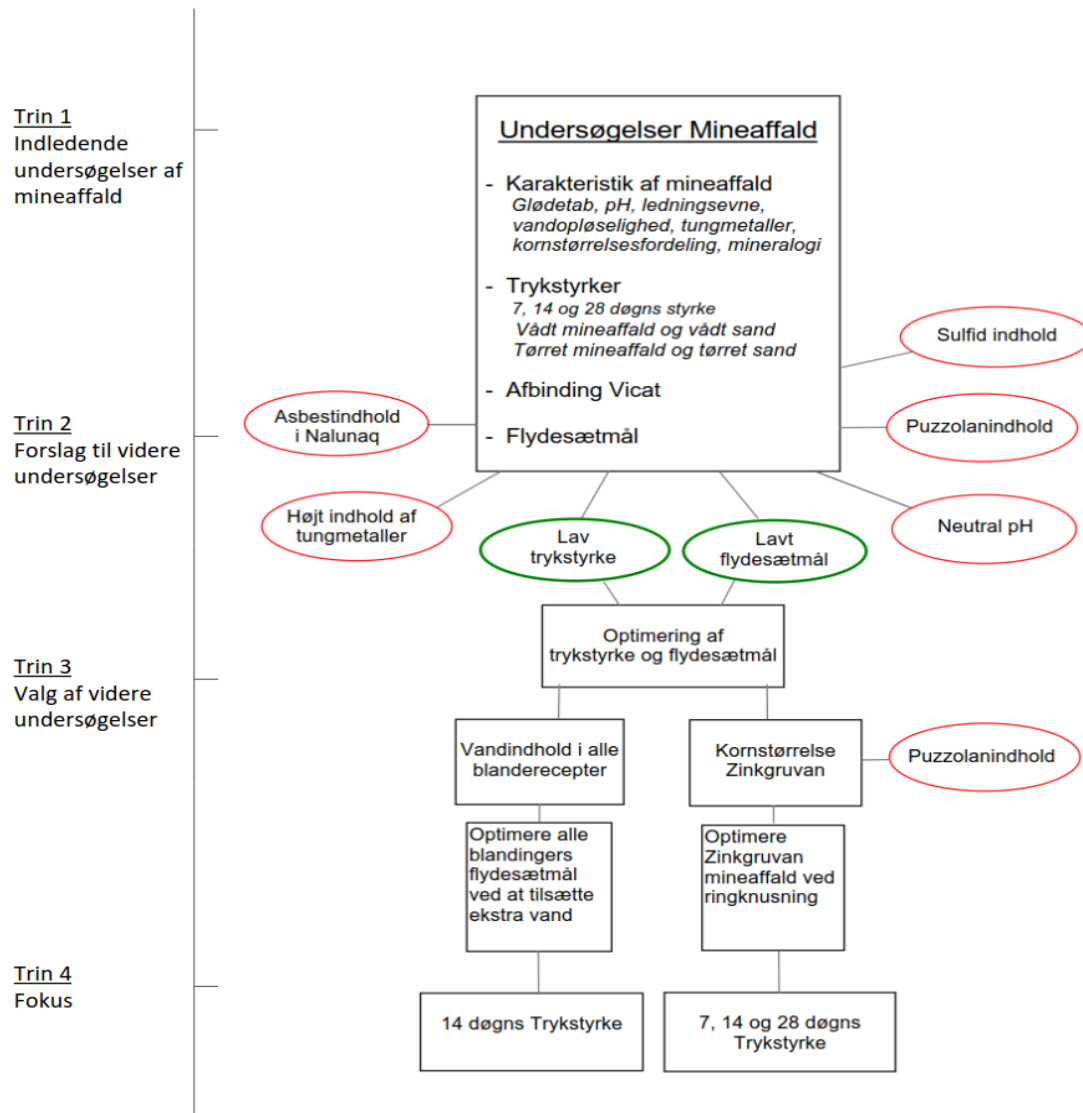
Når tryktest resultaterne kendes regnes det aritmetiske middelværdi for alle seks prøveresultater. Hvis én af test resultaterne varierer mere end $\pm 10\%$ fra middelværdien forkastes det ene testresultat, og den aritmetiske middelværdi for de resterende fem prøver beregnes. Hvis én af testresultaterne blandt de resterende fem prøver varierer mere end $\pm 10\%$ forkastes alle seks resultater [DS/EN 196-1, 2005].

[Blank side]

4 | Resultater og Diskussion

Dette afsnit er opdelt i fire trin, som aspejler den process, der under projektets forløb har givet projektet et fokus. På figur 4.1 ses denne process.

De firkantede bokse er de undersøgelser, der er lavet og cirklerne er de delkonklusioner, der kan drages på baggrund af undersøgelserne, hvoraf de grønne cirkler er dem der er valgt at arbejde videre med.



Figur 4.1: Processdiagram for projektet

4.1 Trin 1: Indledende undersøgelser

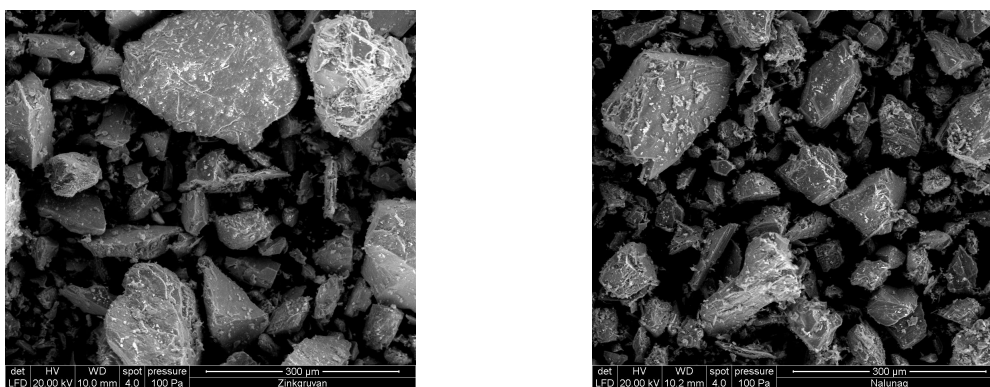
I trin 1 beskrives resultaterne fra de indledende undersøgelser. Resultaterne omfatter en karakteristik af mineaffaldet, trykstyrkemålinger for mørtelprismer med vådt sand, trykstyrkemålinger for mørtel med tørret sand, flydesætmål og afbindingsforløb.

4.1.1 Karakteristik af mineaffald

En karakteristik af mineaffaldet er en beskrivelse af dets egenskaber. Karakteristikken giver et indblik i mineaffaldets anvendelsesmuligheder i beton. I karakteristikken sammenlignes mineaffaldets egenskaber med egenskaber, der forefindes i BASIS cement fra Aalborg Portland, Søsand 0-4 mm og kulflyveaske fra Avedøreværket blok 1. Kulflyveasken fra Avedøreværket er godkendt til brug i beton [Sigvardsen, 2016].

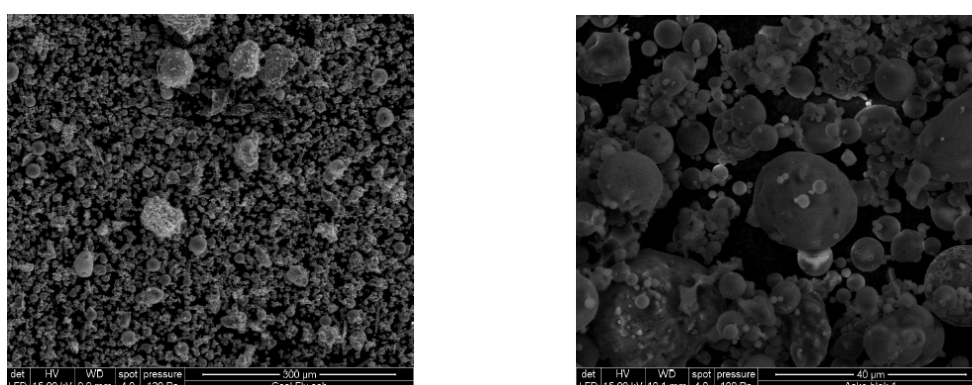
SEM analyse

Der er foretaget en SEM analyse af mineaffaldet fra Nalunaq og fra Zinkgruvan, med en forstørrelsesfaktor på 200. Resultaterne ses på figur 4.2. Til sammenligning ses en SEM analyse af kulflyveaske fra Avedøreværket forstørret 200 gange og 1500 gange på figur 4.3.



(a) Zinkgruvan mineaffald forstørret 200 gange (b) Nalunaq mineaffald forstørret 200 gange

Figur 4.2: SEM analyse af Zinkgruvan og Nalunaq mineaffald



(a) Kulflyveaske forstørret 200 gange (b) Kulflyveaske forstørret 1500 gange

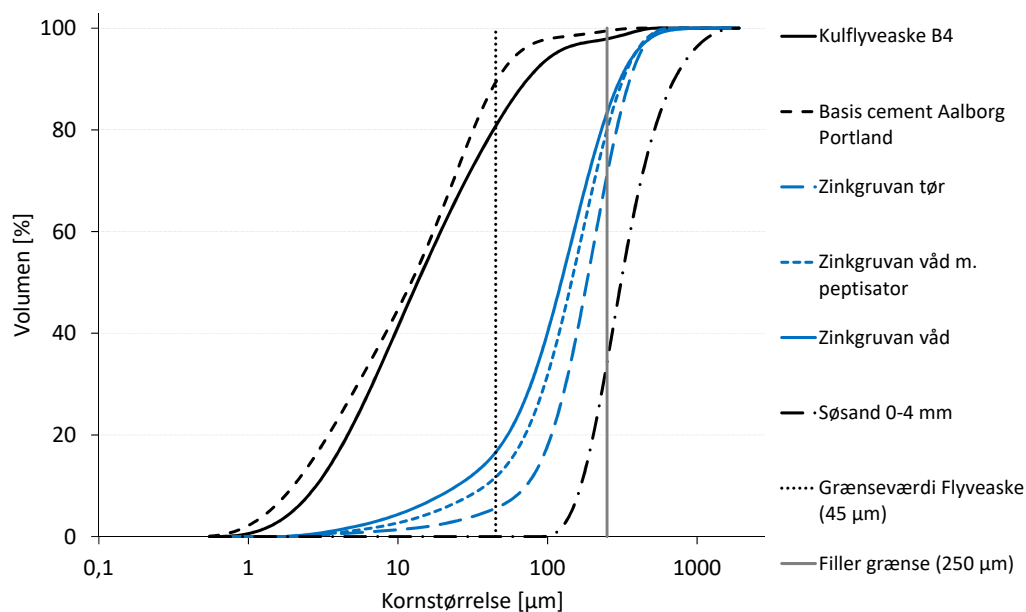
Figur 4.3: SEM analyse af KFA jf. Sigvardsen [2016]

Det ses, at kornene for mineaffaldet har en meget kantet struktur, hvilket skyldes, at materialet stammer fra knuste bjergarter [Dansk Betonforening, 2013]. Derudover ses det, at en del af kornene i begge prøver

med mineaffald har en flad og pladeligende struktur. Dette giver en større overflade i forhold til kornenes volumen, hvilket kan betyde, at kornene vil kræve ekstra meget cementpasta for at opnå en god bearbejdelighed. Det fremgår af figur 4.3, som viser en SEM analyse af kulflyveaske fra Avedøreværket, at der er stor forskel på kornstørrelsen, og kornformen, når der sammenlignes mellem mineaffald og kulflyveaske. Kulflyveaskens afrundede og væsentligt mindre korn vil give en langt mere bearbejdelig beton, end det forventes at være tilfældet for mineaffaldet.

Kornstørrelser

Kornstørrelsesfordelingen måles på de to typer mineaffald. Fordelingen af kornstørrelser måles i tør tilstand, våd tilstand og våd med pesisator. Pesisator har den egenskab, at den kan ophæve ladningerne mellem helt små lerpartikler i prøverne, således at lerpartiklerne kan identificeres med laser. Til sammenligning er kornstørrelserne målt på Kulflyveaske fra Avedøreværket, cement, og søsand. Rådata fra målingerne kan findes i bilag B.1.



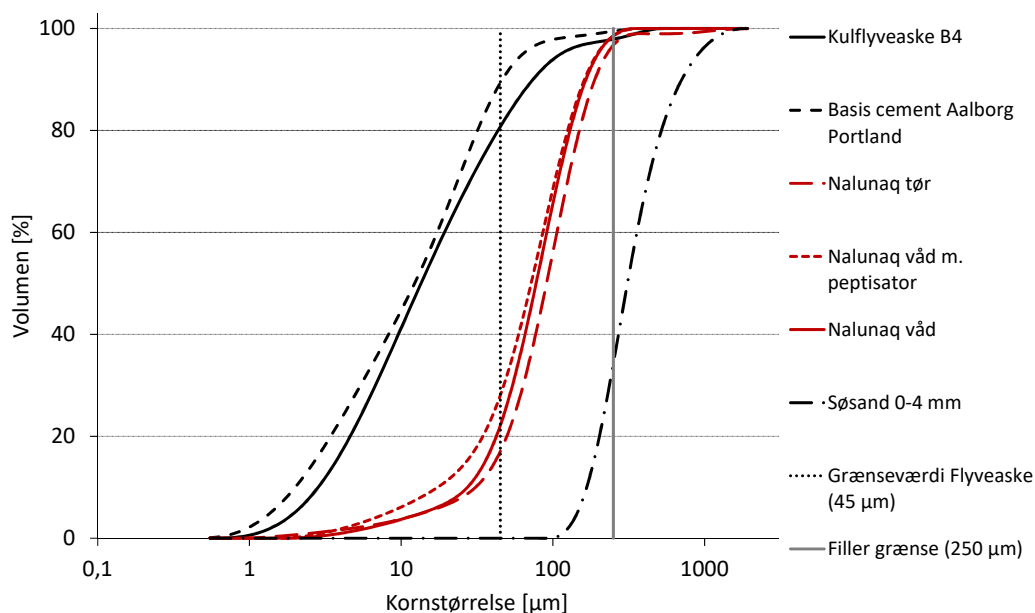
Figur 4.4: Kornstørrelsesfordeling for Zinkgruvan mineaffald

Grænseværdi for flyveaske jf. DS/EN 450-1 [2012] og grænseværdi for filler jf. Geiker et al. [2008]

Ved en sammenligning af kornstørrelserne for Zinkgruvan i våd tilstand, og våd med pesisator ses det, at der højest sandsynligt ikke er lerpartikler i mineaffaldet. Dette skyldes, at kurven for prøven med pesisator havde vist mindre kornstørrelser end prøven i våd tilstand, hvis der havde været lerpartikler i den. Kurverne for Zinkgruvan mineaffaldet ligner generelt mere søsandets kurve end kulflyveasken og cementen.

For at materialet skal kunne agere som filler, skal det være mindre end filler grænsen på 250 µm. Det ses, at mineaffaldet ikke overholder denne grænseværdi fuldstændigt, og det vil derfor være en fordel at knuse materialet, for at opnå finere korn.

Hvis mineaffaldets kornstørrelse skal svare til kornstørrelsen for flyveaske, skal det overholde kategori S eller kategori N, som begge er defineret ud fra en grænseværdi på 45 µm, og som er defineret i DS/EN 450-1 [2012]. For kategori N kræves, at maksimalt 40 % af kornene er større end 45 µm og for kategori S kræves, at maksimalt 12 % af kornene er større end 45 µm. Det ses, at Zinkgruvan mineaffaldet hverken overholder kategori S eller N, og mineaffaldets kornstørrelse kan derfor ikke svare til den for flyveaske.



Figur 4.5: Kornstørrelsesfordeling for Nalunaq mineaffald

Grænseværdi for flyveaske jf. DS/EN 450-1 [2012] og grænseværdier for filler jf. Geiker et al. [2008]

Af figur 4.5 fremgår det, at der kan være lerpartikler tilstede i prøven for Nalunaq mineaffald, idet kurven med peptisator viser en mindre kornstørrelse end de øvrige. Kornkurven ligner mere sand end kulflyveaske og cement, men har en langt større andel af finkornede partikler end sandet.

Nalunaq mineaffaldet overholder fillergrænsen på 250 µm, og har derfor et højere potentiale som filler end Zinkgruvan mineaffald. Dog overholder Nalunaq mineaffaldet hverken kategori S eller N for flyveaske kornstørrelse.

Glødetab, pH-værdier, ledningsevne og vandopløselighed

Tabel 4.1 viser forsøgsresultaterne for vandopløselighed, glødetab pH-værdier og ledningsevner. Resultaterne er sammenlignet med en godkendt kulflyveaske fra Avedøreværket [Sigvardsen, 2016] og cement [Kappel et al., 2017].

De målte data for glødetab, pH-værdier, ledningsevne og vandopløselighed kan findes i bilag B.2, B.3 og B.4.

Tabel 4.1: Data for glødetab, pH-værdi, ledningsevne og vandopløselighed

Forsøg	Enhed	Zinkgruvan	Nalunaq	KFA ¹	CEM II ²
Glødetab	%	0,3	0,2	2,3	7,0
pH	-	7,7	8,2	12,0	12,6
Ledningsevne	mS/cm	1,2	0,6	2,5	-
Vandopløselighed	%	0,9	0,8	1,2	-3,6

¹ Værdier for kulflyveaske jf. Sigvardsen [2016]

² Værdier for cement jf. Kappel et al. [2017]

Glødetab giver en indikation af indholdet af organisk materiale. Glødetabet er som forventet lavt for mineaffaldet. Kulflyveasken har et højere glødetab, hvilket skyldes, at der kan være et højt indhold af uafbrændt kul i flyveasken. Det høje glødetab for cementen skyldes, at der er carbonater i det kalkfiller, som er tilsat denne type af cement. Carbonaterne vil fordampe, når prøven opvarmes til 550 °C.

Der foretrækkes en høj pH-værdi, idet dette vil bidrage til at holde betonens korrosionsmiljø på et acceptabelt niveau. Begge typer mineaffald har en neutral pH-værdi, og vil derfor ikke bidrage positivt til betonens korrosionsmiljø. Nalunaq mineaffald vil her være at foretrække, da pH-værdien er en anelse højere.

Ledningsevnen beskriver hvor let mineaffaldet vil reagere med andre stoffer. Jo højere ledningsevne desto større risiko for uønskede reaktioner. Det ses, at de to typer mineaffald har en lav ledningsevne sammenlignet med kulflyveasken. En høj ledningsevne kan også give en indikation af, at der er puzzolaner i materialet. Det ses eksempelvis, at kulflyveasken har en højere ledningsevne, hvilket blandt andet skyldes dens indhold af puzzolaner.

Vandopløseligheden siger noget om, hvor mange procent af materialet, der kan opløses i vand. Det ses, at for prøverne med mineaffald, er mængden af det vandopløselige materiale stort set ikke eksisterende, mens det for kulflyveasken er lidt højere. Mineaffaldet forventes også at have en lav vandopløselighed, idet der ikke forventes at være en særlig høj andel af bjergarternes mineraler, som har vandopløselige forbindelser.

Indhold af tungmetaller

Før at mineaffaldet kan bruges i byggematerialer, er det vigtigt at tage stilling til dets indhold af tungmetaller. Dette skyldes, at et for højt indhold af tungmetaller i byggematerialer kan forurene miljøet, og det kan være sundhedsskadeligt for mennesker at opholde sig i nærheden af materialerne.

Indholdet af arsen, cadium, kobber, nikkel, bly og zink er målt ved hjælp af ICP. Data fra ICP'en for mineaffaldet fra Nalunaq og Zinkgruvan er hentet i artiklen af Jensen et al. [2016]. Dataene er sammenlignet med grænseværdier for indhold af tungmetaller i restprodukter til anvendelse i bygge- og anlægsarbejder jf. Miljøstyrelsen [2015].

Tabel 4.2: Indhold af tungmetaller i (mg/kg \pm std.afv) sammenlignet med kulflyveaske og grænseværdier for kategori 1 restprodukter

	Arsen	Cadium	Kobber	Nikkel	Bly	Zink
Zinkgruvan ¹	21 \pm 2	11 \pm 0,2	372 \pm 28	24 \pm 3	3700 \pm 233	7331 \pm 322
Nalunaq ¹	122 \pm 35	2,8 \pm 0,9	105 \pm 28	48 \pm 13	59 \pm 14	45 \pm 22
KFA ²	27,4 \pm 0,5	0,9 \pm 0,01	24,4 \pm 0,2	19,6 \pm 0,34	9,5 \pm 0,6	35,0 \pm 0,3
Grænse kategori 1³	0-20	0-0,5	0-500	0-30	0-40	0-500
Grænse kategori 2³	> 20	> 0,5	> 500	> 30	> 40	> 500

¹ jf. Jensen et al. [2016]

² jf. Sigvardsen [2016]

³ Grænseværdier jf. Miljøstyrelsen [2015]

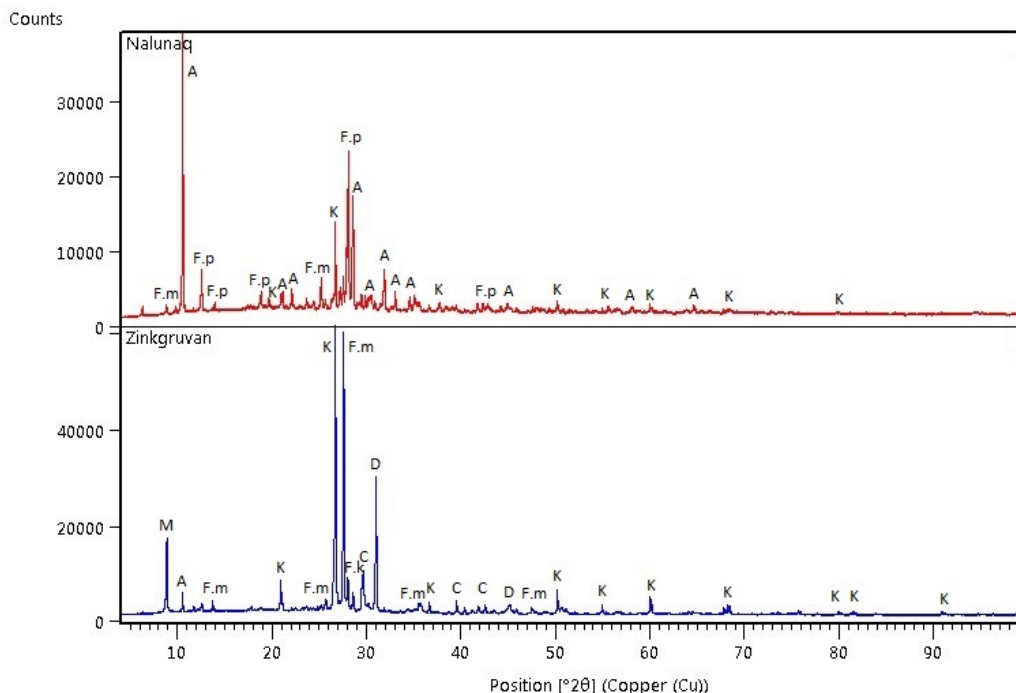
På tabel 4.2 ses det, at indholdet af tungmetaller generelt ikke overholder kategori 1 grænseværdier. Zinkgruvan mineaffaldet overholder dog grænseværdien for kobber og nikkel, mens Nalunaq mineaffaldet overholder grænseværdien for kobber og zink. Det ses, at KFA ikke overholder indholdet af arsen og cadium på trods af, at den er godkendt til anvendelse i beton.

Af tabel 4.2 fremgår det, at mineaffaldet overholder grænseværdierne for kategori 2. Ved sammenligning med grænseværdierne skal der gøres opmærksom på, at kravene kun gælder for slagge fra affaldsforbrændning, bundaske og flyveaske fra kulfyrede kraftværker samt forurenede jord. Da der endnu ikke er defineret grænseværdier for anvendelse af mineaffald til byggeri- og anlægsarbejder, er der valgt at sammenligne med grænseværdierne jf. Miljøstyrelsen [2015].

XRD analyse

Der er foretaget en XRD analyse med henblik på, at vurdere hvilke mineraler, der forefindes i de to prøver med mineaffald. Resultatet af XRD analysen ses på figur 4.6.

Til at underbygge resultaterne sammenlignes med relevant litteratur, der beskriver mineaffaldet og minernes geologiske forhold. Referencer: [Jensen et al., 2016], [Owen og Meyer, 2013] og [Lövgren et al., 2011].



Figur 4.6: Resultater fra XRD analyse. K-Kvarts, A-Amfibole, Ka-Kaolinit, F.m-Mikroklin Feldspat, F.p-Plagioklas Feldspat, C-Calcit, D-Dolomit, M-Muscovit
Counts står for intensiteten af røntgenstrålerne, når de rammer det enkelte mineral

Tabel 4.3: Indhold af mineraler ud fra XRD analyse sammenlignet med det i Jensen et al. [2016] beskrevne mineralindhold

	Z mineaffald	Jensen et al. ¹	N mineaffald	Jensen et al. ¹
Amfibole ($\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Si,Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)	X		X	✓
Calcit (CaCO_3)	X	✓		
Dolomit ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$)	X			
Feldspat, Mikroklin (KAlSi_3O_8)	X	✓	X	
Feldspat, Plagioklas ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)	X	✓	X	✓
Muscovit, $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F,OH})_2$	X			
Kvarts (SiO_2)	X	✓	X	✓

¹ Mineralindhold jf. Jensen et al. [2016]

Som det fremgår af figur 4.6, er det hvor intensiteten af røntgenstrålerne topper, at man kan identificere typen af det enkelte mineral. Den let bølgede struktur i bunden af diffraktogrammet er amorf materiale [Mindess et al., 2003]. Mængden af amorf materiale er lav for begge typer mineaffald og lavest for Zinkgruvan. Dette indikerer, at hvis der forefindes puzzolansk materiale, er indholdet generelt lavt.

Ud fra tabel 4.6 ses det, at resultaterne fra røntgendiffraktometer undersøgelsen bekræfter indholdet af mineraler jf. Jensen et al. [2016]. Nalunaq mineaffaldet viser sig, at have en mere simpel mineralogisk sammensætning end Zinkgruvan. Dette kan skyldes, at hovedåren er en kvartsåre, primært bestående af kvarts og urenheder i form af amfibolit [Secher et al., 2008].

På tabel 4.3 ses en oversigt over hvilke typer af mineraler, der er identificeret. Der sammenlignes med det i Jensen et al. [2016] beskrevne mineralindhold for de to typer mineaffald, som også er beskrevet i afsnit 2.1.

Indholdet af muscovit og amfibole i Zinkgruvan er også identificeret jf. Lövgren et al. [2011], hvorfor det vurderes at være korrekt, at der er en vis mængde af disse mineraler til stede.

Dolomit forefindes i værtsbjergarten for kobbermineralerne i Zinkgruvan jf. Owen og Meyer [2013].

Det antages, at der er god sandsynlighed for tilstedeværelsen af kalifeldspat i formen mikroklin feldspat i mineaffaldet fra Nalunaq. Dette skyldes, at feldspat under langsom afkøling vil udkrystallisere til to typer af feldspatter, hvoraf den ene vil være af formen plagioklas feldspat og den anden af formen kalifeldspat [Nelson, 2011]. Dette kræver dog antagelsen af, at bjergarten har været udsat for langsom afkøling, hvilket hverken har kunne bekræftes eller afkræftes gennem litteraturen.

Jf. Owen og Meyer [2013] er hovedåren kvartsholdig tuffit og kalksten for zink, bly og sølv forekomsten i Zinkgruvan. Tuffit indeholder mineralerne kvarts, mikroklin feldspat og biotit jf. [Owen og Meyer, 2013]. Tuffit består af ca. 25-75 % tuff, som er af pyroklastisk oprindelse, mens resten af bjergarten består af ikke-pyroklastisk materiale [LSU, 2016]. Tuff kan som nævnt i afsnit 2.7 indeholde puzzolaner. Som tabel 4.3 viser, er mineralerne kvarts og mikroklin feldspat identificeret i prøverne, men ikke biotit. Det vurderes derfor, at det ikke direkte kan konkluderes, om der er tuff i mineaffaldet fra Zinkgruvan.

Generelt forefindes amfibole mineraler i begge typer af mineaffald. Som forklaret i afsnit 2.1 kan amfibolemineralerne falde ind under kategorien asbest. Da det ikke er tilladt at anvende asbestholdige byggematerialer jf. Arbejdstilsynet [2005], bør det undersøges, om mineralerne hører inde under denne kategori.

Volumetrisk indhold af carbonat

Indholdet af carbonater er undersøgt volumetrisk, og de målte data for carbonatindholdet i mineaffaldet kan findes i bilag B.5.

Tabel 4.4: Indhold af carbonater i Nalunaq og Zinkgruvan mineaffald sammenlignet med kulflyveaske

	Zinkgruvan	Nalunaq	KFA ¹
Indhold af carbonat i % ± std.afv	10,6 ± 0,75	1,7 ± 0,11	1,5 ± 0,01 ¹

¹ Værdier for kulflyveaske jf. Sigvardsen [2016]

Det ses i tabel 4.4, at karbonatindholdet er højest for mineaffaldet fra Zinkgruvan. Dette skyldes indholdet af calcium karbonater, som mineralet calcit består af. Det vides jf. Jensen et al. [2016], at der er en vis mængde calcit til stede i mineaffaldet fra Zinkgruvan. Calcit kan bidrage til en højere reaktivitet, grundet dens indhold af karbonat, hvilket bekræfter, at ledningsevnen er højere for Zinkgruvan mineaffaldet, end den er for Nalunaq mineaffaldet, som blev fundet i afsnit 4.1.

Fordelen ved at tilsætte calcit i beton, er at det kan medvirke til at betonen bliver mere vandtæt, hvis calcit antages at agere ligesom kalkfiller, som har vandafvisende egenskaber [Herholdt et al., 1985]. Den øgede vandtæthed vil også forebygge karbonatisering, idet karbonatisering er afhængig af tilstedeværelsen af vand. Karbonatisering er uønsket i armeret beton, da det kan ødelægge korrosionsmiljøet. Karbonatisering er forklaret i afsnit 2.9.

4.1.2 Trykstyrker vådt sand og mineaffald

Indledningsvis i projektførløbet blev der eksperimenteret med tilsætning af vådt mineaffald og vådt sand ved blanding af mørtel. Mængderne, der tilsættes mørtlen, er fastlagt efter proportioneringsmetoden, som er beskrevet i afsnit 3.3. Blandingsproceduren er efter [DS/EN 196-1, 2005].

Data for blandeforholdene kan findes i bilag C.1 og data for trykstyrkerne kan findes i bilag C.2.

Ved en beregning af $\pm 10\%$ marginen for tryktest resultaterne efter metoden i DS/EN 196-1 [2005] beskrevet i afsnit 3.6, viste det sig, at flere prøveresultater afviger fra denne. I tabel 4.5 ses en oversigt over hvor mange prøver, der falder udenfor $\pm 10\%$ marginen.

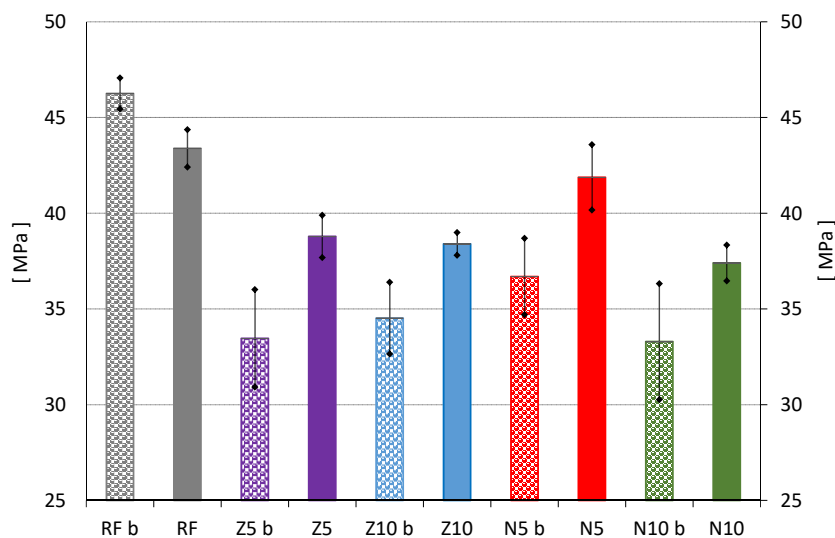
Tabel 4.5: Tryktest resultater for RF.b, Z5.b, Z10.b, N5.b, N10.b vurderet efter DS/EN 196-1 [2005]

Prøve	Trykstyrke $1 \pm \text{std.afv.}^a$	Forkastede prøver	Trykstyrke $2 \pm \text{std.afv.}^b$
RF.b	$46,3 \pm 0,8$	0	$46,3 \pm 0,1$
Z5.b	$33,5 \pm 2,6$	2	Udgår
Z10.b	$34,5 \pm 1,9$	1	$35,2 \pm 1,1$
N5.b	$36,7 \pm 2,0$	0	$36,7 \pm 2,0$
N10.b	$33,3 \pm 3,0$	4	Udgår

^a Aritmetrisk middel af de 6 tryktest resultater

^b Aritmetrisk middel af tryktest resultater når forkastede resultater udgår

Det ses, at spredningerne i tryktest resultaterne er for høje for Z5.b og N10.b, hvorfor tryktest resultaterne i princippet bør udgå. I den følgende del af afsnittet laves en sammenligning med tryktest resultaterne, der efterfølgende blev foretaget på mørtelprismer med tørret sand. Her er alle prøveresultaterne medregnet for at illustrere forskellen i at anvende tørret sand og vådt sand.



Figur 4.7: 7-døgn trykstyrker for RF.b, Z5.b, Z10.b, N5.b, N10.b holdt op imod RF, Z5, Z10, N5, N10

Som det fremgår af figur 4.7 er standardafvigelse generelt højere for prøverne med vådt sand og mineaffald. For Zinkgruvan mineaffaldet ses det, at trykstyrken er højere for Z10.b end for Z5.b, hvilket ikke var forventet.

De store standardafvigelser ved anvendelsen af vådt sand kan skyldes, at sandet var lagret i en container, hvorfor

vandindholdet kan variere fra det, der på forhånd var blevet målt med metoden jf. afsnit 3.1. Nogle af årsagerne til variationen i vandindholdet er:

- At sandet er blevet eksponeret for luft, således at vandet har fordampet fra de øverste lag af sand.
- At der blev foretaget en ny påfyldning af sand, efter at vandindholdet var blevet bestemt.

Det kan konkluderes, at vandindholdet har været svært styret, når der anvendes vådt sand og vådt mineaffald, hvorfor der i projektet blev valgt at arbejde med tørret sand og tørret mineaffald.

Vandindhold i søsand

For at sikre at vandindholdet i sandet lever op til kravet efter DS/EN 196-1 [2005], blev vandindholdet i det tørrede sand fra støberiet målt. Vandindholdet blev målt på tre forskellige tidspunkter, og værdierne fremgår af tabel 4.6. Målingerne af vandindholdet kan findes i bilag B.6.

Tabel 4.6: Vandindhold i sand med forskellige lagringstider ¹

Dato	Beskrivelse	Vandindhold [%]
20/9-2016	Udtaget fra bakke, ukendt lagringstid	0,12
19/10-2016	Udtaget fra bakke, lagret i 1 uge	0,04
3/11-2016	Udtaget fra bakke, lagret i 2 måneder	0,06

¹ I lagringsperioden blev prøverne med sand eksponeret for ilt ved overfladen. Prøverne var lagret i støberiet.

Det fremgår af tabel 4.6, at vandindholdet ikke overstiger 0,2 % for de i tabellen givne lagringstider, som også ligger inden for den periode, hvor der blev støbt. Det kan derfor konkluderes, at det tørrede sand kan bruges til støbning af mørtelprismer, idet det overholder kravet i DS/EN 196-1 [2005].

4.1.3 Flydesætmål

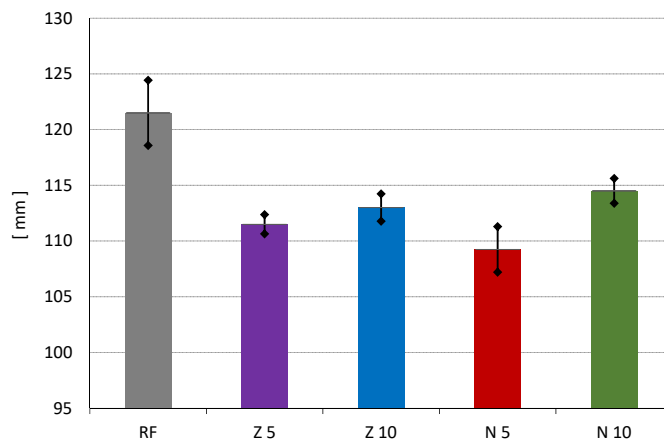
Flydesætmålene er målt jf. DS/EN 1015-3 [1999], og data for flydesætmålene kan findes i bilag D.1. I tabel 4.7 er vist en oversigt over flydesætmålene i mm og den %-vise afvigelse fra referencesætmålet.

Tabel 4.7: Flydesætmål for RF, Z5, Z10, N5, N10 sammenlignet med flydesætmål for KFA

Prøve	Flydesætmål [mm]	Afvigelse fra kontrol [%]
Kontrol jf. Sigvardsen ¹	156	-
KFA ¹	157	+ 1,0
Kontrol	122	-
Z5	112	- 8,2
Z10	113	- 7,0
N5	109	- 10,1
N10	115	- 5,8

¹ Flydesætmål målt jf. [Sigvardsen, 2016]

Hvis mørtlen skal have den optimale bearbejdelighed, er det nødvendigt, at flydesætmålet svarer nogenlunde til referencens flydesætmål. Som det fremgår af tabel 4.7, er den %-vise afvigelse fra referencen højere for flydesætmålene med mineaffaldet, end den er for KFA. Som det blev fundet i afsnit 4.1.1, er der stor forskel i kornformen mellem mineaffaldet og kulflyveasken, hvilket har stor indflydelse på bearbejdeligheden. Kulflyveaskens korn er afrundede, mens mineaffaldets korn har en flad og pladelignende struktur, hvorfor der kræves mere vand for at opnå en god bearbejdelighed ved anvendelse af mineaffaldet.



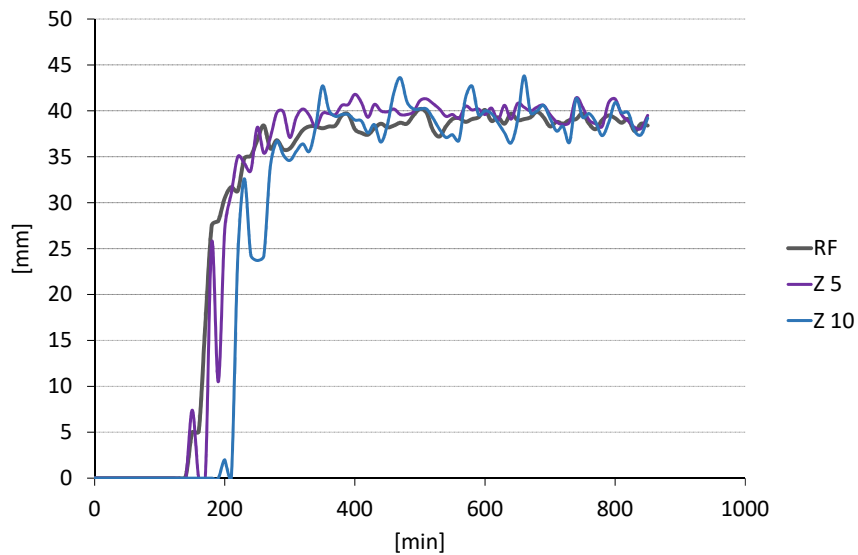
Figur 4.8: Flydesætmål for mørtelblandinger med mineaffald

Figur 4.8 viser, at flydesætmålet mindskes væsentligt, når der tilsættes mineaffald. Denne tendens kan forklares ved, at mineaffaldet absorberer mere vand end cementen, hvilket understøttes af Onuaguluchi og Eren [2012], hvor flydesætmålet for mørtel tilsat mineaffald fra en kobbermine blev undersøgt. Her blev det ligeledes fundet, at mineaffaldet havde en høj vandabsorption. Den øgede vandabsorption har højst sandsynligt været på grund af en højere porøsitet for mineaffaldet fra kobberminen, som kan have været en følge af nedbrydning fra vejrlig grundet oplagringsformen for mineaffaldet [Onuaguluchi og Eren, 2012].

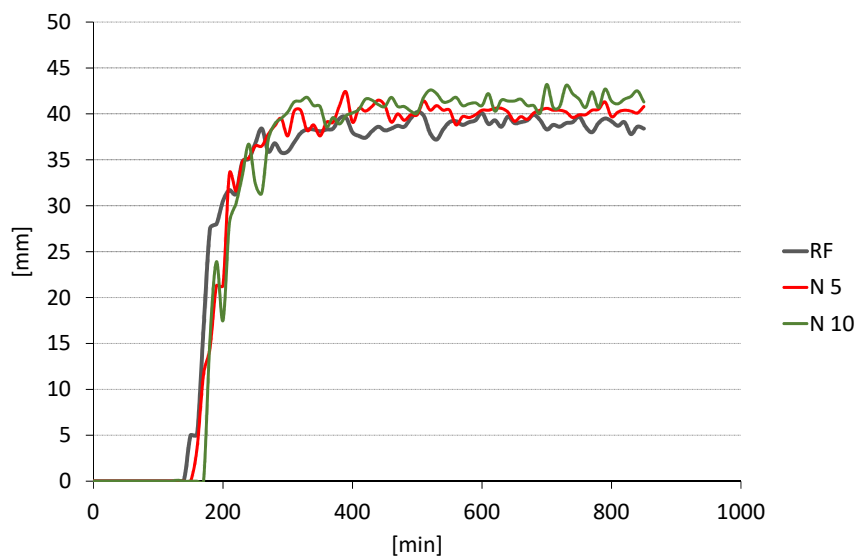
Det fremgår, at Z10 og N10 har et højere flydesætmål end Z5 og N5, hvilket ikke var forventet, idet en øget mængde af cement forventes at give en øget bearbejdelighed og derved et øget flydesætmål. Tendensen kan skyldes, at cementen suger vandet hurtigere end mineaffaldet. Dog er der ikke fundet teori, der kan understøtte dette.

4.1.4 Afbindingsforløb

Mørtlernes afbindingsforløb er blevet målt i henhold til DS/EN 196-3 [2009]. Afbindingsforløbet er målt på Z5, Z10, N5 og N10. De målte data for afbindingstiden kan findes i bilag E.1.



Figur 4.9: Afbindingsforløb for RF, Z5, Z10



Figur 4.10: Afbindingsforløb for RF, N5, N10

Betragtes figur 4.9, ses det, at der er stor forskel i afbindingsforløbet mellem RF og Z10, mens afbindingsforløbet for Z5 ligner bedre.

Figur 4.10 viser afbindingsforløbet for N5 og N10 holdt op imod RF. Det ses, at for N5 og N10 forsinkes den indledende afbinding i forhold til RF. Dette betyder, at det finkornede mineaffald fra Nalunaq ikke giver anledning til heterogen kimdannelse, som blev forklaret i afsnit 2.8. Heterogen kimdannelse ville have givet anledning til en øget hydratisering af klinkermineraleerne i cementen, og derved ville den accelerere afbindingen.

De store udsving i afbindingsforløbene kan skyldes, at overfladen ikke har været helt jævn for mørtlen. Dette hænger sammen med, at bearbejdeligheden forværres, når der tilsættes mineaffald, hvilket afsnit 4.1.3 også kan bekræfte.

Tabel 4.8: Indledende afbindingstid

Prøve	Indledende afbindingstid [min]	Afvigelse fra RF [%]
RF	150	-
Z5	150	0
Z10	220	+ 46,7
N5	170	+ 13,3
N10	180	+ 20,0

Tabel 4.9: Endelige afbindingstid

Prøve	Endelige afbindingstid [min]	Afvigelse fra RF [%]
RF	500	-
Z5	400	- 20,0
Z10	470	- 6,0
N5	390	- 22,0
N10	420	- 16,0

Sammenlignes den indledende afbindingstid for Z10 med RF, ses det, at afbindingstiden for Z10 er væsentligt forsinket. Ifølge Thomas [2007] forsinkes den indledende afbinding for mørtel tilsat flyveaske, hvis flyveasken har et højt indhold af kalcium. Derfor kan den sene afbinding for Z10 forklares ud fra dens indhold af kalcium karbonat. Dog er der andre steder i litteraturen, hvor der ikke er fundet en direkte sammenhæng mellem afbindingstiden og indholdet af kalcium karbonat [Hawkins et al., 2003].

Den indledende afbindingstid for CEM II/A-LL er jf. Aalborg Portland [2012] 165 minutter. Det fremgår af tabel 4.8, at den indledende afbindingstid for referenceprøven er i den lave ende, med en afvigelse på ca. 10 %. Der kan være flere forhold, som har haft indflydelse på dette, men da der måles i intervaller på 10 minutter, kan det være en del af forklaringen.

Betragtes de indledende afbindingstider for mineaffaldet sammenlignet med RF, ses det, at den indledende afbindingstid generelt forsinkes, når der tilsættes mineaffald. Denne tendens skyldes, at der er en mindre mængde cement i mørtlen, hvorfor den begyndende afbinding vil blive forsinket [Mindess et al., 2003].

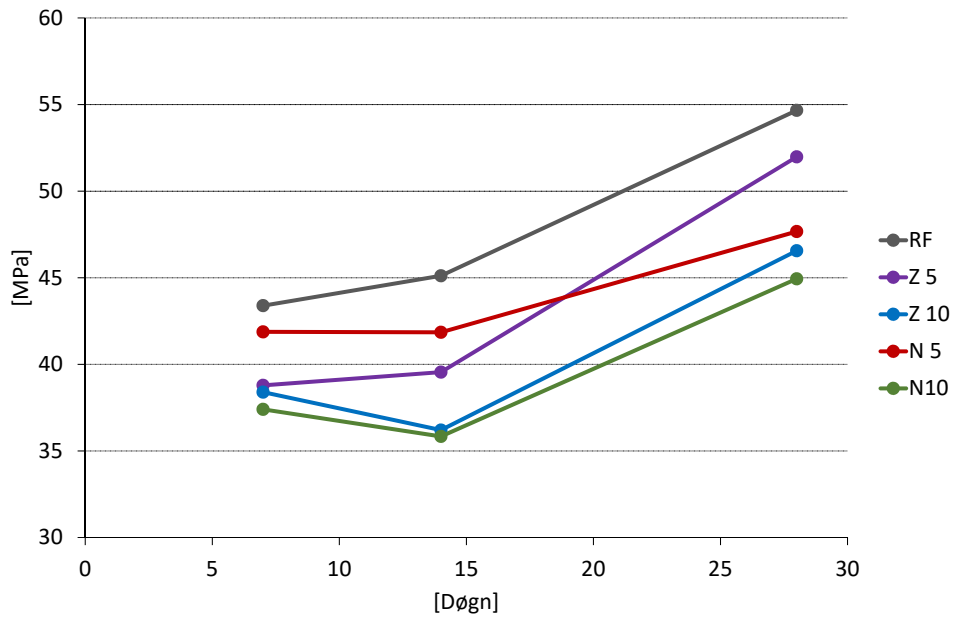
Ifølge standarden DS/EN 450-1 [2012] for flyveaske bør den indledende afbindingstid ikke overstige 2,25 gange referenceprøvens afbindingstid. Alle mørtelblandingerne overholder dette krav. Dog skal der gøres opmærksom på, at grænseværdien tager udgangspunkt i en mørtel med 25 % aske og 75 % cement, hvilket ikke er tilfældet for disse mørtelblandinger.

Der kan generelt observeres en stor spredning i de endelige afbindingstider for blandingerne med mineaffald. Dette kan skyldes, at mineaffaldet gør mørtlen mindre bearbejdelig, hvorfor der opnås en ujævn overflade af prøveblandingerne.

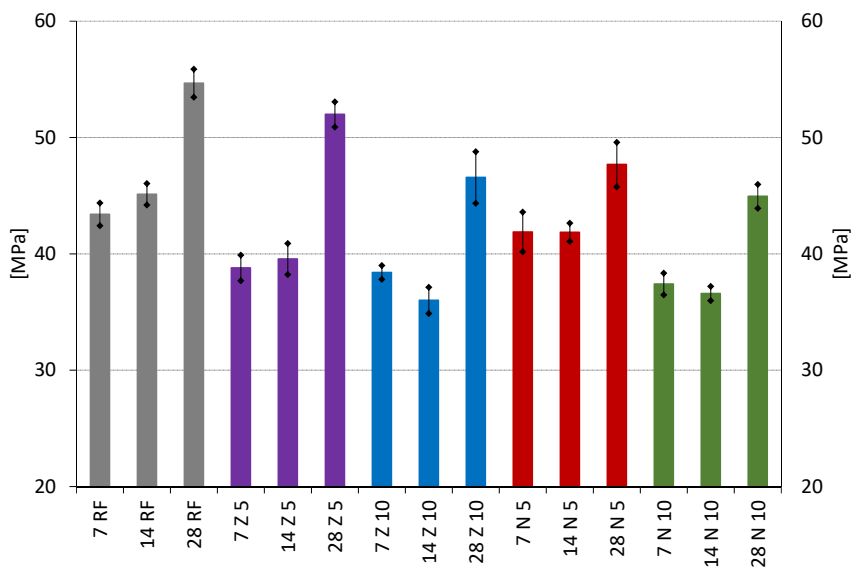
Som vist i afsnit 2.3 er det når cementen er afbundet, at den begynder at udvikle styrke. Det ses, at den endelige afbinding foregår hurtigere for mørtelblandingerne med mineaffald, hvorfor det må forventes, at styrkeudviklingen vil begynde tidligere for disse.

4.1.5 Målte trykstyrker tørret sand og tørret mineaffald

Da det i afsnit 4.1.2 blev fundet, at anvendelsen af tørret sand og tørret mineaffald lever op til kravene i DS/EN 196-1 [2005], er der i resten af projektets forløb valgt at anvende tørret sand og tørret mineaffald til alle støbninger. Figur 4.11 viser styrkeudviklingsforløbet for mørtelprismer med tørret sand og tørret mineaffald baseret på måling af trykstyrker for prismen, der er hydratiseret 7, 14 og 28 døgn. De målte trykstyrker kan findes i bilag C.2.



Figur 4.11: Styrkeudvikling for RF, Z5, Z10, N5, N10



Figur 4.12: Trykstyrker for RF, Z5, Z10, N5, N10 med standardafvigelse

Det fremgår af figur 4.11, at trykstyrkerne bliver lavere, når mængden af mineaffald i mørtelprismerne øges.

Ved en sammenligning af Z5 og N5 ses det, at styrken er højest for N5 ved 7 døgn, mens styrken for Z5 er lavest. Denne sammenhæng kan skyldes, at mineaffaldet fra Nalunaq overholder fillergrænsen, mens mineaffaldet fra Zinkgruvan ikke gør. Efter 28 døgn er styrken for Z5 højere end den er for N5, hvilket kan skyldes, at mineaffaldet fra Zinkgruvan er mere reaktivt end mineaffaldet fra Nalunaq. En mulig forklaring på denne tendens kan være, at Zinkgruvan måske indeholder puzzolaner, idet puzzolaners bidrag til en øget trykstyrke først kommer til udtryk senere i styrkeudviklingsforløbet, som beskrevet i afsnit 2.7. Derudover blev det fundet i afsnit 4.1, at Zinkgruvan mineaffaldet har en højere reaktivitet, hvorfor dette også kan indikere et indhold af puzzolaner.

N10 har en lavere styrke end Z10 i begyndelsen af styrkeudviklingsforløbet, hvilket ikke var forventet, da filleregenskaberne ved Nalunaq mineaffaldet er bedre end for Zinkgruvan mineaffaldet. Det ses, at styrken for både N10 og Z10 er lavere for 14 døgns prøverne end for 7 døgns prøverne, hvilket heller ikke var forventet. Dog fremgår det af figur 4.12, at forskellen mellem 7-døgns og 14-døgns prøverne ikke er stor, hvorfor det vurderes, at forskellen i styrken skyldes, at mineaffaldet ikke har en særlig god bearbejdelighed, hvilket også kan ses på flydesætmålene i afsnit 4.1.3. Det ses, at 28-døgns trykstyrkerne for N10 og Z10 afviger mindre fra RF end 14-døgns trykstyrken, hvorfor det vurderes, at begge typer af mineaffald ikke forringer styrken væsentligt. Det fremgår desuden at kurven for Z10 er mere stejl end for N10, hvilket kan skyldes et eventuelt indhold af puzzolaner i mineaffaldet fra Zinkgruvan.

4.1.6 Teoretiske trykstyrker tørret sand og tørret mineaffald for 7-døgns prøver

Tryktest resultaterne sammenlignes med de teoretiske trykstyrker, som er beregnet ved hjælp af Bolomeys formel defineret i afsnit 2.6.

Tabel 4.10: Teoretiske trykstyrker sammenlignet med målte trykstyrker for 7-døgns prøver - for RF, Z5, Z10, N5 og N10

Prøve	v/c-forhold [-]	Teoretisk trykstyrke ¹ [MPa]	Målt trykstyrke [MPa]	Afvigelse [%]
RF	0,50	36,4	43,4	+ 16,1
Z5	0,53	33,8	38,8	+ 12,9
Z10	0,56	31,2	38,4	+ 18,7
N5	0,53	33,8	41,9	+ 19,3
N10	0,56	31,2	37,4	+ 16,6

¹ Teoretisk trykstyrke beregnet vha. Bolomeys formel

Som det fremgår af tabel 4.10, er de målte trykstyrker generelt højere end de teoretiske. Her skal der dog gøres opmærksom på, at de anvendte konstanter i Bolomeys formel er baseret på beton med sand og søsten, hvor der for mørtlen kun er anvendt sand. Det er derfor forventet, at den målte trykstyrke bliver højere end den teoretiske.

Cementstyrken for CEM II A/LL er målt i henhold til DS/EN 196-1 til at være 50 MPa [Aalborg Portland, 2012]. Sammenlignes trykstyrken for referenceprøven med denne, ses en afvigelse på -15 %. Resultaterne fra tryktesten vurderes derfor til at være realistiske men generelt til at ligge i den lave ende.

Det fremgår af tabel 4.10, at v/c-forholdet stiger, når der tilsættes mindre cement og mere mineaffald. Et højere v/c-forhold forventes at give en lavere styrke, og det fremgår af tabel 4.10, at forsøgsresultaterne bekræfter dette.

I tabel 4.10 er v/c forholdet regnet ud fra den antagelse, at mineaffaldet ikke suger vand. v/c-forholdet beregnes på baggrund af mængden af frit tilgængeligt vand, og da flydesætmålene viser, at mineaffaldet suger mere vand end cementen, vil dette også betyde, at v/c-forholdet i teorien bør reduceres ud fra den mængde vand, som mineaffaldet absorberer. Det kan derfor diskuteres, om v/c-forholdet i virkeligheden reduceres, og om denne

reduktion har en betydning for styrkeudviklingen af mørtelblandingerne.

4.2 Delkonklusion for indledende undersøgelser

SEM analysen af mineaffaldet sammenlignet med kulflyveasken viser, at mineaffaldet har en mere kantet og pladelignende struktur, hvilket kan gøre mørtlen mindre bearbejdelig end mørtel med kulflyveaske.

Kornstørrelsesfordelingen for Zinkgruvan viser, at der ikke forefindes lerpartikler i mineaffaldet, samt at kornkurven minder mest om søsandet. Kornstørrelsen overholder ikke fillergrænsen for fint tilslag på 250 μm . Kornstørrelsesfordelingen for Nalunaq viser, at mineaffaldet overholder fillergrænsen på 250 μm . Ingen af de to typer mineaffald overholder grænseværdien for flyveaske kornstørrelse, som er defineret i DS/EN 450-1 [2012].

Glødetabet er som forventet lavt for begge typer af mineaffald. pH-værdien er neutral, hvilket indikerer, at mineaffaldet ikke vil bidrage positivt til betonens korrosionsmiljø. Ledningsevnen er højere for Zinkgruvan mineaffaldet end for Nalunaq mineaffaldet, men sammenlignet med kulflyveasken har begge typer mineaffald en lav ledningsevne.

ICP-data viser, at indholdet af tungmetaller overstiger grænseværdierne for kategori 1 affald til anvendelse i bygge- og anlægsarbejder jf. Miljøstyrelsen [2015].

Gennem resultaterne fra XRD-analysen kan det bekræftes, at de mineraler der er beskrevet jf. Jensen et al. [2016], forefindes i mineaffaldet. Derudover blev der fundet muscovit, amfibole og dolomit i Zinkgruvan mineaffaldet. Der kan være tuffit tilstede i mineaffaldet fra Zinkgruvan, idet mineralerne kvarts og mikroklin feldspat blev identificeret. Mikroklin feldspat blev identificeret i mineaffaldet fra Nalunaq, hvilket kan skønnes at være rimeligt, når det antages, at bjergarten har været udsat for langsom nedkøling ved udkrystalliseringen af feldspat.

Det volumetriske indhold af karbonat blev fundet til ca. 10,6 % for Zinkgruvan mineaffaldet, og ca. 1,7 % for Nalunaq mineaffaldet. Det øgede indhold af karbonat i Zinkgruvan mineaffaldet skyldes dens indhold af calcit.

Trykstyrkerne for vådt sand og mineaffald giver store spredninger, hvorfor det kan konkluderes, at vandindholdet bliver sværere at styre, når der tilsættes vådt sand og vådt mineaffald til mørtlen. Dette skyldes primært måden hvorpå sandet er oplagret.

Da det blev fundet, at vandindholdet i mørtlen er svært at styre, når der tilsættes vådt mineaffald og vådt sand, blev det undersøgt, om der kan bruges tørret sand til støbningerne. Sandets vandindhold blev derfor undersøgt, og det viser sig, at det lever op til kravet på maksimalt 0,2 %, som er defineret i DS/EN 196-1 [2005]. Det blev ligeledes fundet, at spredningerne for tryktest resultaterne bliver lavere, når der tilsættes tørret mineaffald og tørret sand.

Flydesætmålene bliver mellem 5-10 % lavere ved tilsætning af mineaffald. Dette indikerer, at mineaffaldet suger mere vand end cementen. En sammenligning med flydesætmålet for KFA indikerer, at kulflyveaske giver en bedre bearbejdelighed end mineaffald.

Generelt forsinkes den indledende afbindingstid, når der tilsættes mineaffald, hvilket også kan forventes, da mængden af cement reduceres. Indholdet af calcit i mineaffaldet fra Zinkgruvan kan have indflydelse på, at den indledende afbinding forsinkes for Z10. Dog har litteraturen både kunne påvise og modbevise denne sammenhæng.

Det kan generelt konkluderes, at trykstyrken forværres desto mere af cementen der udskiftes med mineaffald. Trykstyrken for N5 viser, at fillerensgskaberne for mineaffaldet fra Nalunaq bidrager til en høj trykstyrke tidligt i styrkeudviklingsforløbet. Senere i styrkeudviklingsforløbet har Z5 en højere styrke, hvilket kan skyldes, at mineaffaldet fra Zinkgruvan måske indeholder puzzolaner. Der ses ingen nævneværdig forskel i trykstyrken mellem N10 og Z10, hvilket kan skyldes, at mineaffaldet generelt ikke har en god bearbejdelighed.

4.2.1 Trin 2: Forslag til videre undersøgelser

Ud fra de indledende undersøgelser i trin 1 har følgende undersøgelser vist sig at være interessante at arbejde videre med:

- **Asbestindhold:** Gennem XRD-analysen blev det fundet, at der er amfibole mineraler til stede i begge typer af mineaffald. Det bør derfor undersøges, om disse mineraler hører inde under kategorien asbest, da det ikke er tilladt at anvende asbestholdige produkter i byggematerialer.
- **Indhold af tungmetaller:** Indholdet af tungmetaller i mineaffaldet lever ikke op til grænseværdierne for kategori 1 affald til anvendelse i bygge- og anlægsarbejder jf. Miljøstyrelsen [2015]. Det er derfor relevant at undersøge, hvorledes tungmetallerne kan fjernes fra mineaffaldet, og hvilken effekt det har på betonen, at tungmetalindholdet reduceres.
- **Puzzolanindhold:** Resultatet af XRD analysen og resultatet for styrkeudviklingsforløbet indikerer et muligt puzzolanindhold i mineaffaldet fra Zinkgruvan. Det vil derfor være interessant at bekræfte/afkræfte dette gennem nye undersøgelser.
- **pH-værdi:** Begge typer mineaffald har en neutral pH-værdi, og vil derfor ikke bidrage positivt til betonens korrosionsmiljø. Det er derfor relevant at undersøge, hvor stor en effekt mineaffaldet har på betonens korrosionsmiljø.
- **Sulfid indhold:** Som forklaret i afsnit 2.1 er der en vis mængde sulfid tilstede i mineaffaldet fra Zinkgruvan. Sulfid vil ved oxidering omdannes til sulfat og H^+ dvs. svovlsyre, hvilket giver en lavere pH-værdi og dermed et forværret korrosionsmiljø. Det vil derfor være interessant at undersøge, om sulfid indholdet i mineaffaldet fra Zinkgruvan er problematisk for betonen.
- **Lavt flydesætmål:** Ved undersøgelsen af bearbejdigheden blev det fundet, at flydesætmålet er lavt sammenlignet med referencen, når der tilsættes mineaffald. Dette indikerer, at mineaffaldet absorberer mere vand end cementen, hvilket også forværre bearbejdigheden. Det kan derfor være interessant at undersøge, om bearbejdigheden kan forbedres ved at tilsætte mere vand eller ved at knuse mineaffaldet.
- **Lav trykstyrke:** Det blev fundet, at trykstyrken ikke forbedres, når der tilsættes mineaffald. Da bearbejdigheden ikke er god for begge typer mineaffald, kunne det være interessant at undersøge, om trykstyrken kan forbedres, når bearbejdigheden forbedres.

4.2.2 Trin 3: Valg af videre undersøgelser

Ud fra trin 2 er det besluttet at arbejde videre med punkterne 'lavt flydesætmål' og 'lav trykstyrke'. Da bearbejdigheden har indflydelse på trykstyrken, er der valgt at undersøge om en optimeret bearbejdighed for mørtelblandingerne med mineaffald kan bidrage til en højere trykstyrke. Til optimering af bearbejdigheden er valgt at undersøge vandindholdet og kornstørrelsen, hvilket uddybes i de følgende to problemstillinger:

Optimering af vandindhold

Det blev fundet, at flydesætmålet bliver reduceret op mod 10 % ved at erstatte noget af cementen med mineaffald. Dette betyder også, at bearbejdigheden forværres, og da mørtlen med mineaffald generelt opfattedes som tør, vurderes det, at bearbejdigheden vil kunne forbedres ved at tilsætte mere vand, således at der opnås et flydesætmål svarende til referenceblandingen.

Som forklaret i afsnit 2.3 kan vandindholdet have en betydning for hydratiseringen af cementklinkerne, idet et for lavt v/c-forhold kan føre til en ufuldstændig hydratisering. Da det blev fundet, at mineaffaldet har en højere vandabsorption end cementen, vil det have betydning for mængden af frit tilgængeligt vand, hvorfor der er risiko for en ufuldstændig hydratisering. En ufuldstændig hydratisering vil betyde, at styrkeudviklingen bliver ufuldstændig. Dog kan der delvis kompenseres for dette, ved at lade mørtlen hærde under vand, som forklaret i afsnit 2.3.

Optimering af kornstørrelse

Da det blev fundet, at kornstørrelsen for Zinkgruvan ikke overholder fillergrænsen, vurderes det at være relevant at undersøge, om trykstyrken kan forbedres ved at knuse mineaffaldet i en ringknuser og derved opnå en

mindre kornstørrelse. Det forventes, at trykstyrken derved vil kunne forbedres, idet det vides, at materialer der overholder fillergrænsen, vil kunne bidrage til en højere trykstyrke som forklaret i afsnit 2.8. Ringknuseren som anvendes til at knuse mineaffaldet er præsenteret i afsnit 3.1.

4.3 Trin 4: Fokus på optimering af trykstyrke og bearbejdelighed

I dette afsnit præsenteres resultaterne fra de videre undersøgelser, hvor der blev lagt fokus på optimering af bearbejdelighed og trykstyrke.

I den første undersøgelse optimeredes flydesætmålet for alle mørtelblandinger, ved at tilsætte vand indtil flydesætmålet svarede til det for referencen. Optimeringens indflydelse på trykstyrken blev dernæst undersøgt ved tryktest på 14-døgns prøver med det optimerede vandindhold. I den anden undersøgelse optimeredes kornstørrelsen for mineaffaldet fra Zinkgruvan ved ringknusning og styrkeudviklingsforløbet blev bestemt for 7-,14- og 28-døgn.

4.4 Optimering af vandindhold

Flydesætmålene blev optimeret ved at tilsætte den mængde vand, der gav et flydesætmål svarende til referencen. Data fra optimeringsforløbet og de endelige flydesætmål kan findes i bilag D.2.

Tabel 4.11: Optimeret flydesætmål og procentvis afvigelse fra RF

Prøve	Tilsat mineaffald [g]	Oprindeligt flydesætmål \pm std.afv. [mm]	Ekstra vand [g]	Optimeret flydesætmål \pm std.afv. [mm]
RF	0	122 \pm 2,9	0	-
Z5	22,5	112 \pm 0,9	+ 15	121 \pm 0,9
Z10	45,0	113 \pm 1,2	+ 16	122 \pm 2,6
N5	22,5	109 \pm 2,0	+ 19	123 \pm 3,1
N10	45,0	115 \pm 1,1	+ 13	123 \pm 1,6

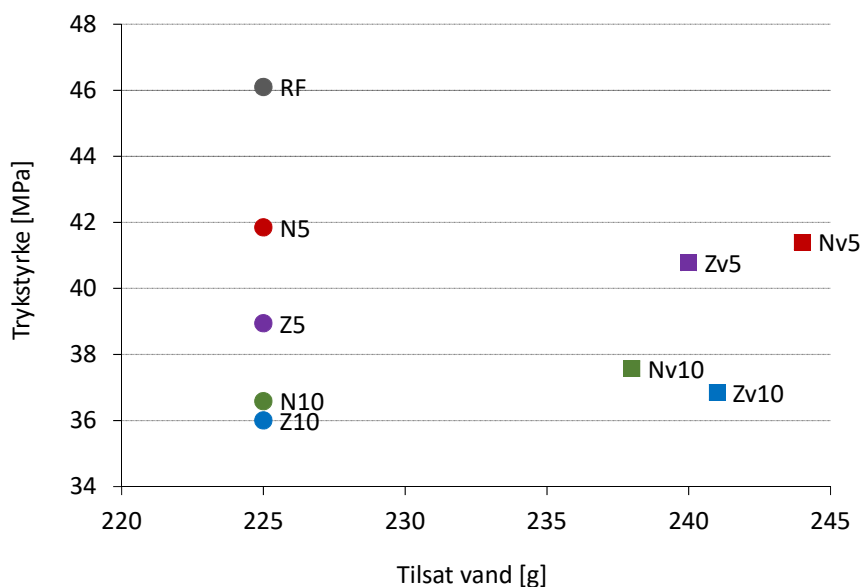
De optimerede flydesætmål fremgår af tabel 4.11. Det fremgår, at der ikke er en direkte sammenhæng mellem typen af mineaffald og den mængde vand, mineaffaldet optager. Derudover er der stor forskel mellem mængden af vand, der skal tilsættes N5 og N10, mens der er mindre forskel mellem Z5 og Z10.

Jf. afsnit 2.5 vil en større kornstørrelse kræve mindre vand, hvorfor det er forventet, at mineaffaldet fra Zinkgruvan absorberer mindre vand end mineaffaldet fra Nalunaq. Dog ses der ingen tydelig sammenhæng mellem den ekstra mængde tilsat vand og kornstørrelsen i dette tilfælde. Som forklaret i afsnit 4.1.3 kan forklaringen bag, at blandingerne med 5 % udskiftning absorberer mere vand end blandingerne med 10 % udskiftning skyldes, at cementen absorberer vandet hurtigere end mineaffaldet. Dog er der ikke fundet teori, som kan understøtte tendensen.

Ud fra en praktisk betragtning kan det konkluderes, at bearbejdeligheden forbedres, når flydesætmålet optimeres. Dette skyldes, at mørtlen generelt følte tør og var svær at få ud af skålen til mixeren, før flydesætmålet var blevet optimeret.

Trykstyrker for optimerede prøver

For at undersøge om trykstyrken forbedres, når flydesæt målet optimeres, bestemmes 14-døgns trykstyrken for de optimerede mørtelblandinger. Blandeforholdene for støbningerne fremgår af bilag C.1 og tryktest resultaterne fremgår af bilag C.2.



Figur 4.13: 14-døgns trykstyrker for Zv5, Zv10, Nv5, Nv10 givet ved vandindhold sammenlignet med RF, Z5, Z10, N5, N10 givet ved vandindhold

Som det fremgår af figur 4.13, bliver styrken forbedret, når flydesæt målet forbedres for blandingerne med mineaffald. Dette med undtagelse af N5, hvor trykstyrken bliver en smule lavere for Nv5. Den generelle tendens til øget trykstyrke ved optimeret bearbejdelighed kan understøttes af undersøgelserne lavet på mørtel med mineaffald fra en kobbermine [Onuaguluchi og Eren, 2012]. I den undersøgelse var der tilsat den mængde vand, som svarer til mineaffaldets vandabsorptionsevne, og de målte trykstyrker viste en forøget trykstyrke sammenlignet med den ikke-optimerede mørtel.

Den øgede trykstyrke kan forklares ud fra følgende to forhold:

- *Bearbejdelighed:* Ved en øget bearbejdelighed vil det det være muligt at opnå en tættere komprimering af mørtlen, hvorfor der kan være større chance for at eventuelle luftbobler vibreres ud. Hvis den øgede mængde af tilsat vand bliver for høj, vil det dog også give et øget v/c-forhold, som forventes at give en højere porøsitet og derved en lavere styrke. Denne tendens er forklaret med Bolmeys formel i afsnit 2.6. Dog ses der kun en forringet styrke for N5 i resultaterne fra denne undersøgelse.
- *Hydratiseringsgrad:* Grundet mineaffaldets vandabsorption er der risiko for en ufuldstændig hydratisering af cementklinkerne, idet mængden af frit tilgængeligt vand ved opblandingen reduceres, når mineaffaldet absorberer mere vand end cementen. Dog har mørtelprøverne været lagret i vand, hvorfor det kan forventes, at lagringen i vand delvist kan kompensere for dette. Teoretisk grundlag for hydratiseringsgrad er forklaret i afsnit 2.3.

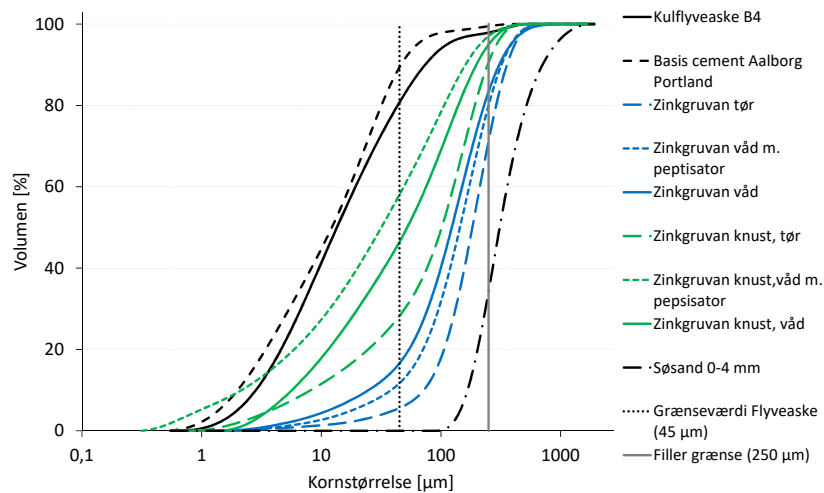
Tabel 4.12: Procentvis stigning i trykstyrke ved optimeret vandindhold for 14-døgns prøver

Før optimering \pm std.afv. [MPa]		Efter optimering \pm std.afv. [MPa]		Ændring [%]
Z5	$38,9 \pm 1,3$	Zv5	$40,8 \pm 2,0$	+ 4,7
Z10	$36,0 \pm 1,1$	Zv10	$36,9 \pm 0,9$	+ 2,4
N5	$41,9 \pm 0,8$	Nv5	$41,4 \pm 0,7$	- 1,1
N10	$36,6 \pm 1,2$	Nv10	$37,6 \pm 1,4$	+ 2,7

Tabel 4.12 viser en sammenligning af trykstyrkerne før og efter optimering af vandindholdet. Der ses kun en lille forøgelse af styrken for de fleste af mørtelblandingerne. Det kan derved konkluderes, at ved en optimering af bearbejdigheden for mørtelblandingerne er det muligt at forøge styrken med 2,4 - 4,7 %, når 14-døgns trykstyrken bestemmes. Standardafvigelserne ændrer sig ikke væsentligt, når blandingerne vandbehov optimeres. Det havde været forventet, at standardafvigelserne generelt var blevet lavere, idet mørtlens bearbejdighed forbedres, og der derved opnås en mere ensartet struktur af mørtlen.

4.5 Optimering af kornstørrelse

For at undersøge om en optimeret kornstørrelse for mineaffaldet fra Zinkgruvan kan føre til en bedre trykstyrke, knuses mineaffaldet og kornstørrelsesfordelingen bestemmes ved hjælp af laserdiffraktometer. Data fra undersøgelsen kan findes i bilag B.1.

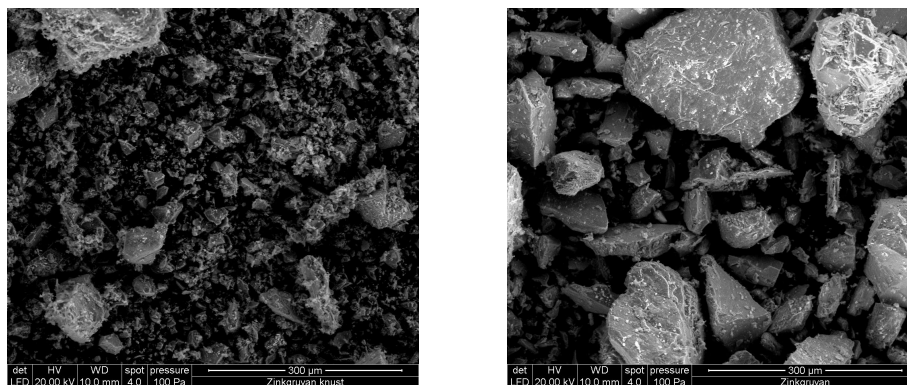
**Figur 4.14:** Kornstørrelsesfordeling for knust mineaffald fra Zinkgruvan

Det fremgår af figur 4.14, at mineaffaldet overholder fillergrænsen på 250 μm , når det knuses. Derudover opnås der en mere jævn fordeling mellem kornstørrelserne, hvilket især fremgår af kornkurverne, hvor analysen er foretaget på mineaffaldet i våd tilstand. Betragtes kurven for mineaffaldet analyseret med peptisator, ses der en finere kornstørrelse end for analysen i våd tilstand. Da det i afsnit 4.1.1 blev konkluderet, at der ikke forefindes lerpartikler i mineaffaldet, kan den finere kornstørrelse identificeret med peptisator, ikke forklares ved et indhold af lerpartikler. Årsagen til den finere kornstørrelse kan i stedet skyldes, at gitterstrukturen for mineralerne nedbrydes ved knusningen, hvilket vil give overfladeladninger, som får kornene til at klæbe sammen.

Det fremgår af kornkurven for mineaffaldet med pepsikator, at mineaffaldet i knust tilstand overholder grænseværdien for kategori N flyveaske defineret i DS/EN 450-1 [2012], idet 40 % af mineaffaldet er større end 45 μm .

SEM analyse af knust mineaffald

På figur 4.15 ses SEM analyser af mineaffaldet i knust og uknust tilstand forstørret 200 gange.



(a) Z.k forstørret 200 gange

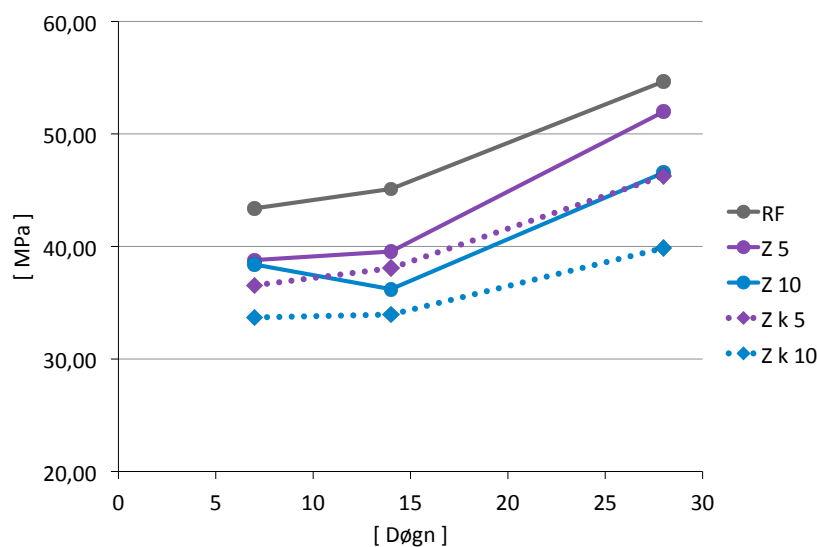
(b) Z forstørret 200 gange

Figur 4.15: SEM analyse af Zinkgruvan mineaffald i knust og uknust tilstand

Som illustreret i figur 4.15 bliver kornstørrelsen væsentligt mindre, når mineaffaldet knuses i ringknuser. Betragtes strukturen for kornene, ses det, at strukturen ændrer sig fra at være flad og pladelignende, og der ses generelt færre skarpe kanter. Den ændrede struktur vil give en øget bearbejdelighed, idet friktionen mellem kornene mindskes, og dette vil kræve mindre cementpasta mellem kornene.

Trykstyrker for optimerede prøver

På figur 4.16 fremgår styrkeudviklingen for 7,14 og 28 døgn for mørtelprøverne med optimeret kornstørrelse. Blandeforholdene kan findes i bilag C.1. Tryktest resultaterne kan findes i bilag C.2.



Figur 4.16: Styrkeudvikling for Zk5, Zk10 sammenlignet med RF, Z5, Z10

Det fremgår af figur 4.16, at trykstyrken reduceres, når der tilsættes knust mineaffald. Det var forventet, at

7-døgns trykstyrken ville blive højere, idet det knuste mineaffald overholder fillergrænsen, hvorfor fillereffekten forventedes at bidrage til styrken. Fillereffekten er forklaret i afsnit 2.8. Hvis det antages, at der er puzzolaner i mineaffaldet, vil det desuden være forventet, at den senere styrkeudvikling for Zk5 og Zk10 følger en mere stejle kurve end Z5 og Z10.

Jf. Lawrence et al. [2005] er der en sammenhæng mellem kornstørrelsen og styrkeudviklingsforløbet for asker med puzzolansk aktivitet, hvor en mindre kornstørrelse også vil give en højere styrkeudvikling tidligere i hydratiseringsforløbet, hvilket kan observeres ved 28 døgns styrken. Hvis der skulle være et indhold af puzzolaner i materialet, ville det derfor være forventet, at styrken ville blive højere for Zk5 og Zk10 sammenlignet med Z5 og Z10 ved 28 døgn.

Den lavere styrke for det knuste mineaffald kan skyldes, at mineaffaldet absorberer mere vand, når kornstørrelsen bliver mindre, idet overfladearealet i forhold til rumfanget bliver større. Samtidig vides det jf. afsnit 4.1.3, at mineaffaldet suger vand. Derved vil der være mindre frit tilgængeligt vand til stede til hydratiseringen, hvorfor styrkeudviklingen vil være ufuldstændig. Hydratiseringens indflydelse på styrken er forklaret i afsnit 2.3.

For Zk5 og Zk10 ses det, at styrken stiger i perioden mellem 7 og 14 døgn, hvilket den ikke gør for Z5 og Z10. Dette indikerer, at der opnås en mere jævn styrkeudvikling, hvilket tyder på, at pakningen af kornene er forbedret som følge af den finere kornstørrelse og den mindre kantede og pladelignende struktur. Strukturen, som opnås ved knusning af mineaffaldet, kan derved have bidraget til en tættere og mere ensartet mørtel.

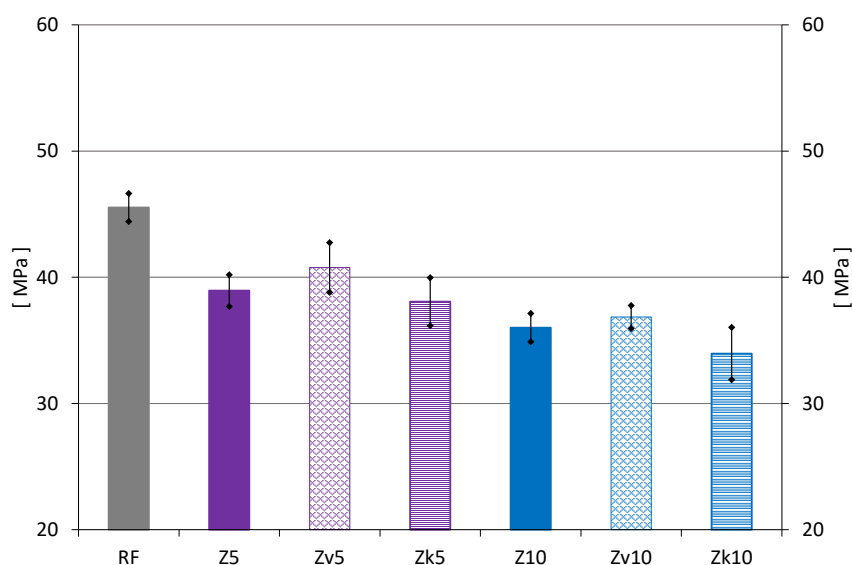
Tabel 4.13: Procentvis fald i trykstyrke ved optimeret kornstørrelse for 14-døgns prøver

Før optimering \pm std.afv. [MPa]		Efter optimering \pm std.afv. [MPa]		Ændring [%]
7 Z5	38,8 \pm 1,1	7 Zk5	36,5 \pm 1,6	-5,3
7 Z10	38,4 \pm 0,6	7 Zk5	33,7 \pm 1,3	-12,2
14 Z5	39,6 \pm 1,3	14 Zk5	38,1 \pm 1,9	-3,8
14 Z10	36,2 \pm 1,1	14 Zk10	34,0 \pm 2,1	-6,1
28 Z5	52,0 \pm 1,1	28 Zk5 ¹	46,3 \pm 1,4	-11,0
28 Z10	46,6 \pm 2,2	28 Zk10 ¹	41,0 \pm 1,8	-12,0

¹ Gennemsnit er regnet med metoden jf. DS/EN 196-1 [2005] hvorfor én prøve ikke er medtaget i dette resultat. Metoden jf. DS/EN 196-1 [2005] er forklaret i afsnit 3.6.

² Tallene foran prøvernes navn indikerer hydratiseringstiden i døgn, dvs. 7, 14 og 28 døgn

Det fremgår af tabel 4.13, at trykstyrken forringes væsentligt, når mineaffaldet knuses. Standardafvigelserne for den optimerede mørtel er lidt højere, hvilket ikke var forventet. Det var forventet, at standardafvigelserne blev lavere ved tilsætning af knust mineaffald, idet det vil lette bearbejdigheden og derved give en mere ensartet mørtel. De højere standardafvigelser kan skyldes et højere vandbehov for det knuste mineaffald, hvilket også kan være forklaringen bag den forringede trykstyrke. Dog bør denne tendens bekræftes eller afkræftes ved at undersøge flydesætmålet for mørtelblandingerne.



Figur 4.17: 14-døgns trykstyrker for Zv5, Zv10 sammenlignet med Zk5, Zk10 og RF, Z5, Z10

På figur 4.17 sammenholdes resultaterne af 14-døgns trykstyrkerne for prøverne med mineaffaldet fra Zinkgruvan. Det fremgår af figuren, at Zv5 og Zv10 opnår en højere trykstyrke end Z5 og Z10, mens Zk5 og Zk10 opnår en lavere trykstyrke. Det kan derfor konkluderes, at den vigtigste parameter for optimering af mørtelblandingerne med mineaffald, er at tilsætte den mængde vand, som svarer til den mængde, som mineaffaldet absorberer, idet dette var gjort for Zv5 og Zv10. Dette betyder dog ikke, at kornstørrelsen ikke bør optimeres, idet der jf. figur 4.16 blev observeret en mere jævnt stigende styrkeudvikling for det knuste mineaffald, hvilket kan skyldes den optimerede kornstruktur ved knusningen.

4.6 Delkonklusion for optimering af trykstyrke og bearbejdelighed

Ved optimeringen af flydesætmålet blev ud fra en praktisk betragtning observeret, at bearbejdeligheden blev forbedret. Der blev ikke fundet en direkte sammenhæng mellem mængden af tilsat vand og kornstørrelsen, og generelt absorberer blandingerne med 5 % erstatning af cement med mineaffald mere vand end blandingerne med 10 % erstatning. Dette kan skyldes, at cementen absorberer vandet hurtigere end mineaffaldet, men dette har ikke kunne underbygges gennem teorien.

14-døgns trykstyrken blev undersøgt for prøverne med optimeret vandindhold, hvor det viste sig, at trykstyrken generelt forbedres, og maksimalt med ca. 4,7 %, som blev observeret for Zv5. Trykstyrken for Zv10 og Nv10 viste en forbedring på 2,4 % og 2,7 %, mens trykstyrken for N5 blev forringet med 1,1 %. Tendensen til den øgede trykstyrke kan forklares ud fra en øget bearbejdelighed og en øget hydratiseringsgrad for mørtelblandingerne.

Ved optimering af kornstørrelsen for Zinkgruvan mineaffaldet blev der opnået en kornstørrelse, som overholder grænseværdien for kategori N flyveaske jf. DS/EN 196-1 [2005]. SEM analysen af kornstrukturen for det knuste mineaffald sammenlignet med det uknuste viste desuden, at den ellers pladelignende og kantede struktur bliver erstattet med en mere rundet struktur.

Styrkeudviklingsforløbet for mørtelblandingerne med optimeret kornstørrelse viser generelt ikke den forventede tendens, idet det var forventet, at filleregenskaberne for mineaffaldet ville bidrage til en højere trykstyrke ved 7 døgn for Zk5 og Zk10 end Z5 og Z10. Dog blev det fundet, at styrkeudviklingen er mere jævnt stigende idet trykstyrken ikke falder for Zk10 efter 14 døgn, hvilket den ellers gør for Z10. Dette kan forklares ud fra den optimerede kornstruktur, som kan have bidraget til en bedre pakning af kornene og en mere ensartet struktur af mørtlen. Hvis der havde været puzzolansk aktive mineraler i mineaffaldet fra Zinkgruvan, ville det være forventet, at 28 døgns trykstyrken var blevet højere for Zk5 og Zk10 end Z5 og Z10, idet styrkeudviklingen som følge af et puzzolanindhold menes at blive accelereret, når materialet bliver mere finkornet.

5 | Konklusion

Formålet med dette projekt er at sammenligne to typer mineaffald, med henblik på at undersøge muligheden for anvendelse som delvis erstatning af cement i mørtel. Der er lagt fokus på at undersøge mineaffaldets indflydelse på trykstyrken og bearbejdeligheden. Den ene type mineaffald stammer fra zink-, bly- og kobberminen Zinkgruvan og den anden type mineaffald stammer fra guldfinen Nalunaq.

Der er udført en karakteristisk af de to typer af mineaffald for at afdække mineaffaldets anvendelsesmuligheder. Ud fra en SEM analyse kan det konkluderes, at kornstrukturen ikke vil bidrage positivt til bearbejdeligheden af betonen, idet kornene har en flad og pladelignende struktur. Kornstørrelsesfordelinger for begge typer mineaffald viser, at mineaffaldets kornkurve generelt ligner kornkurven for søsand mere end kornkurven for cement og kulflyveaske. Mineaffaldet fra Nalunaq overholder fillergrænsen på 250 μm , men ingen af de to typer mineaffald overholder kornstørrelsen for kategori N flyveaske defineret i DS/EN 450-1 [2012].

Glødetabet og vandopløseligheden er som forventet lav. pH-værdien er neutral for begge typer mineaffald hvilket ikke vil bidrage positivt til korrosionsmiljøet, når mineaffaldet skal erstatte cementen. For begge typer mineaffald er ledningsevnen lav sammenlignet med kulflyveasken.

Indholdet af tungmetaller lever ikke op til kategori 1 grænseværdierne jf. Miljøstyrelsen [2015] for anvendelse af restprodukter i bygge- og anlægsarbejder.

Gennem en XRD analyse kan mineralindholdet, som er beskrevet jf. Jensen et al. [2016], bekræftes. Amfibole blev identificeret i begge typer af mineaffald, og det er derfor nødvendigt, at være opmærksom på, at disse mineraler kan høre inde under kategorien asbest, som ikke er tilladt at anvende i byggematerialer. Et indhold af mikroklin feldspat og kvarts i mineaffaldet fra Zinkgruvan indikerer, at der kan være tuffit tilstede i mineaffaldet.

Det er blevet undersøgt, om der kan anvendes vådt sand og vådt mineaffald til støbning af mørtlen. Målinger af trykstyrken gav store spredninger, hvorfor det kan konkluderes, at vandindholdet bliver sværere at styre når der anvendes vådt sand og vådt mineaffald til støbningerne. Det blev derfor besluttet, at anvende tørret sand og tørret mineaffald i resten af projektføreløbet. En undersøgelse af sandets vandindhold viser, at det stemmer overens med kravet defineret i DS/EN 196-1 [2005], hvorfor det kan anvendes til støbning af mørtelprismerne.

En undersøgelse af flydesætmålet for mørtelblandingerne viser, at mineaffaldet absorberer mere vand end cementen gør, idet flydesætmålet bliver 5-10 % lavere ved tilsætning af mineaffald. Afbindingstiden forsinkes generelt ved tilsætning af mineaffald til mørtlen, hvilket er forventet, da mængden af cement reduceres. Mineaffaldet fra Nalunaq viser sig ikke at bidrage til heterogen kimdannelse fra fillereffekten på grund af de forsinkede afbindingstider. Den væsentligt forsinkede indledende afbindingstid for Z10 kan skyldes mineaffaldets indhold af calcit.

Det kan konkluderes, at trykstyrken forværres desto mere af cementen, der udskiftes med mineaffald. Trykstyrken for N5 viser, at filleregenskaberne for mineaffaldet fra Nalunaq bidrager til en høj trykstyrke tidligt i styrkeudviklingsforløbet. Senere i styrkeudviklingsforløbet har Z5 en højere styrke, hvilket kan skyldes, at mineaffaldet fra Zinkgruvan måske indeholder puzzolaner. Der ses ingen nævneværdig forskel i trykstyrken mellem N10 og Z10, hvilket kan skyldes, at mineaffaldet generelt ikke har en god bearbejdelighed.

Ved en optimering af vandindholdet i mørtelblandingerne med mineaffald, kan det konstateres, at bearbejdeligheden forbedres, når flydesætmålet optimeres ved at tilsætte ekstra vand til mørtlen. En 14-døgns trykstyrke for blandingerne med optimeret vandindhold viser, at trykstyrken generelt forbedres, når vandindholdet optimeres. Den øgede trykstyrke kan skyldes den øgede bearbejdelighed og hydratiseringsgrad for mørtelblandingerne.

En SEM analyse af knust mineaffald fra Zinkgruvan viser, at kornstørrelsen bliver mindre flad og pladelignende og mere afrundet. Derudover viser kornstørrelsesfordelingen, at det knuste mineaffald overholder grænseværdien for kulflyveaske defineret i DS/EN 450-1 [2012].

Styrkeudviklingsforløbet for Zk viser modsat forventet, at filleregenskaberne fra mineaffaldet ikke bidrager til en øget styrkeudvikling tidligt i forløbet. Dog ses en mere jævn styrkeudvikling, som menes at være en følge af den forbedrede kornstruktur. Styrkeudviklingsforløbet for Zk indikerer ikke et indhold af puzzolaner, idet stigningen så havde forventet at være højere for 28 døgn.

Generelt viser resultaterne fra dette projekt, at mineaffaldet kan anvendes i beton, hvis indholdet af tungmetaller kan nedbringes og hvis indholdet af amfibole ikke viser sig at være asbest. Dog kan det ikke anvendes i større bærende konstruktioner idet trykstyrken generelt forværres når cement erstattes med mineaffald. Begge typer af mineaffald giver en forværret bearbejdelighed, hvilket skyldes kornstrukturen, og at mineaffaldet absorberer mere vand end cementen. Bearbejdeligheden og trykstyrken kan primært optimeres ved at tilsætte ekstra vand til mørtlen med mineaffald, mens en optimering af kornstørrelsen ikke i sig selv bidrager til en forøget trykstyrke.

6 | Videre Forskning

Gennem projektets forløb rejser der sig en række af spørgsmål, som kunne være interessante at få besvaret, men som det grundet projektets ramme ikke har været muligt at besvare.

Under trin 2 er der nævnt en række væsentlige forslag til mulige forskningsemner, som har høj relevans i forbindelse med undersøgelserne af anvendelsesmulighederne i beton.

Derudover kunne det generelt være interessant, at undersøge nærmere hvilke egenskaber mineraler som blev identificeret gennem XRD analysen har i forbindelse med anvendelse i betonen. Spalteligheden af mineralerne og deres indflydelse på trykstyrken kunne være interessant at undersøge, for at se om der er en sammenhæng, idet kvarts som hyppigst anvendes i beton har en dårlig spaltbarhed og en høj hårdhed sammenlignet med andre mineraler. Da mineaffaldet indeholder andre mineraler end kvarts, kunne det derfor være interessant at undersøge disse mineralers egenskaber nærmere.

Eftersom mineaffald fra Zinkgruvan har et betydeligt indhold af calcit, kunne det være interessant at undersøge nærmere, hvilken effekt calcit har på mørtel.

Idet begge typer mineaffald ligner sand mere end de ligner cement og flyveaske i kornstørrelsesfordelingen, vil det være relevant at undersøge, om mineaffaldet kan erstattes med sand frem for cement, for at se om det har forbedrende egenskaber.

Da der blev fundet en sammenhæng mellem trykstyrken og vandindholdet kunne det være interessant, at undersøge om det er den forbedrede bearbejdelse eller den øgede hydratisering, der har haft indflydelse på øgede trykstyrke af mørtlen ved optimeret vandindhold.

Derudover ønskes det afdækket, om årsagen til de lave trykstyrker for det knuste mineaffald fra Zinkgruvan skyldes en højere vandabsorption fra mineaffaldet i knust tilstand. Dette kan undersøges ved at optimere flydesætmålet for en mørtelblanding med det knuste mineaffald og dernæst undersøge styrkeudviklingsforløbet.

Som ovenstående viser, er der mange relevante emner at undersøge i forbindelse med anvendelse af mineaffald i beton. De undersøgelser, der er udført i dette projekt, er dermed kun en lille del af de undersøgelser, der skal til, før mineaffald vil kunne anvendes i beton.

Litteratur

- Aalborg Portland (2012). Cement og beton. *Aalborg Portland*.
- Arbejdstilsynet (2005). At-vejledning c.2.2 asbest. *Arbejdstilsynet*.
- Bach, L. og Larsen, M. B. (2016). Environmental monitoring at the Nalunaq Gold Mine, South Greenland. Videnskabelig rapport, Danish Centre for Environment and Energy.
- Bonnerup, A. og Sigvardsen, N. (2014). Anvendelse af alternativt aske i beton - bearbejdelighed og afbindingsforløb. Specialeafhandling, Danmarks Tekniske Universitet.
- Christiansen, C. og Aare, T. (2009). Natursten i det danske byggeri: Anvisning nr. 1 - natursten, geologi og egenskaber. *Teknologisk Institut*.
- Dansk Betonforening (2013). Betonhåndbogen. <http://betonhaandbogen.dk>. Hentet: 2016-09-29.
- DenStoreDanske (2009). Krystallisation (kimdannelse). <http://denstoredanske.dk>. Hentet: 2016-01-04.
- DenStoreDanske (2013). Amorf. <http://denstoredanske.dk>. Hentet: 2016-01-03.
- Djursling, T. (2016). Ingeniøren fokus: Træpiller. <https://ing.dk>. Hentet: 2016-12-08.
- DS/EN 1015-3 (1999). Prøvningsmetoder til undersøgelse af mørtel til murværk - del 3: Bestemmelse af frisk mørtels konsistens. *Dansk Standard*.
- DS/EN 196-1 (2005). Metoder til prøvning af cement - del 1: Styrkebestemmelse. *Dansk Standard*.
- DS/EN 196-3 (2009). Metoder til prøvning af cement - del 3: Bestemmelse af afbindingstid og volumenbestandighed. *Dansk Standard*.
- DS/EN 450-1 (2012). Flyveaske til beton - del 1: Definition, specifikationer og overensstemmelseskriterier. *Dansk Standard*.
- Europa-Kommisionen (2009). Reference document on best available techniques for management of tailings and waste-rock in mining activities. *Europa-Kommisionen*.
- Fisker, S. og Mathiasen, J. (2014). *Anlægsteknik 1*. Polyteknisk Forlag.
- Geiker, M., Nielsen, A. og Hansen, K. K. (2008). *Bygningsingeniørernes Materialer - Uddrag af Materialebogen*. Nyt Teknisk Forlag.
- Hawkins, P., Tennis, P. og Detwiler, R. (2003). Portland cement association. the use of limestone in portland cement: A state of the art review. *Portland Cement Association*.
- Herholdt, A. D., Justesen, C., Nepper-Christensen, P. og Nielsen, A. (1985). *Beton-Bogen*. Aalborg Portland, 2. udgave.
- IARC (2005). International Agency of Research for Cancer. Asbestos (chrysotile, amosite, crocidolite, tremolite, actinolite and anthophyllite). *IARC Monographs*, 100C.
- Jaturapitakkul, C., Tangpagasit, J., Songmue, S. og Kiattikomol, K. (2011). Filler effect of fine particle sand on the compressive strength of mortar. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 18.
- Jensen, P. E., Ottosen, L. M., Hansen, H., Bollwerk, S., Belmonte, L. J. og Kirkelund, G. M. (2016). Suspended electro-dialytic extraction of toxic elements for detoxification of three different mine tailings. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 11.
- Johanneson, B. (2014). Lecture notes for course 11735 Material Science, Chapter 5: Mineral and chemical admixtures and their role in the properties and hydration of Portland cement.

- Kappel, A., Ottosen, L. og Kirkelund, G. (2017). Utilization of sewage sludge ash in mortar - the effect of milling on compressive strength, workability and colour. *Artikel indsendt, endnu ikke godkendt*.
- Larsen, G. og Surlyk, F. (2012). *Naturen i Danmark: Geologien*. Gyldendal, 2. udgave.
- Lawrence, P., Cyr, M. og Ringot, E. (2005). Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. *Cement and Concrete Research*, 35.
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine Wastes*. Springer.
- LSU (2016). LSU Geology and Geophysics: A web browser flow chart for the classification of igneous rocks. <http://www.lsu.edu>. Hentet: 2016-01-13.
- Lövgren, L., Hedlund, T., Malm, L. og Karlsson, T. (2011). Immobilisation of trace metals in sulfidic mine tailings. *International Mine Water Association*.
- Miljøstyrelsen (2015). Retproduktbekendtgørelsen: Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurennet bygge- og anlægsaffald. *Miljø- og Fødevareministeriet*.
- Mindess, S., Young, J. F. og Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall, 2. udgave.
- Nelson, S. A. (2011). Experimental determination of 2-component phase diagrams. <http://www.tulane.edu>. Hentet: 2016-01-07.
- Onuaguluchi, O. og Eren, O. (2012). Recycling of copper tailings as an additive in cement mortars. *Construction and Building Materials*, 37.
- Owen, M. L. og Meyer, L. H. (2013). Technical report for the zinkgruvan mine. Videnskabelig rapport, Wardell Armstrong International.
- Secher, K., Stendal, H. og Steensgaard (2008). The nalunaq gold mine. *Geology and Ore*.
- Sigvardsen, N. (2016). Properties of Concrete with Co-Combustion Ash from Coal and Wood. Kandidatspecialeafhandling, Danmarks Tekniske Universitet.
- Skaarup, G. (2013). Miljøvenlig cement er stærkere end almindelig cement. <http://www.science.ku.dk>. Hentet: 2016-12-08.
- Thomas, M. (2007). Optimizing the use of fly ash in concrete. *Portland Cement Association*.

Bilag

A | Forsøgsvejledninger

A.1 Vandopløselighed

A.1 Vandopløselighed

Arktisk Teknologi og Bæredygtige Løsninger, F 2016

Vandopløselighed

A Princip

Ved at foretage en skylning af asken skal der bestemmes hvor meget at materialet som er vandopløselig. De vandopløselige materialer er i de fleste tilfælde salte.

B Analysens udførelse

100,00 g tørret aske afvejes på teknisk vægt til en 1L plastikflaske med låg. Der tilsættes 500 mL destilleret vand. Prøven rystes og henstilles til bundfældning.

Et filterpapir vejes og sættes i en tragt i et måleglas.

Topvæsken hældes over i filterpapiret. Der tilsættes igen 500 mL destilleret vand til asken og prøven omrystes og henstilles.

Topvæsken hældes over i det samme filter og der tilsættes igen 500 destilleret vand til asken og prøven omrystes.

Hele prøven hældes over i filteret og der skylles efter med destilleret vand for at får alle partiklerne med over i filteret. Det stilles til afdrypning.

Når asken i filteret er næste tør, lægges filter med asken i en petriskål og vejes og derefter stilles dem i varmeskab ved 105°C natten over.

Asken og filteret afkøles og vejes.

C Beregning af resultat

$$\text{Aske tilbage} = (\text{tørfilter} + \text{aske} + \text{petri}) - (\text{filter} + \text{petri})$$

$$\text{Opløst materiale} = (\text{askefør}) - (\text{asketilbage})$$

A.1 Vandopløselighed

Arktisk Teknologi og Bæredygtige Løsninger, F 2016

D Affaldshåndtering

Filter med aske skal opsamles i beholder til jord- og askeaffald.

A.2 Glødetab

A.2 Glødetab

Arktisk Teknologi og Bæredygtige Løsninger, F 2016

Glødetab**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.

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

A.2 Glødetab

Arktisk Teknologi og Bæredygtige Løsninger, F 2016

E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

A.3 Ledningsevne

Ledningsevne i jord

A Princip

En jordvæskes indhold af ioner og opløste forbindelser er af stor interesse, da dette kan give et billede af en jordvæskes samlede koncentration (ionstyrke), ionernes aktivitetsforhold i væsken samt give et indtryk af ligevægtsforholdene mellem faste bestanddele og opløste forbindelser. Ledningsevnen for en jordvæske er et udtryk for, hvor godt en elektrisk strøm kan ledes gennem den givne væske og den afhænger af, hvor mange ladede partikler, der er til stede i væsken.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ledningsevne måler.

C Analysens udførelse

10,00 g tør knust jord afvejes på teknisk vægt til en 50 mL plastikflaske.

Der tilsættes 25,00 mL destilleret vand med fuld pipette og ryst i 30 min.

Jorden skal nu bundfælde i ca. 10 minutter, indtil en væskefase har udskilt sig over jorden.

Ledningsevne elektroden skylles med destilleret vand. Sæt elektroden ned i væske. Når displayet viser "STAB" og aflæs resultatet og noteres som mS/cm.

D Beregning af resultat

Ledningsevnen anvendes uden yderlig beregning som mS/cm.

E Affaldshåndtering

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

A.4 Carbonat Volumetrisk

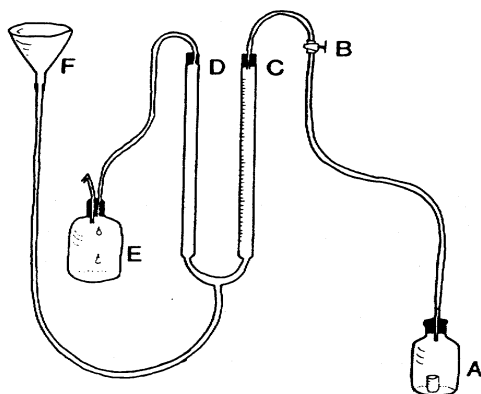
Carbonat, volumetrisk

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**

A.4 Carbonat Volumetrisk

Arktisk Teknologi og Bæredygtige Løsninger, F 2016

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, CaCO₃****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 CaCO₃ på analysevægt i små præparatglas. Målingerne af de afvejede CaCO₃ 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 glasrørene (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.

A.4 Carbonat Volumetrisk

Arktisk Teknologi og Bæredygtige Løsninger, F 2016

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 CO₂. Rystningen af reaktionsflasken fortsættes indtil CO₂-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 CaCO₃ 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.5 Proportioneringsmetoden

Bestemmelse af de justerede mål for indholdet af vand, sand og mineaffald efter proportioneringsmetoden.

Den mængde sand og mineaffald der skal tilsættes justeres efter følgende fremgangsmetode:

$$m_j = \frac{m_t}{100 - v} \cdot 100 \quad (\text{A.1})$$

Hvor:

- m_j er den justerede masse [g]
- m_t er den tørre masse [g]
- v er vandindholdet [%]

Den mængde vand der skal tilsættes justeres efter følgende fremgangsmetode:

$$v_1 = v_0 - \frac{m_j}{100} \cdot v \quad (\text{A.2})$$

Hvor:

- v_1 er den justerede masse [g]
- v_0 er den oprindelige masse svarende til det ønskede v/c forhold [g]
- m_j er den justede sats af sand eller mineaffald [g]
- v er vandindholdet i sandet eller mineaffaldet [%]

For prøver, hvor der både er tilsat mineaffald og sand, skal vandindholdet i både sandet og mineaffaldet trækkes fra ved hjælp af metoden i ligning A.2

A.6 XRD Databehandling

A.6 XRD Databehandling

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)

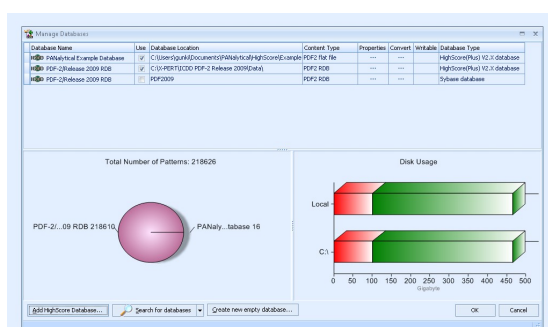
2. Start the programme *HighScore*



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



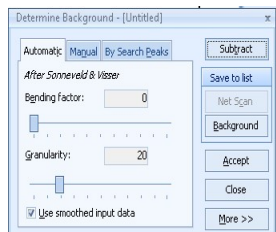
If not, find the database under *Customize* → *Manage databases*. Check that there is > 20,000 patterns available (if there is only about 20, only the example database is on).



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

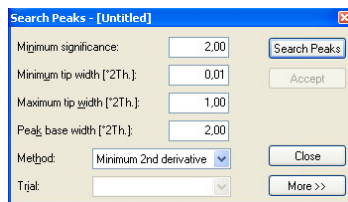
A.6 XRD Databehandling

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.**

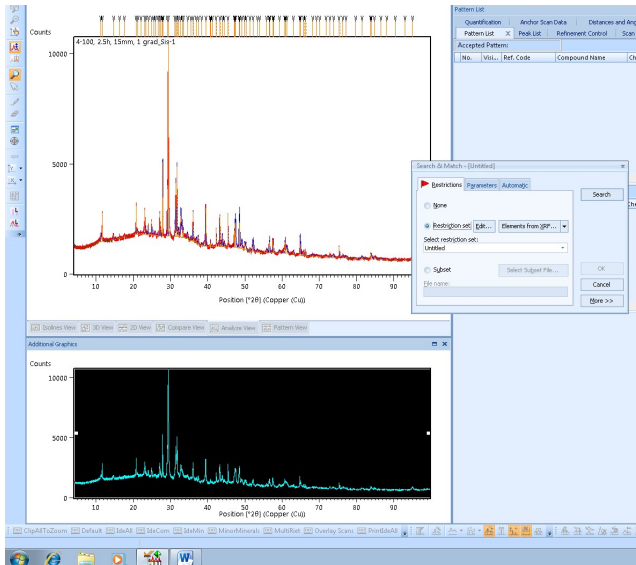
7. When a satisfying background has been fitted to the profile, press “accept”. The background will now appear as a black line in the profile window.
8. Choose *treatment* → *search peaks*. The following window will appear:



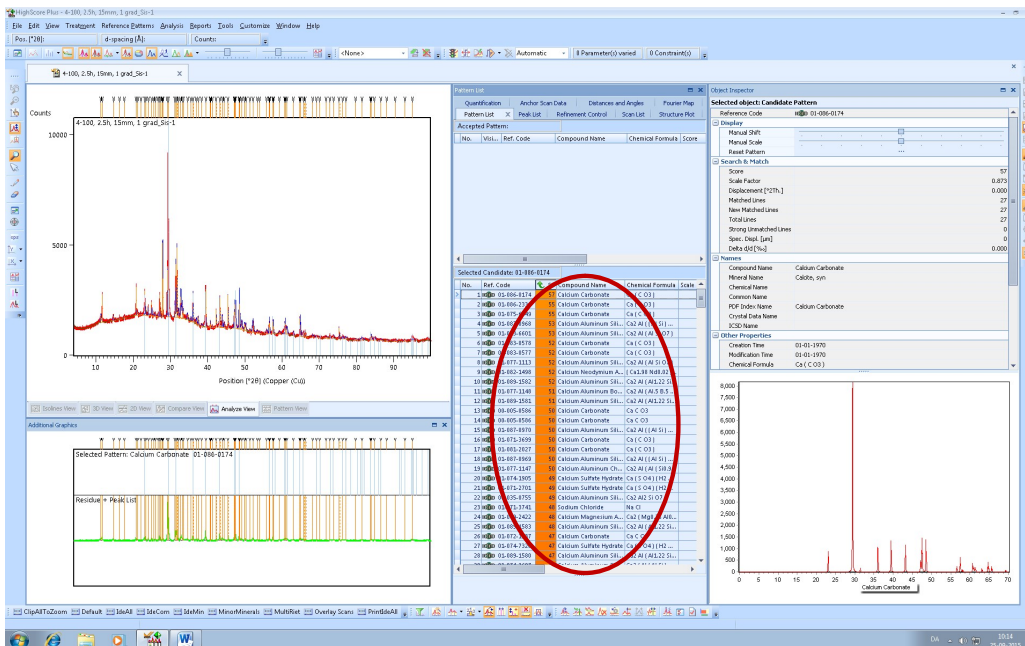
The “Search peak”-function uses 5 parameters to define what parts of the profile that are peaks and what parts that are not. The 5 parameters are: minimum significance, minimum and maximum tip widths, Peak base width and method. (read more about the 5 parameters in the full manual). Press **search peaks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

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

A.6 XRD Databehandling



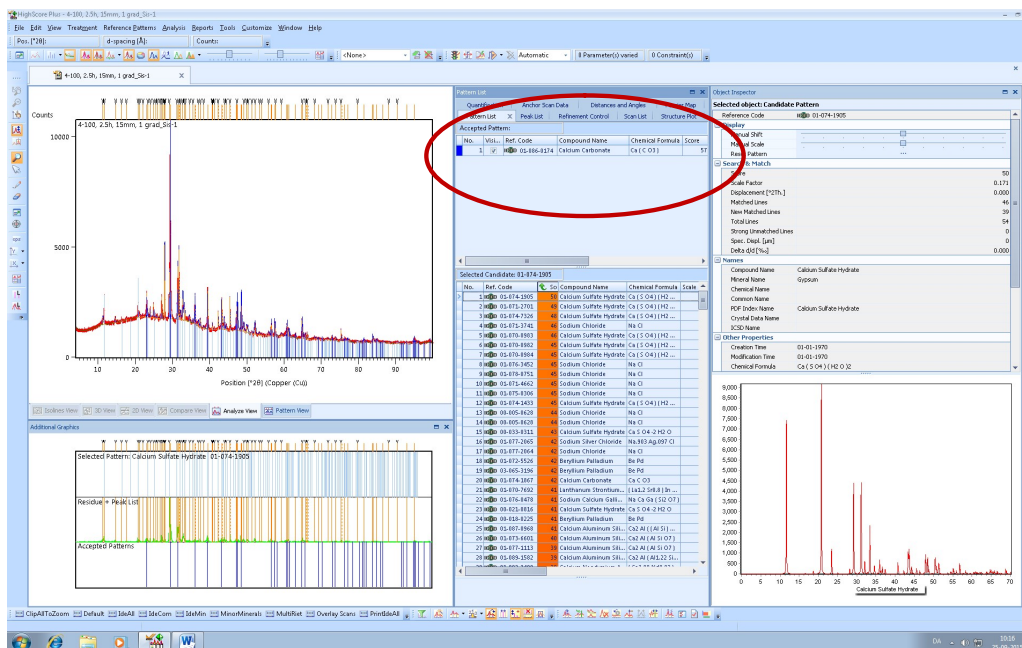
10. Press search (then the program compares your diffractogram to the > 20,000 patterns in the database, so it take a few minutes).



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.**

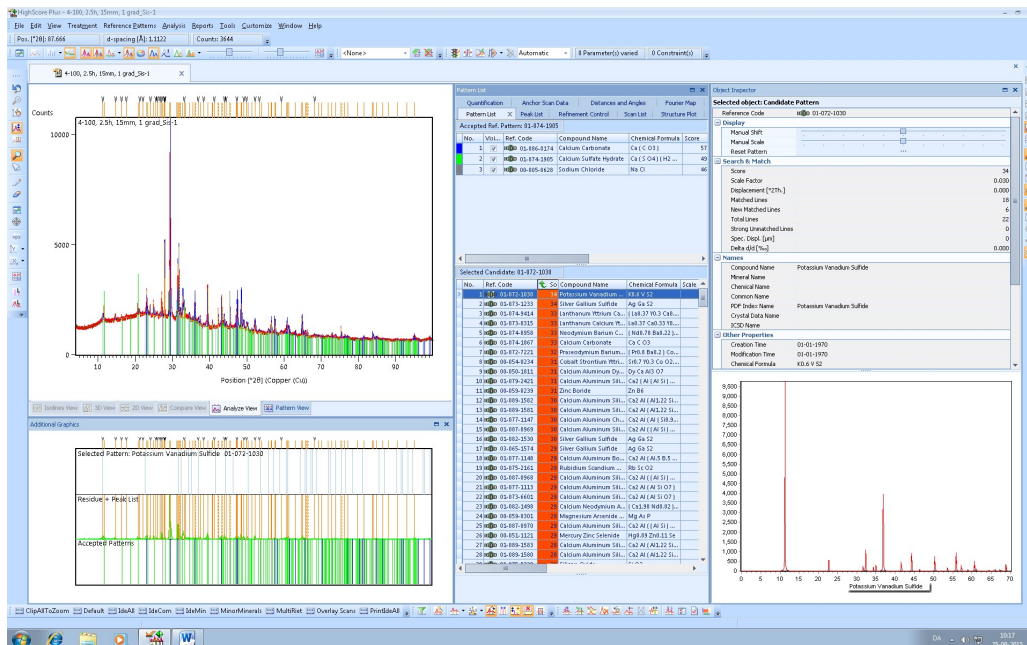
A.6 XRD Databehandling

- 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.

A.6 XRD Databehandling



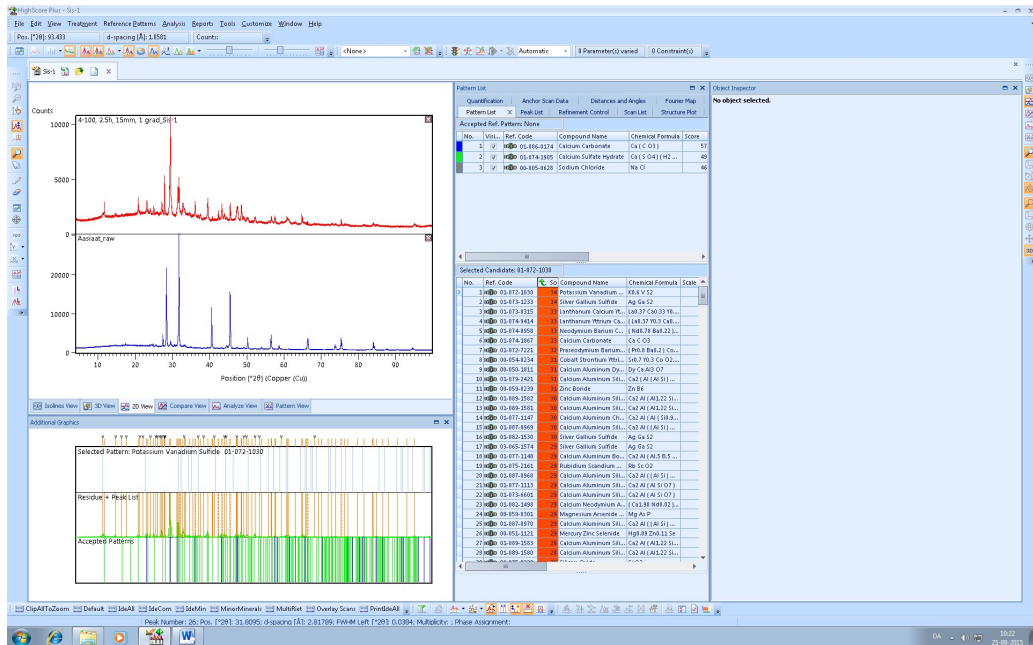
Making graphs

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.

A.6 XRD Databehandling



- 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 carbonated 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.

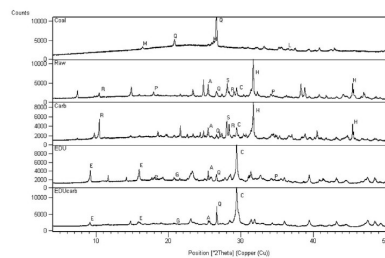


Figure 3 – XRD diffractograms with main minerals. M-mulline, Q-quartz, L-lime, R-richterite, P-portlandite, A-aminylite, S-sylvite, C-calcite, H-halite, E-enningsite, G-gypsum

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 mulline, which are mineral minerals in coal (see table 1.9). The main mineral compounds

A.7 Vicatronic manual

I det følgende afsnit præsenteres udvalgte sider fra vicatronic manual fra MATEST. De udvalgte sider, er dem som er blevet anvendt ved udførelsen af vikat forsøget. Den fulde brugermanual kan downloades fra MATEST hjemmeside www.matest.com ved indtastning af brugernavn og password fra produktregistrering.

A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

Side 1 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod. Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp. Tecnico	E044N.M01.EN.08	1/22	03/2010



OPERATING MANUAL
"VICATRONIC" AUTOMATIC RECORDING APPARATUS

MANUAL CODE: E044N / E044-03N

DO NOT ATTEMPT TO OPERATE THIS APPLIANCE BEFORE READING AND LEARNING THE MANUAL
IN ALL ITS PARTS

USERS

- MACHINE MANUFACTURERS
- DRAUGHTSMEN
- OPERATORS
- MAINTENANCE WORKERS
- ANY OTHERS

MATEST SPA Unipersonale

Via Delle Industrie, 25
24048 Treviolo
(Bergamo) Italy
Tel +39 0352055011
Fax +39 0352055055
Email : matest@matest.com
Internet : www.matest.com

A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

Side 2 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod. Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp. Tecnico	E044N.M01.EN.08	3/22	03/2010

CHAPTER 1 | GENERAL INFORMATION**1.1 | GENERAL FEATURES**

- **THIS MANUAL IS ADDRESSED TO** the carrier, the installer, the user, the maintenance operator, the scrapping operator.
- Please read it carefully because it informs you about the operating of the machine in safety conditions.
- This manual has to be considered a part of the product and concerns only the machine it is delivered with.
- Keep the manual in order during the whole life of the appliance to consult it for any needs.
- In case of sale, the manual and its enclosures should be given together with the machine.
- The manufacturer assumes no liability for any damages caused by a misuse of the machine.
- The manufacturer has the right to modify this technical literature as well as the machines this refers to without any previous notice.
- Messages meaning:

ATTENTION	This warning refers to all those procedures that have to be carefully followed to avoid any damage to the machine.
------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

DANGER	This warning refers to all those procedures that could present some risks for the operator if not carefully followed.
---------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

1.2 | IDENTIFICATION

MANUFACTURER IDENTIFICATION: See the cover page.
MACHINE IDENTIFICATION: See the plate on the machine where complete identification data as well as electric features are to be found.

1.3 | APPLICATIONS

This appliance is used to detect the setting time of a hydraulic binder. The Automatic Vicat E044N has been specially developed to grant the operator an easy and accurate determination of the initial and final setting times.

The results given grant absolute precision and validity since the Automatic Vicat E044N can execute the whole test automatically, thus avoiding any possibility of error due to manual work (air pockets, false settings and clots).

Furthermore, this appliance has a program including tests on plasters, according to the DIN 1168 standards. The operator can select the free fall or the guided fall of the probe.

This appliance has to be used only for the aim it has been projected and manufactured for. Any other use of the machine is not permitted.

ATTENTION	The instructions given in this operating manual are only made for the right use of the appliance. To carry out the test in the right way, the user must refer to the specific standards in force for the test itself.
------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

1.4 | MACHINE STRUCTURE AND OPERATION

The Vicatronic E044 is formed by a load-bearing frame, upon which the whole structure of the appliance is located. Its compactness together with its reduced weight, allows ease of handling and moving. A rotating plate (A7) allows the correct positioning of the specimen taking into account the probe (A6) and the selected program and nature of test to be carried out.

The appliance is programmed through the Control Panel (A1), which is found on the upper part of the appliance.

The probe (A6) is operated by a step-by-step motor linked to an asymmetrical cam device, which drops into the specimen from a known height. The specimen – holder plate which is also powered by two step-by-step motors, guarantees highly precise and repetitive positioning. The instrument automatically records every specimen digitally and is able to show this as and when required on a digital graphic display (coordinated by every probing time [minutes]/test [mm]), or otherwise in graphic form simulating the old fashioned pen tracing on the paper.

For further information contact the retailer or producer.

A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

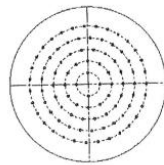
Side 3 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod.Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp.Tecnico	E044N.M01.EN.08	4/22	03/2010

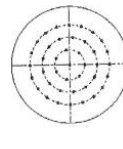
1.5 TEST PROGRAMS

The Vicatronic allows selection of the following test programs:

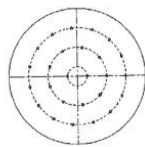
STANDARD	EN -UNI 196-3 BEFORE 06-2005
TOTAL NUMBER OF PENETRATIONS	26
CONICAL MOULD	70 / 80 / 40 mm
MIN. DISTANCE BETWEEN TWO PENETRATIONS	10 mm
STANDARD	EN -UNI 196-3 AFTER 07-2005
TOTAL NUMBER OF PENETRATIONS	86
CONICAL MOULD	70 / 80 / 40 mm
MIN. DISTANCE BETWEEN TWO PENETRATIONS	10 mm
STANDARD	ASTM C 191
TOTAL NUMBER OF PENETRATIONS	41
CONICAL MOULD	60 / 70 / 40 mm
MIN. DISTANCE BETWEEN TWO PENETRATIONS	6.4 mm
STANDARD	DIN 1168 GYPSUM
TOTAL NUMBER OF PENETRATIONS	22
WEIGHT OF MOVING PROBE	100 g.
CONE-SHAPED NEEDLE	08 mm / Length 50 mm
STANDARD	CUSTOM PROFILE 90
TOTAL NUMBER OF PENETRATIONS	90
CONICAL MOULD	80 / 90 / 40 mm
MIN. DISTANCE BETWEEN TWO PENETRATIONS	6 mm



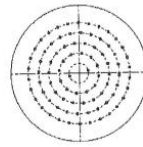
CUSTOM PROFILE 90 PENETRATIONS



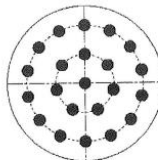
ASTM



EN 196-3 BEFORE 06-2005



EN 196-3 AFTER 07-2005



DIN 1168 GYPSUM

A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

Side 4 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod. Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp.Tecnico	E044N.M01.EN.08	9/22	03/2010

CHAPTER 6 USE

DANGER	Consult the Chapter "DANGEROUS PARTS AND RESIDUAL RISKS" before proceeding.
---------------	------------------------------------------------------------------------------------

6.1 WARNING

Before proceeding with the ordinary use of the appliance, we recommend checking that the appliance is in proper working condition and has no broken or used parts. If necessary make all the routine and special maintenance operations detailed in this manual.

For safety reasons, the probe (A6) must be disassembled when transporting. Before use put it into the appropriate runners (from above).

ATTENTION	Insert the probe keeping it perfectly vertical and let it fall down independently. An incorrect positioning or forcing could damage the internal mechanisms.
------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

ATTENTION	Once the appliance is switched on do not touch, turn or move the specimen holder. If above instruction is not followed the appliance can be seriously damaged.
------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

6.2 SWITCHING ON THE APPLIANCE

ATTENTION	Before switching on ensure that the appliance is connected to the electric supply.
------------------	------------------------------------------------------------------------------------

To switch on, press the button (A8) on the back of the appliance.

6.3 TEST PREDISPOSITION

Before proceeding with the standard and continual use of the machine check it is in perfect working order by carrying out one complete cycle without any cement or mortar paste added.

If you find any defective or suspect equipment, repair or replace it immediately. In case of problems during this test cycle, see Chapter **"DIAGNOSIS"**.

If neither the instructions given in this manual are not able to solve the problem, please contact our After Sale Service or ask your local distributors for information about the repair procedures and diagnosis service.

The Vicatronic has been designed to offer maximum ease of use even in the most complex of functions. The controls have been reduced to a minimum and consist of a high-resolution multi-function graphic display with high contrast and legibility. The encoder allows easy and quick access to the various menus at the click of a button and a single ESC (ESCAPE) button, which allows departure from any menu.

When the machine is **switched on** it will be in the position 'zero' which verifies the position of the motors and puts them in the correct position for the test to begin (positioning photo-sensor search). There will be a slight delay of between 8-10 seconds during positioning.

The first acronym with the machine positioned and ready to receive the test settings is as follows:

Test execution
Archives
Free tests
Options
Instruments

ATTENTION	the ESC (ESCAPE) button allows to esc from any menu.
------------------	------------------------------------------------------

By turning the encoder knob it is possible to run through the various menus of the visualised acronym, **the selected menu will appear highlighted in negative**. Pressure on the knob confirms selection and opens further menus.

N.B. The machine is programmed with a series of factory settings, which are proposed upon the first test setting after which the device will represent the data from the previous test.

A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

Side 5 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod.Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp.Tecnico	E044N.M01.EN.08	10/22	03/2010

ATTENTION Before carrying out a test, the needle must be calibrated to the zero point.

- By activating the menu **Test Execution** the following acronym will be given:

Test Number

Test Type

ASTM

Operator Code

Whenever it is possible, give an identification number to the test (10 alphanumerical characters) which it is preparing itself to carry out, the profile type which one wants to follow according to the following standards ASTM, EN, EN196-3/2005, DIN (plasters), 90 penetrations, FREE1: FREE5 (programmable user).

It is also possible to enter an operator code, which will be shown on the test report (10 alphanumerical characters)

When the arrow on the lower right side of the display becomes active (dark arrow on white background) and is confirmed with pressure on the knob allows passage to the next acronym:

Client Code

Test Date

dd/mm/yy

Test Time

hh/mm/ss

For this acronym it is also possible to enter relevant details to the test to be carried out, a 10 character alphanumerical code for the client code and a 6 character numerical one, spaced, for date and time.

The exit arrow gives access to the following acronym:

Time first penet.

hh:mm:ss

Start delay [m]

mmm

SPECIMEN TYPE

With **TIME FIRST PENET.**, the start time for the test can be set. (NB. Check the machine clock has been set or consult the paragraph menu options and set the time and date).

As an alternative to the above-mentioned function, which allows a time delay of the test at a defined time, with the **START DELAY** function it is possible to set a time delay for the start of the test from 0 to 999 minutes. One function automatically excludes the other.

The specimen time function memorizes the preparation start time of the mix to be tested.

ATTENTION	The benchmark SPECIMEN TIME is extremely important because it corresponds to the correct time to consider as test time and it corresponds to the mixing time of the water and the mixture. Based on the judgement of the operator, the Vicatronic appliance visualises the time taken to prepare the mixture (SPECIMEN TIME) or the time taken from the start of the machine.
------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

The aforementioned arrow moves to the following acronym:

WATER [%]

XX.X

TEMPERATURE [°C]

XX.X

HUMIDITY [%]

XX.X

Where the relevant test details (3 character numerical with decimal point) can be entered.

Arrow for the following acronym:

FALL TYPE

GUIDED

INTERVAL TYPE

FIXED

START OF SETTING READING

A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

Side 6 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod. Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp.Tecnico	E044N.M01.EN.08	11/22	03/2010

NO

START OF SETTING TAKEN must be selected as **NO** for the Vicat test standards, for the description of the selection **YES** see paragraph **START AND FINISH SETTING READINGS** (at the next page).

FALL TYPE gives the option of either carrying out the test with the probe in **FREE FALL** or **GUIDED** where the probe can be lightly rested on the specimen.

INTERVAL TYPE sets the sampling frequency in various ways in order to completely satisfy the demands of the many types of products to be tested.

The different modes are as follows:

FIXED, ZONES, THRESHOLD, COMBINED, MANUAL

The **FIXED** modes, sets an interval between one probing and another in a constant and repetitive manner of the set interval (e.g. 10 minutes) with a range between 0.5 and 999 minutes (30 seconds and 16.65 hours).

Note: E044-03N model allows the operator to set a minimum time of 15" (0.25) between two penetrations.

The **ZONES** mode divides the test cycle penetrations set in penetration phases with different interval times for every phase. There are 5 different phases available. A programming example follows:

After having selected **INTERVAL TYPE** and **ZONES** and confirmed the **START OF SETTING READING** (YES or NO) if the test profile ASTM has been selected, which consists of 41 penetrations, the display shows the acronym

ZONES

ID		TIME [m]
41	o	1
41	o	1
41	o	1
01		

As a default in the Id column (probing) the device proposes the maximum number relative to the selected test profile. If one wants to change the interval after the tenth probing penetration, on the first line under Id enter 10 and move the cursor (a small filled circle) next to 1 minute under the TIME column. Now set the desired time (e.g. 2 minutes) by turning the encoder knob and with the arrow at the bottom move onto line 2 (this is the number between the high and low arrows) and enter the number of penetrations corresponding to the second zone (by turning the knob) and then the relevant time to the second interval and so on up to five zones. Vicatronic automatically calculates the residual penetrations of every zone and doesn't permit different settings from the other remaining ones.

The **THRESHOLD** mode sets different interval readings of the differing thresholds of penetration. It therefore carries out an interval time between probing until the reading of XX.X mm of penetration from the base of the plate, over which the sampling can be increased in order to have more details during the hardening phase, reducing the interval time.

For this mode there are also 5 zones available to select with the same philosophy as the **ZONES** mode.

The **COMBINED** mode is a combination of the two previous **ZONES** and **THRESHOLDS**, carrying out an interval in zones until the reading of a penetrations threshold then the intervals like the **THRESHOLDS** set.

The **MANUAL** mode gives the user the possibility to set the time interval as desired for each individual penetration. The acronym appears as follows:

MANUAL	
ID	TIME [m]
1	1
2	1
3	1
01	C

By running through the data on the display in the exact same way as used up to now, the operator can set different interval times between one probing and the next, as desired. **ID** corresponds to the probe number, in this acronym for convenience the **C** icon has been inserted where the operator can copy the previous interval set, on the remaining penetrations.

A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

Side 7 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod. Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp. Tecnico	E044N.M01.EN.08	12/22	03/2010

START AND FINISH SETTING READINGS

If yes is selected on the referring window, the instrument will get ready for finishing setting readings according to the relative standard; once the penetration in mm is bigger than standard requirements previously set, the apparatus will advise the operator to rotate the specimen by a sound alarm. Then the operator has to reset the test parameter for the final readings.
If the operator would not rotate the specimen, the instrument will continue the test with previous settings.

START

If this acronym appears on the machine display it has all the data to be able to carry out a test and by pressing the knob it will bring us to the following acronym:

**CONFIRM
START TEST**

By pushing the knob the start of the test is confirmed.

During the test the following acronym can be viewed:

**CANCEL TEST
DATA
TEST MEASURES
TEST**

CANCEL TEST obviously requires reconfirmation
DATA returns to the data menu and the relevant set data can be seen according to the test-taking place.

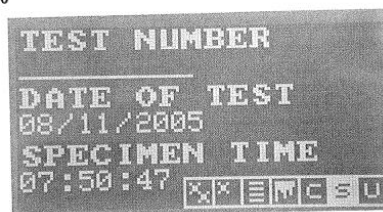
TEST MEASURES simulates on the display the pen tracing of the probing. By pressing the knob in this acronym one can pass from one probing to the next by seeing the relevant numerical data (probing number taking place, highlighted probing number, penetration size highlighted in mm, 4 times are also visualised: P= time taken for the specimen preparation (time to add water to the compound) I = time to start the probing (start Vicatronic), F= remaining time at the end of the test and the last at the bottom the remaining time until the next penetration.

TEST ARCHIVES

In the **TEST ARCHIVES** menu, the data and tracing graph of every test carried out can be seen. It is also possible to launch the thermal printer on the machine, or the separate printer with a USB connection port, or alternatively to download the selected data onto a personal computer via an RS232 serial port.

The archive can contain up to 50 completed tests.
The acronym can be seen as follows:

**TEST ARCHIVE
TEST N.50**



Used to delete all the archive test



for obsolete data in memory to be deleted. By selecting the required test number and activating the suitable control memory space will be freed up



(DATA) gives the numerical data for the selected test and also makes the menu run so the settings can be viewed again

A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

Side 8 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod.Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp.Tecnico	E044N.M01.EN.08	13/22	03/2010



(MEASURES) shows the test graphics. The display shows the probing sequences, as they would appear on a traditional pen tracing vicat. By pressing the knob one enters the graphic and by running the highlighted cursor the data can be viewed (time P-I-F, penetration number, penetration size) on any probing.



(COMMUNICATE) the data transmission is activated on the PC via the RS232 port (see photo 1 ref. Z), the data is transferred to the PC and can be managed via (MS HYPER TERMINAL) or by means of the VICAT-WIN or VICAT- NET software.



activates the thermal printer on the Vicatronic with the option of reduced printing (paper saver) or complete print

Printing example

In the case of a complete print, the appliance print a "report" (see picture on the side) with all the data concerning the last test.

The terms M[mm] and D[mm] indicate respectively, the arithmetic mean and standard deviation of the penetrations

On the bottom of the print, for each penetration, are visible the penetration times (minutes.seconds) elapsed since the preparation of the specimen (see column "D1" P[m.s]) and the times elapsed since the start of the machine penetration (see column "D2" I [m.s]).

```

SUMMER 10/08 : -----
L100 PROBE : L1000 1
L100 CYCLO : STANDESE
FINET 10/08, 10/03
14 8.00
C105-02340002 : -----
C00-CLASSE : 1
DATA PROBE : 12/03/08
000 PROBE : 100/05/04
LIT.000000,041: 0
000 2 0 DIAMET : -----
L100 PROBE : -----
L100 CYCLO : 0 00
10/03/07 17:43 0 00
L100-010: 1.00 0.00
L100 DIAMETRO : 4500000000
L100 UNITA' : 01500
PUL.UNITA.PRES: 00
L1000 1m1 : 1/4
0 (m1): 11.4
0 (m1): 13.0
10 PER.1m1)
1 28.3 0150.02 0150.08
2 28.4 0150.20 0150.15
3 28.2 0150.12 0150.20
4 31.2 0150.45 0150.42
5 30.2 0150.32 0150.38
6 30.3 0150.37 0150.35
7 30.2 0150.32 0150.28
8 31.3 0150.50 0150.42
9 30.4 0150.32 0150.31
10 30.5 0150.32 0150.35
    
```



activates the separate printer via the USB port (See photo 1 ref. X).

FREE TEST

In this menu the personalised test profile can be set, consisting of a sequence of penetrations upon request. Setting is simple and involves an effortless division of the sample area to be tested in circles along which to distribute the penetrations, determining the number of penetrations and the circle radius. Various lines then appear which correspond to the circles. The number of penetrations must be entered per circumference and its radius. Vicatronic automatically calculates on the basis of the entered data the coordinates to transmit to the motors for positioning. The programming acronym of the free tests appears as follows:

A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

Side 9 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod. Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp. Tecnico	E044N.M01.EN.08	14/22	03/2010

FREE TEST
FREE 1
NO. DIAMETERS XX
POINTS DISH MOTION

1	0,00
2	0,00
3	0,00
1	

FREE 1

DIAMETERS, refers to the number of circumferences onto which the probing are distributed. **POINTS** refers to the number of probing (penetrations) which are to be carried out on that circumference, starting from the most external then in succession to the most internal. **DISH MOTION** refers to the variation of the circumference of the previous and the current penetration (in the case of the first value, you must enter the outer circumference that represents the hypothetical edge of the specimen). The small number at the bottom corresponds to the progressing number of circles with set penetrations.

DATE TIME LANGUAGE

In this menu the date, present time and the language of the country in which it operates can be set.

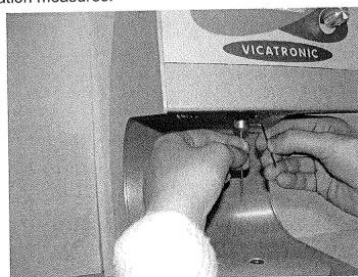
An example of the above acronym is:

hh:mm:aa
 DD:MM:YY
 ITA Italian

INSTRUMENTS MENU

Needle calibration

The instrument can automatically calibrate the needle by activating the appropriate control as described below. Nevertheless in order to safeguard the needle and glass dish throughout the free fall probe tests, it is important to regulate the needle using specific screws with hexagonal inserts so that it skims the glass plate and doesn't hit against it. Enter the instruments menu and activate the command 'needle calibration' after having already set the instrument with the support plate that is to be used (see enclosed A ref. A3). Regulate the needle using the screws (see PICTURE 2) and confirm by pressing on the knob when it reaches the base of the dish. The machine will automatically read the measure of the zero point and will retain it as a reference for penetration measures.



Picture 2

CALIBRATION PULLEY

Factory set and protected by password. This is not available to the operator.

RESET POSITIONS

Allows the motors to be taken back to zero in the case of irregular functioning.

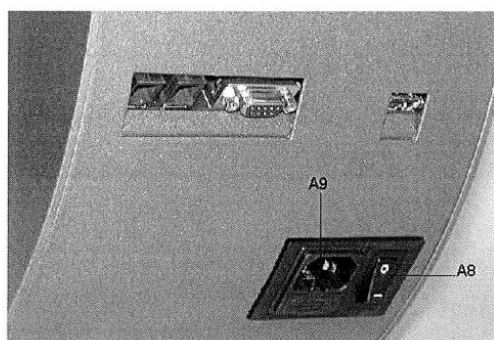
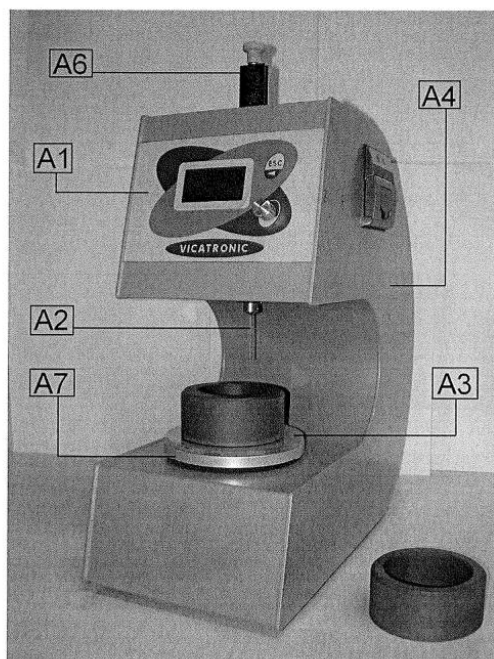
A.7 Vicatronic manual

Uddrag af Vicatronic Manual

Side 10 af 10

Rev.	Descrizione	Redatto/Gestito	Approvato	Cod.Ident.	Pagine	Data Em.
08	Manuale Istruzioni	Ufficio Tecnico	Resp.Tecnico	E044N.M01.EN.08	21/22	03/2010

ATTACHMENT A COMPLETE APPLIANCE



B | Data for karakteristik af mineaffald

B.1 Data for kornstørrelser

B.1 Data for korntørrelser

Side 1 af 4

Referenceprøver			
Maksevidde [μm]	Kulflyveaske B4	Basis cement	Søsand 0-4 mm
0,158	0	0	0
0,182	0	0	0
0,209	0	0	0
0,24	0	0	0
0,275	0	0	0
0,316	0	0	0
0,363	0	0	0
0,417	0	0	0
0,479	0	0	0
0,55	0	0,08	0
0,631	0	0,19	0
0,724	0,05	0,35	0
0,832	0,15	0,53	0
0,955	0,27	0,74	0
1,096	0,41	0,97	0
1,259	0,59	1,21	0
1,445	0,8	1,47	0
1,66	1,03	1,72	0
1,905	1,3	1,97	0
2,188	1,58	2,21	0
2,512	1,89	2,42	0
2,884	2,2	2,62	0
3,311	2,51	2,79	0
3,802	2,81	2,92	0
4,365	3,1	3,03	0
5,012	3,35	3,11	0
5,754	3,57	3,16	0
6,607	3,75	3,21	0
7,586	3,89	3,26	0
8,71	3,98	3,32	0
10	4,02	3,42	0
11,482	4,03	3,56	0
13,183	4,01	3,75	0
15,136	3,96	3,98	0
17,378	3,89	4,22	0
19,953	3,79	4,43	0
22,909	3,69	4,58	0
26,303	3,57	4,62	0
30,2	3,44	4,51	0
34,674	3,3	4,24	0
39,811	3,15	3,82	0
45,709	3	3,28	0
52,481	2,83	2,67	0
60,256	2,64	2,05	0
69,183	2,41	1,49	0
79,433	2,13	1,01	0
91,201	1,82	0,65	0
104,713	1,47	0,4	0,2
120,226	1,12	0,27	1,14
138,038	0,8	0,21	2,43
158,489	0,54	0,21	4,15
181,97	0,36	0,23	6,09
208,93	0,29	0,25	7,91
239,883	0,3	0,26	9,34
275,423	0,37	0,24	10,11
316,228	0,45	0,21	10,14
363,078	0,5	0,13	9,51
416,869	0,46	0,03	8,4
478,63	0,35	0	7,09
549,541	0,08	0	5,78
630,957	0	0	4,63
724,436	0	0	3,67

Nalunaq			
Maksevidde [μm]	Tør	Våd	Våd med pepsikator
0,158	0	0	0
0,182	0	0	0
0,209	0	0	0
0,24	0	0	0
0,275	0	0	0
0,316	0	0	0
0,363	0	0	0
0,417	0	0	0
0,479	0	0	0
0,55	0	0	0
0,631	0	0	0
0,724	0	0	0
0,832	0	0	0
0,955	0,02	0	0
1,096	0,08	0	0
1,259	0,1	0	0
1,445	0,12	0	0
1,66	0,14	0	0
1,905	0,16	0	0,12
2,188	0,17	0,09	0,18
2,512	0,18	0,13	0,25
2,884	0,19	0,18	0,32
3,311	0,2	0,22	0,38
3,802	0,21	0,25	0,43
4,365	0,23	0,29	0,48
5,012	0,25	0,33	0,53
5,754	0,27	0,37	0,58
6,607	0,3	0,41	0,63
7,586	0,34	0,44	0,69
8,71	0,38	0,48	0,74
10	0,43	0,51	0,79
11,482	0,47	0,53	0,85
13,183	0,51	0,56	0,91
15,136	0,55	0,61	1
17,378	0,6	0,69	1,11
19,953	0,68	0,84	1,28
22,909	0,8	1,09	1,53
26,303	1,01	1,48	1,89
30,2	1,34	2,04	2,39
34,674	1,83	2,78	3,03
39,811	2,51	3,68	3,81
45,709	3,39	4,73	4,69
52,481	4,43	5,82	5,61
60,256	5,58	6,87	6,49
69,183	6,71	7,75	7,22
79,433	7,71	8,35	7,7
91,201	8,44	8,57	7,85
104,713	8,78	8,36	7,63
120,226	8,66	7,75	7,05
138,038	8,07	6,8	6,17
158,489	7,08	5,63	5,11
181,97	5,78	4,35	3,96
208,93	4,38	3,13	2,86
239,883	2,99	2,05	1,88
275,423	1,81	1,18	1,11
316,228	0,88	0,57	0,56
363,078	0,22	0,08	0,18
416,869	0	0	0,03
478,63	0	0	0
549,541	0	0	0
630,957	0,01	0	0
724,436	0,07	0	0

B.1 Data for kornstørrelser

Side 2 af 4

831,764	0	0	2,9	831,764	0,12	0	0
954,993	0	0	2,27	954,993	0,16	0	0
1096,478	0	0	1,71	1096,478	0,18	0	0
1258,925	0	0	1,23	1258,925	0,18	0	0
1445,44	0	0	0,8	1445,44	0,15	0	0
1659,587	0	0	0,41	1659,587	0,09	0	0
1905,461	0	0	0,09	1905,461	0,03	0	0
2187,762	0	0	0	2187,762	0	0	0
2511,886	0	0	0	2511,886	0	0	0
2884,032	0	0	0	2884,032	0	0	0

B.1 Data for kornstørrelser

Side 3 af 4

Zinkgruvan			
Maksevidde [μm]	Tør	Våd	Våd m. pepsisator
0,158	0	0	0
0,182	0	0	0
0,209	0	0	0
0,24	0	0	0
0,275	0	0	0
0,316	0	0	0
0,363	0	0	0
0,417	0	0	0
0,479	0	0	0
0,55	0	0	0
0,631	0	0	0
0,724	0	0	0
0,832	0	0	0
0,955	0	0	0
1,096	0	0	0
1,259	0	0	0
1,445	0	0	0
1,66	0	0	0
1,905	0,06	0,09	0
2,188	0,07	0,13	0,08
2,512	0,08	0,18	0,12
2,884	0,09	0,23	0,15
3,311	0,1	0,27	0,17
3,802	0,1	0,3	0,19
4,365	0,11	0,33	0,21
5,012	0,11	0,36	0,23
5,754	0,12	0,4	0,25
6,607	0,12	0,44	0,27
7,586	0,13	0,49	0,3
8,71	0,13	0,54	0,34
10	0,14	0,6	0,39
11,482	0,16	0,66	0,44
13,183	0,18	0,73	0,5
15,136	0,22	0,8	0,57
17,378	0,26	0,87	0,63
19,953	0,31	0,94	0,7
22,909	0,37	1,01	0,76
26,303	0,43	1,11	0,84
30,2	0,49	1,23	0,93
34,674	0,55	1,41	1,05
39,811	0,62	1,68	1,24
45,709	0,72	2,04	1,52
52,481	0,9	2,52	1,92
60,256	1,19	3,12	2,45
69,183	1,66	3,81	3,12
79,433	2,35	4,57	3,92
91,201	3,28	5,33	4,8
104,713	4,43	6,02	5,7
120,226	5,72	6,57	6,55
138,038	7,05	6,92	7,25
158,489	8,23	7,02	7,71
181,97	9,11	6,85	7,87
208,93	9,52	6,43	7,68
239,883	9,39	5,77	7,14
275,423	8,69	4,96	6,3
316,228	7,51	4,06	5,24
363,078	6,02	3,16	4,08
416,869	4,39	2,32	2,94
478,63	2,84	1,6	1,9
549,541	1,54	1,02	1,09
630,957	0,46	0,57	0,39
724,436	0,05	0,28	0,07

Zinkgruvan knust			
Maksevidde [μm]	Tør	Våd	Våd m. pepsisator
0,158	0	0	0
0,182	0	0	0
0,209	0	0	0
0,24	0	0	0
0,275	0	0	0
0,316	0	0	0,01
0,363	0	0	0,22
0,417	0	0	0,4
0,479	0	0	0,56
0,55	0	0	0,68
0,631	0	0	0,75
0,724	0	0	0,79
0,832	0	0	0,8
0,955	0,04	0	0,79
1,096	0,21	0	0,77
1,259	0,28	0	0,77
1,445	0,35	0,02	0,8
1,66	0,42	0,18	0,85
1,905	0,48	0,38	0,92
2,188	0,54	0,59	1
2,512	0,6	0,8	1,09
2,884	0,65	1	1,18
3,311	0,7	1,17	1,27
3,802	0,75	1,32	1,36
4,365	0,8	1,45	1,45
5,012	0,84	1,57	1,54
5,754	0,89	1,68	1,64
6,607	0,93	1,78	1,74
7,586	0,97	1,88	1,86
8,71	1,02	1,98	1,98
10	1,06	2,08	2,1
11,482	1,11	2,19	2,24
13,183	1,16	2,29	2,38
15,136	1,22	2,39	2,52
17,378	1,3	2,48	2,66
19,953	1,38	2,56	2,79
22,909	1,48	2,63	2,9
26,303	1,58	2,69	2,99
30,2	1,7	2,76	3,07
34,674	1,83	2,85	3,12
39,811	1,99	2,96	3,18
45,709	2,2	3,11	3,23
52,481	2,48	3,32	3,31
60,256	2,86	3,56	3,4
69,183	3,36	3,84	3,5
79,433	3,98	4,12	3,61
91,201	4,68	4,36	3,68
104,713	5,42	4,54	3,69
120,226	6,09	4,6	3,62
138,038	6,6	4,53	3,43
158,489	6,83	4,31	3,13
181,97	6,72	3,93	2,73
208,93	6,24	3,44	2,28
239,883	5,42	2,85	1,79
275,423	4,37	2,24	1,33
316,228	3,18	1,64	0,92
363,078	2	1,08	0,59
416,869	1,01	0,64	0,35
478,63	0,15	0,19	0,17
549,541	0	0,03	0,08
630,957	0	0	0,02
724,436	0	0	0

B.1 Data for kornstørrelser

Side 4 af 4

831,764	0	0,14	0	831,764	0	0	0
954,993	0	0,08	0	954,993	0	0	0
1096,478	0	0,03	0	1096,478	0	0	0
1258,925	0	0	0	1258,925	0	0	0
1445,44	0	0	0	1445,44	0	0	0
1659,587	0	0	0	1659,587	0	0	0
1905,461	0	0	0	1905,461	0	0	0
2187,762	0	0	0	2187,762	0	0	0
2511,886	0	0	0	2511,886	0	0	0
2884,032	0	0	0	2884,032	0	0	0

B.2 Data for vandopløselighed

Emne: Vandopløselighed - mineaffald

Dato: 15-09-2016

	Zinkgruvan	Nalunaq
Filter [g]	6,54	6,81
Petriskål [g]	105,81	92,78
Mineaffald [g]	100	100
Tilsat vand demineraliseret [mL]	3 x 500	3 x 500
Efter filtrering inkl. Filter og petri [g]	256,12	243,89
Efter tørring v. 105 grader inkl. Filter og petri [g]	211,47	198,78
Mineaffald tilbage [g]	99,12	99,19
<u>Opløst materiale [g]</u>	<u>0,88</u>	<u>0,81</u>

B.3 Data for glødetab

Emne: Glødetab i mineaffald

Dato: 15-09-2016

	Zinkgruvan			Nalunaq		
Glas nr.	A	B	C	A	B	C
Glas [g]	10,4055	13,6420	13,5357	14,3540	10,0606	13,8037
Prøve [g]	2,5078	2,5017	2,4893	2,5053	2,5003	2,5012
Efter gløde prøve+glas [g]	12,9060	16,1357	16,0185	16,8549	12,5554	16,3006
Glødetab [g]	0,0073	0,0080	0,0065	0,0044	0,0055	0,0043
Glødetab [%]	0,2911	0,3198	0,2611	0,1756	0,2200	0,1719
<i>Gennemsnit</i>	<u>0,2907</u>			<u>0,1892</u>		

B.4 Data for pH og ledningsevne

Emne: pH og ledningsevne i mineaffald

Dato: 16-09-2016

Zinkgruvan	Glas nr.	Afvejet tailings [g]	pH	Ledningsevne [mS/cm]
	A	5	7,74	1,214
	B	5	7,69	1,212
	C	5	7,68	1,083

Gennemsnit

7,703

1,170

Nalunaq	Glas nr.	Afvejet tailings [g]	pH	Ledningsevne [mS/cm]
	A	5	8,23	0,549
	B	5	8,15	0,570
	C	5	8,33	0,579

Gennemsnit

8,237

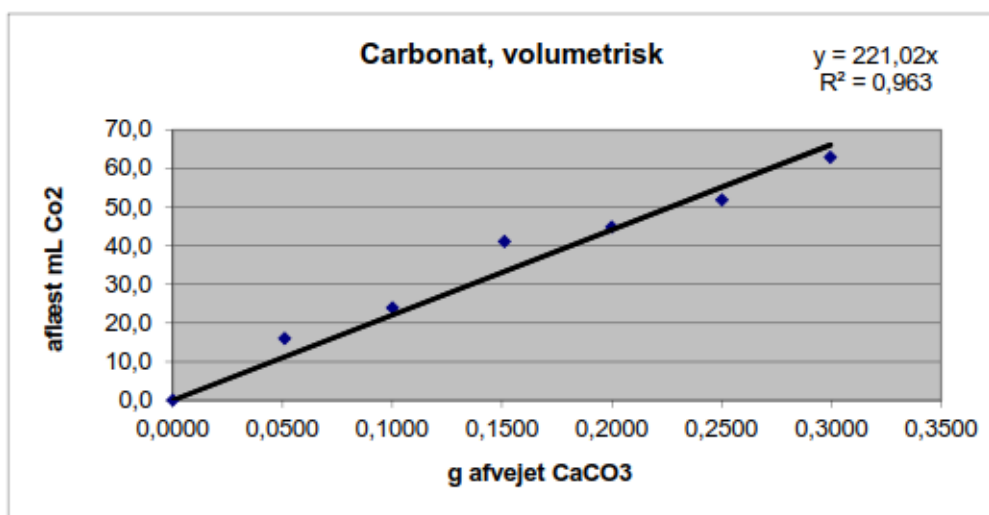
0,566

B.5 Data for calciumcarbonat indhold

Carbonat, volumetrisk

Dato: 28-10-2016

Standardrække:	afvejet CaCO ₃ [g]	aflæst CO ₂ [mL]
Nulprøve	0,0000	0,0
Standard: 0,05	0,0510	16,0
Standard: 0,10	0,1002	24,0
Standard: 0,15	0,1512	41,2
Standard: 0,20	0,1999	45,0
Standard: 0,25	0,2500	52,0
Standard: 0,30	0,2995	63,0



Prøve	afvejet [g]	aflæst CO ₂ [mL]	CaCO ₃ i %
Zinkgruvan A	2,5007	54,0	9,8
Zinkgruvan B	2,5001	57,2	10,4
Zinkgruvan C	2,5004	64,0	11,6
<u>Gennemsnit</u>			<u>10,6</u>

Prøve	afvejet [g]	aflæst CO ₂ [mL]	CaCO ₃ i %
Nalunaq A	2,5005	10,5	1,9
Nalunaq B	2,5007	9,4	1,7
Nalunaq C	2,4998	9,0	1,6
<u>Gennemsnit</u>			<u>1,7</u>

B.6 Data for vandindhold

Emne: vandindhold i søsand

Side 1 af 1

Søsand 0-4 mm Dato: 20/9-2016	Glas nr.	Vægt af glas [g]	Vægt i våd tilstand		Vægt i tør tilstand		Vægt i våd tilstand eksl. glas [g]	Vægt i tør tilstand eksl. glas [g]	Vandindhold [g]	Vandindhold [%]
			inkl. glas [g]	inkl. glas [g]	inkl. glas [g]	inkl. glas [g]				
A		19,14	24,51	24,5	5,37	5,36	0,01	0,19		
B		19,29	25,07	25,06	5,78	5,77	0,01	0,17		
C		19,36	26,74	26,74	7,38	7,38	0,00	0,00		

Gennemsnit

Grænse for vandindhold

0,12
0,20

Søsand 0-4 mm Dato: 19/10-2016	Glas nr.	Vægt af glas [g]	Vægt i våd tilstand		Vægt i tør tilstand		Vægt i våd tilstand eksl. glas [g]	Vægt i tør tilstand eksl. glas [g]	Vandindhold [g]	Vandindhold [%]
			inkl. glas [g]	inkl. glas [g]	inkl. glas [g]	inkl. glas [g]				
A		19,2	27,41	27,41	8,21	8,21	0,00	0,00		
B		19,09	28,46	28,45	9,37	9,36	0,01	0,11		
C		19,26	28,46	28,46	9,2	9,20	0,00	0,00		

Gennemsnit

Grænse for vandindhold

0,04
0,20

Søsand 0-4 mm Dato: 3/11-2016	Glas nr.	Vægt af glas [g]	Vægt i våd tilstand		Vægt i tør tilstand		Vægt i våd tilstand eksl. glas [g]	Vægt i tør tilstand eksl. glas [g]	Vandindhold [g]	Vandindhold [%]
			inkl. glas [g]	inkl. glas [g]	inkl. glas [g]	inkl. glas [g]				
A		19,20	28,41	28,41	9,21	9,21	0,00	0,00		
B		19,16	31,13	31,12	11,97	11,96	0,01	0,08		
C		19,20	30,22	30,21	11,02	11,01	0,01	0,09		

Gennemsnit

Grænse for vandindhold

0,06
0,20

B.6 Data for vandindhold

C | Data for tryktest

C.1 Støbninger til tryktest

C.1 Data for støbninger til tryktest

Overblik over støbninger til tryktest

side 1 af 4

Prøve nr.	Type	Hærdetid [dage]	Støbning dato	Støbning tid	Omstøbninger til tryktest		BASIS cement [kg]	Søsand [kg]	Dem. Vand [l]	Minesafald [kg]	Test dato	Test tid	Note
					Afformning dato	Afformning tid							
1 RF	Referenceprøve, m, vådt sand	7	7.9.16	11.41	08.09.16	11.15	450,07	1372,71	202,27	0,00	14.9.16	11.00	test + 2 timer fra støbepunkt
1 S5	Zinkgruvan, m, vådt sand vådt mineafald	7	7.9.16	11.41	08.09.16	11.20	427,55	1372,78	199,79	25,12	14.9.16	11.00	test + 2 timer fra støbepunkt
1 Z10	Zinkgruvan, m, vådt sand vådt mineafald	7	7.9.16	12.00	08.09.16	11.20	405,04	1372,39	197,59	50,08	14.9.16	11.40	test + 2 timer fra støbepunkt
1 N5	Naluna, m, vådt sand vådt mineafald	7	7.9.16	12.20	08.09.16	11.20	427,66	1372,64	198,03	26,67	14.9.16	12.00	test + 2 timer fra støbepunkt
1 N10	Naluna, m, vådt sand vådt mineafald	7	7.9.16	12.50	08.09.16	11.30	405,10	1372,73	194,06	53,31	14.9.16	12.20	test + 2 timer fra støbepunkt
2 RF	Referenceprøve, m, vådt sand	28	8.9.16	13.45	09.09.16	13.50	450,10	1372,74	202,38	0,00	6.10.16	14.50	test + 8 timer fra støbepunkt
2 S5	Zinkgruvan, m, vådt sand vådt mineafald	28	8.9.16	14.18	09.09.16	14.02	427,50	1372,67	199,99	25,07	6.10.16	16.00	test + 8 timer fra støbepunkt
2 Z10	Zinkgruvan, m, vådt sand vådt mineafald	28	8.9.16	15.30	09.09.16	14.26	405,07	1372,59	197,17	50,08	6.10.16	15.25	test + 8 timer fra støbepunkt
2 N5	Naluna, m, vådt sand vådt mineafald	28	8.9.16	15.53	09.09.16	14.44	427,45	1372,59	198,41	26,65	6.10.16	15.45	test + 8 timer fra støbepunkt
2 N10	Naluna, m, vådt sand vådt mineafald	28	8.9.16	16.15	09.09.16	14.59	404,99	1372,69	194,20	53,33	6.10.16	15.05	test + 8 timer fra støbepunkt
3 RF	Referenceprøve, m, tørret sand	28	23.9.16	11.15	24.09.16	09.00	450,07	1350,03	225,03	0,00	21.10.16	09.45	test + 8 timer fra støbepunkt
3 S5	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	28	23.9.16	11.40	24.09.16	09.20	427,57	1350,12	225,12	22,52	21.10.16	10.35	test + 8 timer fra støbepunkt
3 Z10	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	28	23.9.16	12.00	24.09.16	09.40	405,06	1350,09	225,05	45,06	21.10.16	10.50	test + 8 timer fra støbepunkt
3 N5	Naluna, m, tørret sand, tørret mineafald	28	23.9.16	13.00	24.09.16	09.50	427,54	1350,03	225,16	22,49	21.10.16	10.05	test + 8 timer fra støbepunkt
3 N10	Naluna, m, tørret sand, tørret mineafald	28	23.9.16	13.20	24.09.16	10.00	405,07	1350,11	225,01	45,06	21.10.16	09.25	test + 8 timer fra støbepunkt
4 RF	Referenceprøve, m, tørret sand	7	26.9.16	15.20	27.09.16	12.10	450,02	1350,12	225,26	0,00	3.10.16	14.00	test + 2 timer fra støbepunkt
4 S5	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	7	26.9.16	15.40	27.09.16	12.30	427,50	1350,10	225,14	22,54	3.10.16	14.20	test + 2 timer fra støbepunkt
4 Z10	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	7	26.9.16	16.05	27.09.16	12.40	405,06	1350,08	225,05	45,00	3.10.16	14.40	test + 2 timer fra støbepunkt
4 N5	Naluna, m, tørret sand, tørret mineafald	7	26.9.16	16.40	27.09.16	12.50	427,50	1350,00	225,04	22,51	3.10.16	15.00	test + 2 timer fra støbepunkt
4 N10	Naluna, m, tørret sand, tørret mineafald	7	26.9.16	17.00	27.09.16	13.00	404,97	1350,07	225,08	45,06	3.10.16	15.20	test + 2 timer fra støbepunkt
5 RF	Referenceprøve, m, tørret sand	14	14.10.16	15.30	15.10.16	12.00	450,15	1350,08	225,10	0,00	28.10.16	15.00	test + 4 timer fra støbepunkt
5 S5	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	14	14.10.16	15.55	15.10.16	12.15	427,58	1350,03	225,03	22,52	28.10.16	15.20	test + 4 timer fra støbepunkt
5 Z10	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	14	14.10.16	16.20	15.10.16	12.30	405,04	1350,10	225,07	45,02	28.10.16	15.40	test + 4 timer fra støbepunkt
5 N5	Naluna, m, tørret sand, tørret mineafald	14	14.10.16	16.40	15.10.16	12.45	427,60	1350,09	225,08	22,52	28.10.16	16.00	test + 4 timer fra støbepunkt
5 N10	Naluna, m, tørret sand, tørret mineafald	14	14.10.16	17.00	15.10.16	13.00	405,08	1350,02	225,16	45,04	28.10.16	16.20	test + 4 timer fra støbepunkt
6 RF	Referenceprøve, m, tørret sand	14	26.10.16	09.15	27.10.16	08.00	450,05	1350,09	225,01	0,00	9.11.16	10.20	test + 4 timer fra støbepunkt
6 S5	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald, ekstra vand	14	26.10.16	09.45	27.10.16	08.15	427,53	1350,06	240,03	22,52	9.11.16	10.55	test + 4 timer fra støbepunkt
6 Z10	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald, ekstra vand	14	26.10.16	10.05	27.10.16	08.30	405,02	1350,01	241,13	45,08	9.11.16	11.15	test + 4 timer fra støbepunkt
6 N5	Naluna, m, tørret sand, tørret mineafald, ekstra vand	14	26.10.16	10.25	27.10.16	08.45	427,57	1350,02	244,01	22,54	9.11.16	10.40	test + 4 timer fra støbepunkt
6 N10	Naluna, m, tørret sand, tørret mineafald, ekstra vand	14	26.10.16	10.55	27.10.16	09.00	405,04	1350,05	238,06	45,09	9.11.16	10.05	test + 4 timer fra støbepunkt
7 S5	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	14	3.11.16	11.20	04.11.16	08.45	427,54	1350,03	225,08	22,51	17.11.16	10.30	test + 4 timer fra støbepunkt
7 Z10	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	14	3.11.16	11.40	04.11.16	09.00	405,01	1350,05	225,01	45,02	17.11.16	10.45	test + 4 timer fra støbepunkt
8 S5	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	7	3.11.16	12.05	04.11.16	09.20	427,50	1350,01	225,03	22,50	1.12.16	09.40	test + 2 timer fra støbepunkt
8 Z10	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	7	3.11.16	12.25	04.11.16	09.40	405,04	1350,07	225,00	45,02	1.12.16	09.55	test + 2 timer fra støbepunkt
9 S5	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	28	17.12.16	12.10	18.12.16	10.00	427,52	1350,03	225,03	22,53	14.1.16	13.00	test + 8 timer fra støbepunkt
9 Z10	Zinkgruvan, m, tørret sand, tørret mineafald	28	17.12.16	12.30	18.12.16	10.15	405,01	1350,05	225,06	45,03	14.1.16	13.20	test + 8 timer fra støbepunkt
Omstøbninger til tryktest													
Prøve nr.	Type	Hærdetid [dage]	Støbning dato	Støbning tid	Afformning dato	Afformning tid	BASIS cement [kg]	Søsand [kg]	Dem. Vand [l]	Minesafald [kg]	Test dato	Test tid	Note
13 RF	Reference, vådt sand, vådt mineafald	7	16.09.16	17.00	17.09.16	16.45	450,02	1405,42	169,73	0,00	23.09.16	16.00	test + 2 timer fra støbepunkt

C.1 Data for støbninger til tryktest

Emne: Zinkgruvan justering for fugtindhold
Side 2 af 4

Dato: 06-09-2016

Delmaterialer referencoprøve	
Cement	450,00 ±2
Søsand 0-4 mm	1350,00 ±5
Vand	225,00 ±1
v/c forhold	0,50

Justeret sats	
Cement	450,00
Søsand 0-4 mm (våd tilstand)	1372,60
Vand	202,40

Fugtindhold i zinkgruvan			
Glas nr.		A	B
Vægt af glas [g]		18,93	21,68
Vægt våd tilstand [g]		26,66	33,79
Vægt tør tilstand [g]		26	32,52
Vandindhold [%]		9,34	11,72
Vandindhold gennemsnit [%]		10,17	

Delmaterialer 5 % mineafald	
Cement	427,50 ±2
Søsand 0-4 mm	1350,00 ±5
Vand	225,00 ±1
mineafald	22,50
v/p forhold	0,50

Justeret sats	
Cement	427,50
Søsand 0-4 mm (våd tilstand)	1372,60
Vand	202,40
mineafald (våd tilstand)	22,50

Fugtindhold i sand			
Glas nr.		A	B
Vægt af glas [g]		19,18	19,35
Vægt våd tilstand [g]		29,22	31,5
Vægt tør tilstand [g]		29,04	31,3
Vandindhold [%]		1,83	1,67
Vandindhold gennemsnit [%]		1,65	

Delmaterialer 10 % mineafald	
Cement	405,00 ±2
Søsand 0-4 mm	1350,00 ±5
Vand	225,00 ±1
mineafald	45,00
v/p forhold	0,50

Justeret sats	
Cement	405,00
Søsand 0-4 mm (våd tilstand)	1372,60
Vand	202,40
mineafald (våd tilstand)	45,00

0,2 % i vandabsorptionsevne trækkes fra

Noter:

Betonen sammensættes ud fra det ekstrare vandindhold i delmaterialerne
Vandindholdet i delmaterialerne er målt ud fra en tørring ved 105 grader i ca. 24 timer
Referenceprøve er efter DS/EN 196-1
v/p forhold står for vand/powder forhold, p indeholder både cement og tællings mængder

C.1 Data for støbninger til tryktest

Emne: Nalunaq justering for fugtindhold
Side 3 af 4

Dato: 01-09-2016

Delmaterialer referenceprøve		[g]
Cement		450,00 ±2
Søsand 0-4 mm		1350,00 ±5
Vand		225,00 ±1
v/c forhold		0,50

Justeret sats		[g]
Cement		450,00
Søsand 0-4 mm (våd tilstand)		1372,60
Vand		202,40

Fugtindhold i zinkkrivan			
Glas nr.	A	B	C
Vægt af glas [g]	19,19	19,27	19,18
Vægt våd tilstand [g]	28,01	29,14	32,13
Vægt tør tilstand [g]	26,83	27,84	30,33
Vandindhold [%]	15,45	15,17	16,14
Vandindhold gennemsnit [%]	15,59		

Delmaterialer 5 % mineafald		[g]
Cement		427,50 ±2
Søsand 0-4 mm		1350,00 ±5
Vand		225,00 ±1
mineafald		22,50
v/(c+h) forhold		0,50

Justeret sats		[g]
Cement		427,50
Søsand 0-4 mm (våd tilstand)		1372,60
Vand		198,24
mineafald (våd tilstand)		26,65

Fugtindhold i sand			
Glas nr.	A	B	C
Vægt af glas [g]	19,18	19,35	19,51
Vægt våd tilstand [g]	29,22	31,5	29,01
Vægt tør tilstand [g]	29,04	31,3	28,82
Vandindhold [%]	1,83	1,67	2,04
Vandindhold gennemsnit [%]	1,65		

0,2 % vandabsorptionsevne trækkes fra

Delmaterialer 10 % mineafald		[g]
Cement		405,00 ±2
Søsand 0-4 mm		1350,00 ±5
Vand		225,00 ±1
mineafald		45,00
v/(c+h) forhold		0,50

Justeret sats		[g]
Cement		405,00
Søsand 0-4 mm (våd tilstand)		1372,60
Vand		194,09
mineafald (våd tilstand)		53,31

Noter:
Betonen sammensættes ud fra det ekstra vandindhold i delmaterialerne
Vandindholdet i delmaterialerne er målt ud fra en tørring ved 105 grader i ca. 24 timer
Referenceprøve er efter DS/EN 196-1
v/p forhold står for vand/powder forhold, p indeholder både cement og tallings mængden

C.1 Data for støbninger til tryktest

Emne: Rf a referenceprøve justering for fugtindhold
 Side 4 af 4

Dato: 06-09-2016

Delematerialer referenceprøve	[g]
Cement	450,00 ±2
Søsand 0-4 mm	1350,00 ±5
Vand	225,00 ±1
v/c-forhold	0,50

Justeret sats	[g]
Cement	450,00
Søsand 0-4 mm (våd tilstand)	1405,47
Vand	169,53

Noter:
 Betonen sammensættes ud fra det ekstra vandindhold i delematerialerne
 Vandindholdet i delematerialerne er målt ud fra en tørring ved 105 grader i ca. 24 timer
 Referenceprøve er efter DS/EN 196-1
 v/p forhold står for vand/powder forhold, p indeholder både cement og tællingsmængden

Fugtindhold i sand			
Glas nr.	A	B	C
Vægt af glas [g]	19,14	19,3	19,36
Vægt våd tilstand [g]	27,06	31,74	29,37
Vægt tør tilstand [g]	26,77	31,17	29
Vandindhold [%]	3,80	4,80	3,84
Vandindhold gennemsnit [%]	3,95		

0,2 % i vandabsorptionsevne trækkes fra

C.2 Tryktest resultater

C.2 Data for tryktest

Tryktest resultater													side 1 af 8		
Prøve	Længde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Areal [mm ²]	Trykkraft 1 [kN]	Trykkraft 2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Hærdetid [Døgn]	Dato	Kommentarer	Gennemsnit	Standardafvigelse
1 a RF	160,80	42,50	40,00	1700,00	77	78	45,29	45,88	609,56	2229,88	7	23-09-2016			
	160,80	42,50	40,00												
1 a RF	161,00	41,80	40,00	1672,00	78	80	46,65	47,85	605,76	2250,29	7	23-09-2016			
	161,00	41,80	40,00												
1 a RF	160,80	43,00	40,00	1720,00	79	79	45,93	45,93	611,16	2209,74	7	23-09-2016	Ingen prøver afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,80	43,00	40,00												
12 5 A	161,00	40,00	40,25	1610,00	56	59	34,78	36,65	597,50	2154,11	7	14-09-2016			
	160,75	40,00	40,25												
12 5 B	161,00	41,00	40,00	1640,00	49	58	29,88	35,37	569,67	2157,51	7	14-09-2016			
	161,00	41,00	40,00												
12 5 C	160,50	41,00	40,50	1653,67	50	56	30,24	33,86	580,20	2186,02	7	14-09-2016	To prøver afviger fra DS øvre og nedre grænse*		33,46
	160,50	41,00	40,00												
12 10 A	160,10	41,00	40,50	1649,57	51	55	30,92	33,34	586,63	2217,82	7	14-09-2016			
	160,35	41,00	40,23												
12 10 B	161,00	40,00	40,00	1600,00	56	57	35,00	35,63	571,00	2216,61	7	14-09-2016			
	161,00	40,00	40,00												
12 10 C	161,00	40,50	40,00	1620,00	59	58	36,42	35,80	586,70	2249,44	7	14-09-2016	En prøve afviger fra DS øvre og nedre grænse*		34,52
	161,00	40,50	40,00												
1 N 5 A	160,25	42,00	40,50	1690,88	65	58	38,44	34,30	588,52	2170,27	7	14-09-2016			
	160,50	42,00	40,50												
1 N 5 B	160,50	42,00	40,50	1666,67	65	64	38,60	38,01	588,29	2176,69	7	14-09-2016			
	160,50	41,75	40,33												
1 N 5 C	160,50	42,00	40,00	1666,67	56	62	33,60	37,20	588,38	2201,27	7	14-09-2016	Ingen prøver afviger fra DS øvre og nedre grænse*		36,69
	160,25	41,50	40,00												
1 N 10 A	160,50	41,00	40,00	1653,33	55	61	33,27	36,90	583,77	2196,50	7	14-09-2016			
	160,75	41,33	40,00												
1 N 10 B	160,25	41,00	40,00	1640,00	49	48	29,88	29,27	586,19	2232,21	7	14-09-2016			
	160,00	41,00	40,00												
1 N 10 C	161,00	41,00	40,00	1646,67	55	61	33,40	37,04	571,14	2157,67	7	14-09-2016	Fire prøver afviger fra DS øvre og nedre grænse*		33,29
	160,50	41,00	40,00												

C.2 Data for tryktest

Prøve	Tryktest resultater										Gennem-snit	Standard-afvigelse					
	Længde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Areal [mm ²]	Trykkræft 1 [kN]	Trykkræft 2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]			Hærdetid [Døgn]	Dato	Kommentarer		
2RF A	161,00	40,00	40,20	40,20													
	161,00	40,00	40,20	40,20													
2RF B	161,00	40,50	40,20	40,20	93	89	57,84	55,35	572,95	2213,12	28	06-10-2016					
	161,00	40,50	40,20	40,20													
2RF C	161,00	40,50	40,20	40,20	90	93	55,28	57,12	594,57	2268,28	28	06-10-2016					
	161,00	40,50	40,20	40,20													
2Z5 A	160,50	41,00	40,00	40,00	89	93	54,66	57,12	596,96	2277,29	28	06-10-2016	ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*				
	160,50	41,00	40,00	40,00													
2Z5 B	160,50	40,20	40,00	40,00	84	88	51,22	53,66	599,52	2277,64	28	06-10-2016					
	160,50	40,20	40,00	40,00													
2Z5 C	160,50	41,00	40,00	40,00	84	86	52,24	53,48	582,53	2257,13	28	06-10-2016					
	160,50	41,00	40,00	40,00													
2Z10 A	160,00	41,60	40,00	40,00	80	85	48,78	51,83	597,73	2270,84	28	06-10-2016	ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*				
	160,00	41,60	40,00	40,00													
2Z10 B	160,00	41,67	40,00	40,00	79	72	47,40	43,20	600,4	2251,50	28	06-10-2016					
	160,00	41,00	40,00	40,00													
2Z10 C	160,00	41,00	40,00	40,00	76	83	46,34	50,61	587,29	2238,15	28	06-10-2016					
	160,00	41,30	40,00	40,00													
2N5 A	161,00	40,00	40,00	40,00	71	72	42,98	43,58	580,33	2195,56	28	06-10-2016	En prøve afviger fra DS øvre og nedre grænse*				
	161,00	40,00	40,00	40,00													
2N5 B	161,00	40,00	40,00	40,00	82	87	51,25	54,38	581,85	2258,73	28	06-10-2016					
	161,00	41,60	40,00	40,00													
2N5 C	161,00	41,60	40,00	40,00	86	88	51,68	52,88	594,17	2217,85	28	06-10-2016					
	161,00	41,00	40,00	40,00													
2N10 A	161,00	41,07	40,00	40,00	90	87	54,79	52,96	589,74	2229,90	28	06-10-2016	ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*				
	161,00	41,30	40,20	40,20													
2N10 B	160,75	41,30	40,20	40,20	79	77	47,58	46,38	595,84	2232,56	28	06-10-2016					
	160,50	41,80	40,00	40,00													
2N10 C	160,75	41,80	40,00	40,00	79	79	47,25	47,25	598,8	2227,89	28	06-10-2016					
	161,00	41,60	40,00	40,00													

* DS øvre og nedre grænse regnes som ± 10% af middelværdien jf. DS/EN 196-1

side 2 af 8

Bilag C Data for tryktest

C.2 Data for tryktest

Prøve	Tryktest resultater			Trykkræft 1 [kN]	Trykkræft 2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Hærdetid [Døgn]	Dato	Kommentarer	Gennemsnit	Standardafvigelse
	Længde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]											
3RF A	161,00	42,00	40,00	94	95	55,95	56,55	601,62	2224,27	28	21-10-2016			
	161,00	42,00	40,00											
3RF B	161,00	42,00	40,00	91	89	54,17	52,98	601,88	2225,23	28	21-10-2016			
	161,00	42,00	40,00											
3RF C	160,00	42,00	40,00	91	91	54,17	54,17	601,35	2237,17	28	21-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,00	42,00	40,00											
3Z5 A	160,00	41,00	40,00	84	89	50,77	53,79	593,04	2240,03	28	21-10-2016			
	160,00	41,37	40,00											
3Z5 B	160,00	41,00	40,00	84	87	51,22	53,05	599,01	2282,81	28	21-10-2016			
	160,00	41,00	40,00											
3Z5 C	160,00	41,00	40,00	84	85	51,22	51,83	597,29	2276,26	28	21-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,00	41,00	40,00											
3Z10 A	160,50	41,00	40,00	78	81	47,56	49,39	582,44	2212,75	28	21-10-2016			
	160,50	41,00	40,00											
3Z10 B	160,50	42,00	40,00	79	71	47,25	42,46	584,28	2177,26	28	21-10-2016			
	160,50	41,80	40,00											
3Z10 C	160,50	41,00	40,00	74	78	45,12	47,56	573,92	2180,38	28	21-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,50	41,00	40,00											
3N5 A	160,50	42,80	40,00	84	83	48,91	48,33	600,00	2176,82	28	21-10-2016			
	160,50	43,00	40,00											
3N5 B	160,50	42,90	40,00	81	79	47,35	46,18	598,50	2179,84	28	21-10-2016			
	160,50	42,70	40,00											
3N5 C	160,50	42,77	40,00	75	85	44,64	50,60	601,78	2231,79	28	21-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,50	42,00	40,00											
3N10 A	160,50	42,20	40,00	76	76	45,02	45,02	591,29	2182,49	28	21-10-2016			
	160,50	42,20	40,00											
3N10 B	160,50	41,00	40,00	77	74	46,80	44,98	593,65	2248,03	28	21-10-2016			
	160,50	41,13	40,00											
3N10 C	160,50	41,00	40,00	71	73	43,29	44,51	590,25	2242,42	28	21-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,50	41,00	40,00											

* DS øvre og nedre grænse regnes som ± 10% af middelværdien jf. DS/EN 196-1

C.2 Data for tryktest

Prøve	Tryktest resultater				Areal [mm ²]	Trykkræft 1 [kN]	Trykkræft 2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Hærdetid [Døgn]	Dato	Kommentarer	Gennemsnit	Standardafvigelse
	Længde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Areal [mm ²]												
4RF A	160,50	41,20	40,00	40,00	1648,00	70	69	42,48	41,87	589,00	2226,81	7	03-10-2016			
	160,50	41,20	40,00	40,00												
4RF B	160,50	41,20	40,00	40,00	1648,00	73	73	44,30	44,30	591,50	2236,26	7	03-10-2016			
	160,50	41,20	40,00	40,00												
4RF C	160,50	41,20	40,00	40,00	1648,00	73	71	44,30	43,08	584,07	2208,17	7	03-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,50	41,20	40,00	40,00												
4Z5 A	160,50	42,50	40,50	40,50	1721,25	63	68	36,60	39,51	591,38	2140,66	7	03-10-2016			
	160,50	42,50	40,50	40,50												
4Z5 B	160,50	41,80	40,50	40,50	1694,25	66	68	38,96	40,14	595,95	2191,58	7	03-10-2016			
	160,50	41,80	40,50	40,50												
4Z5 C	160,50	43,00	40,50	40,50	1741,50	67	68	38,47	39,05	594,45	2126,75	7	03-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,50	43,00	40,50	40,50												
4Z10 A	160,20	42,00	40,20	40,20	1688,40	65	63	38,50	37,31	595,87	2203,00	7	03-10-2016			
	160,20	42,00	40,20	40,20												
4Z10 B	160,00	42,40	40,20	40,20	1705,82	65	67	38,10	39,28	596,08	2183,99	7	03-10-2016			
	160,00	42,40	40,20	40,20												
4Z10 C	160,00	41,70	40,30	40,30	1684,54	65	65	38,59	38,59	591,63	2195,07	7	03-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,00	41,70	40,30	40,30												
4N5 A	160,50	40,50	40,00	40,00	1620,00	71	70	43,83	43,21	577,81	2222,26	7	03-10-2016			
	160,50	40,50	40,00	40,00												
4N5 B	160,50	41,60	40,00	40,00	1664,00	64	70	38,46	42,07	592,82	2219,70	7	03-10-2016			
	160,50	41,60	40,00	40,00												
4N5 C	160,80	40,50	40,00	40,00	1613,33	68	67	42,15	41,53	572,00	2204,88	7	03-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,80	40,50	40,00	40,00												
4N10 A	160,00	42,00	40,00	40,00	1680,00	60	65	35,71	38,69	590,07	2195,20	7	03-10-2016			
	160,00	42,00	40,00	40,00												
4N10 B	160,00	42,00	40,00	40,00	1680,00	62	63	36,90	37,50	590,00	2194,94	7	03-10-2016			
	160,00	42,00	40,00	40,00												
4N10 C	160,00	42,00	40,00	40,00	1680,00	63	64	37,50	38,10	591,95	2202,19	7	03-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,00	42,00	40,00	40,00												

* DS øvre og nedre grænse regnes som ± 10% af middelværdien jf. DS/EN 196-1

side 4 af 8

C.2 Data for tryktest

Tryktest resultater													side 5 af 8		
Prøve	Længde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Areal [mm ²]	Trykkraft 1 [kN]	Trykkraft 2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Hardetid [Døgn]	Dato	Kommentarer	Gennemsnit	Standardafvigelse
5RF A	160,50	40,40	40,00	1616,00	72	76	44,55	47,03	576,5	2222,71	14	28-10-2016			
	160,50	40,40	40,00												
5RF B	160,50	40,00	40,00	1600,00	71	71	44,38	44,38	566,44	2205,76	14	28-10-2016			
	160,50	40,00	40,00												
5RF C	160,50	40,40	40,00	1616,00	73	73	45,17	45,17	574,23	2213,96	14	28-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,50	40,40	40,00												
5Z5 A	160,00	40,40	40,00	1616,00	64	61	39,60	37,75	569,69	2203,32	14	28-10-2016			
	160,00	40,40	40,00												
5Z5 B	160,00	40,40	40,00	1616,00	66	61	40,84	37,75	572,72	2215,04	14	28-10-2016			
	160,00	40,40	40,00												
5Z5 C	160,00	40,50	40,00	1622,67	66	66	40,67	40,67	579,02	2230,20	14	28-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,00	40,70	40,00												
5Z10 A	160,50	41,00	40,00	1640,00	61	61	37,20	37,20	580,47	2205,27	14	28-10-2016			
	160,50	41,00	40,00												
5Z10 B	160,50	40,00	40,00	1600,00	55	56	34,38	35,00	559,71	2179,56	14	28-10-2016			
	160,50	40,00	40,00												
5Z10 C	160,50	40,50	40,00	1620,00	60	59	37,04	36,42	573,48	2205,61	14	28-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,50	40,50	40,00												
5N5 A	160,00	40,80	40,00	1634,67	69	67	42,21	40,99	587,27	2245,37	14	28-10-2016			
	160,00	41,00	40,00												
5N5 B	160,00	41,70	40,00	1668,00	71	68	42,57	40,77	592,36	2219,57	14	28-10-2016			
	160,00	41,70	40,00												
5N5 C	160,00	40,80	40,00	1632,00	70	68	42,89	41,67	585,83	2243,53	14	28-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,00	40,80	40,00												
5N10 A	160,00	41,00	40,00	1640,00	61	61	37,20	37,20	575,8	2194,36	14	28-10-2016			
	160,00	41,00	40,00												
5N10 B	160,00	40,50	40,00	1630,67	55	57	33,73	34,96	567,47	2174,99	14	28-10-2016			
	160,00	40,77	40,00												
5N10 C	160,00	41,00	40,00	1640,00	59	59	35,98	35,98	582,51	2219,93	14	28-10-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*		
	160,00	41,00	40,00												

* DS øvre og nedre grænse regnes som ± 10% af middelværdien jf. DS/EN 196-1

C.2 Data for tryktest

Prøve	Tryktest resultater				Areal [mm ²]	Trykkræft 1 [kN]	Trykkræft 2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Hærdetid [Dage]	Dato	Kommentarer	Gennemsnit	Standardafvigelse
	Længde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Trykstyrke 2 [MPa]												
6RF A	160,00	41,50	40,00													
	160,00	41,50	40,00	1660,00	78	80	46,99	48,19	586,11	2206,74	14	09-11-2016				
6RF B	160,50	41,50	40,00													
	160,50	41,70	40,00													
6RF C	160,50	41,63	40,00	1665,33	74	76	44,44	45,64	585,97	2192,30	14	09-11-2016				
	160,50	41,60	40,00													
6Zv5 A	160,00	42,00	40,00	1664,00	74	78	44,47	46,88	596,56	2233,70	14	09-11-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*	46,10	1,38	
	160,00	42,00	40,00													
6Zv5 B	160,00	42,00	40,00	1680,00	68	69	40,48	41,07	591,13	2199,14	14	09-11-2016				
	160,00	42,00	40,00													
6Zv5 C	160,00	42,00	40,00	1680,00	73	72	43,45	42,86	593,39	2207,55	14	09-11-2016				
	160,00	42,00	40,00													
6Zv10 A	160,00	41,00	40,00	1640,00	62	59	37,80	35,98	571,37	2167,32	14	09-11-2016				
	160,75	41,00	40,00													
6Zv10 B	160,50	41,00	40,00	1642,67	63	60	38,35	36,53	583,10	2211,66	14	09-11-2016				
	160,50	41,20	40,00													
6Zv10 C	160,50	41,07	40,00	1642,67	59	60	35,92	36,53	570,33	2163,23	14	09-11-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*	36,85	0,91	
	160,50	41,20	40,00													
6Nv5 A	160,50	42,00	40,00	1680,00	70	71	41,67	42,26	589,32	2185,58	14	09-11-2016				
	160,50	42,00	40,00													
6Nv5 B	160,50	41,80	40,30	1676,48	67	70	39,96	41,75	585,05	2174,30	14	09-11-2016				
	160,50	41,50	40,30													
6Nv5 C	160,50	42,00	40,00	1680,00	69	70	41,07	41,67	590,93	2191,55	14	09-11-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*	41,40	0,73	
	160,50	42,00	40,00													
6Nv10 A	160,00	41,40	40,00	1658,67	63	58	37,98	34,97	588,63	2214,55	14	09-11-2016				
	160,50	41,40	40,00													
6Nv10 B	160,50	41,50	40,00	1661,33	64	61	38,52	36,72	584,53	2192,17	14	09-11-2016				
	160,50	41,53	40,00													
6Nv10 C	160,50	41,40	40,00	1657,33	63	65	38,01	39,22	584,92	2198,93	14	09-11-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*	37,57	1,38	
	160,50	41,43	40,00													

* DS øvre og nedre grænse regnes som ± 10% af middelværdien jf. DS/EN 196-1

C.2 Data for tryktest

Tryktest resultater

Prøve	Længde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Areal [mm ²]	Trykkræft 1 [kN]	Trykkræft 2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Hærdetid [Døgn]	Dato	Kommentarer	Gennemsnit afvigelse	Standard- afvigelse
7Zk5 A	160,00	41,80	40,00												
	160,00	41,80	40,00												
7Zk5 B	160,00	41,87	40,00	1674,67	60	61	35,83	36,43	586,44	2206,36	7	10-11-2016			
	160,00	42,00	40,00												
7Zk5 C	160,00	42,00	40,00	1680,00	60	66	35,71	39,29	593,07	2206,36	7	10-11-2016			
	160,00	41,60	40,00												
7Zk10 A	160,50	41,50	40,00	1666,67	57	63	34,20	37,80	591,25	2217,19	7	10-11-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*	36,54	1,62
	160,50	41,50	40,00												
7Zk10 B	160,50	41,53	40,00	1661,33	56	54	33,71	32,50	586,36	2199,04	7	10-11-2016			
	160,50	41,80	40,00												
7Zk10 C	160,50	41,87	40,00	1674,67	59	58	35,23	34,63	593,19	2206,94	7	10-11-2016			
	160,50	42,00	40,00												
8Zk5 A	160,50	41,20	40,00	1648,00	53	58	31,55	34,52	589,62	2186,69	7	10-11-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*	33,69	1,29
	160,50	41,20	40,00												
8Zk5 B	160,50	41,20	40,00	1648,00	63	65	38,23	39,44	587,21	2220,04	14	17-11-2016			
	160,50	41,20	40,00												
8Zk5 C	160,50	41,20	40,00	1648,00	61	59	37,01	35,80	581,35	2197,89	14	17-11-2016			
	160,50	41,00	40,00												
8Zk10 A	160,50	41,07	40,00	1642,67	60	68	36,53	41,40	577,42	2190,12	14	17-11-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*	38,07	1,90
	160,50	40,50	40,00												
8Zk10 B	160,50	40,67	40,00	1626,67	50	54	30,74	33,20	575,45	2204,11	14	17-11-2016			
	160,50	40,50	40,00												
8Zk10 C	160,50	40,50	40,00	1620,00	55	58	33,95	35,80	579,09	2227,18	14	17-11-2016			
	160,50	41,00	40,00												
	160,50	41,07	40,00	1642,67	61	54	37,13	32,87	582,36	2208,85	14	17-11-2016	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*	33,95	2,07

* DS øvre og nedre grænse regnes som ± 10% af middelværdien jf. DS/EN 196-1

C.2 Data for tryktest

Tryktest resultater

side 8 af 8

Prøve	Længde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Areal [mm ²]	Trykkræft 1 [kN]	Trykkræft 2 [kN]	Trykstyrke 1 [MPa]	Trykstyrke 2 [MPa]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Hærdetid [Døgn]	Dato	Kommentarer	Gennemsnit	Standardafvigelse
9ZK 5 A	160,00	42,50	40,00												
	160,00	42,50	40,00												
	160,00	42,00	40,00	1693,33	76	75	44,88	44,29	600,62	2216,86	28	14-01-2017			
9ZK 5 B	160,00	42,00	40,00												
	160,00	42,00	40,00												
	160,00	42,00	40,00	1680,00	79	63	47,02	37,50	604,44	2248,66	28	14-01-2017			
9ZK 5 C	160,00	41,00	40,00												
	160,00	41,00	40,00												
	160,00	41,00	40,00	1640,00	78	78	47,56	47,56	600,7	2289,25	28	14-01-2017	Ingen afviger fra DS øvre og nedre grænse*	44,80	3,51
9ZK 10	160,50	42,00	40,00												
	160,50	42,00	40,00												
	160,50	41,83	40,00	1673,33	38	67	22,71	40,04	595,91	2218,83	28	14-01-2017			
9ZK 10	160,00	41,00	40,00												
	160,00	41,00	40,00												
	160,00	41,00	40,00	1640,00	64	56	39,02	34,15	594,19	2264,44	28	14-01-2017			
9ZK 10	160,00	41,50	40,00												
	160,00	41,50	40,00												
	160,00	41,00	40,00	1653,33	72	70	43,55	42,34	592,08	2238,21	28	14-01-2017	En afviger fra DS øvre og nedre grænse*	39,82	3,26

* DS øvre og nedre grænse regnes som ± 10% af middelværdien jf. DS/EN 196-1

D | Data for flydesætmål

D.1 Data for flydesætmål

D.1 Data for flydesætmål

Emne: Flydesætmål

Side 1 af 2

Dato: 07-10-2016

Referenceblanding RF						
Nr.	Blanderecept	[g]	Mål 1 [mm]	Mål 2 [mm]	Mål 1 + 2	Gennemsnit
RF A	Cement	450,01	60	60	120	122
	Søsand 0-4 mm	1350,08	60	65	125	
	Vand	225,16				
RF B	Cement	450,03	58	60	118	
	Søsand 0-4 mm	1350,02	55	65	120	
	Vand	225,03				
RF C	Cement	450,02	60	60	120	
	Søsand 0-4 mm	1350,08	68	58	126	
	Vand	225,10				

Zinkgruvan 5 %						
Nr.	Blanderecept	[g]	Mål 1 [mm]	Mål 2 [mm]	Mål 1 + 2	Gennemsnit
Z5 A	Cement	427,51	50	61	111	112
	Søsand 0-4 mm	1350,02	50	61	111	
	Vand	225,01				
	mineaffald	22,51				
Z5 B	Cement	427,5	43	70	113	
	Søsand 0-4 mm	1350,13	52	59	111	
	Vand	225,08				
	mineaffald	22,52				

Zinkgruvan 10 %						
Nr.	Blanderecept	[g]	Mål 1 [mm]	Mål 2 [mm]	Mål 1 + 2	Gennemsnit
Z10 A	Cement	405,03	59	56	115	113
	Søsand 0-4 mm	1350,08	60	52	112	
	Vand	225,01				
	mineaffald	45,01				
Z10 B	Cement	405,00	52	60	112	
	Søsand 0-4 mm	1350,10	57	56	113	
	Vand	225,01				
	mineaffald	45,02				

D.1 Data for flydesætmål

Emne: Flydesætmål

Side 2 af 2

Dato: 07-10-2016

Nalunaq 5 %						
Nr.	Blanderecept	[g]	Mål 1 [mm]	Mål 2 [mm]	Mål 1 + 2	Gennemsnit
N5 A	Cement	427,67	55	54	109	<u>109</u>
	Søsand 0-4 mm	1350,07	52	59	111	
	Vand	225,13				
	mineaffald	22,5				
N5 B	Cement	427,52	54	52	106	
	Søsand 0-4 mm	1350	47	64	111	
	Vand	225,13				
	mineaffald	22,54				

Nalunaq 10 %						
Nr.	Blanderecept	[g]	Mål 1 [mm]	Mål 2 [mm]	Mål 1 + 2	Gennemsnit
N10 A	Cement	405,00	60	55	115	<u>115</u>
	Søsand 0-4 mm	1350,02	54	62	116	
	Vand	225,05				
	mineaffald	45,02				
N10 B	Cement	405,00	55	58	113	
	Søsand 0-4 mm	1350,12	55	59	114	
	Vand	225,05				
	mineaffald	45,01				

D.2 Data for optimering af flydesætmål

D.2 Data for optimering af flydesætmål

Emne: Flydesætmål optimering

Side 1 af 2

Dato: 07-10-2016

Zinkgruvan 5 %								
Recept Nr.	Ekstra vand [g]	Blanderecept [g]	Mål 1 [mm]	Mål 2 [mm]	Mål 1 + 2	Valgte recept	Gennemsnit valgte recept	
Z5 #1	19	Cement	427,53	70	60	130		
		Søsand 0-4 mm	1350,02	70	60	130		
		Vand	244,04					
		mineaffald	22,52					
Z5 #2 A	15	Cement	427,49	60	60	120	X	<u>121</u>
		Søsand 0-4 mm	1350,05	65	55	120		
		Vand	240,08					
		mineaffald	22,49					
Z5 #2 B	15	Cement	427,52	60	60	120	X	<u>121</u>
		Søsand 0-4 mm	1350,02	65	57	122		
		Vand	240,13					
		mineaffald	22,53					

Zinkgruvan 10 %								
Recept Nr.	Ekstra vand [g]	Blanderecept [g]	Mål 1 [mm]	Mål 2 [mm]	Mål 1 + 2	Valgte recept	Gennemsnit valgte recept	
Z10 #1 A	16	Cement	405,01	60	64	124	X	<u>122</u>
		Søsand 0-4 mm	1350,01	62	57	119		
		Vand	241,10					
		mineaffald	45,02					
Z10 #1 B	16	Cement	405,05	60	60	120	X	<u>122</u>
		Søsand 0-4 mm	1350,03	67	58	125		
		Vand	241,04					
		mineaffald	45,03					

Nalunaq 5 %								
Recept Nr.	Ekstra vand [g]	Blanderecept [g]	Mål 1 [mm]	Mål 2 [mm]	Mål 1 + 2	Valgte recept	Gennemsnit valgte recept	
N5 #1	23	Cement	427,49	60	65	125		
		Søsand 0-4 mm	1350,04	60	71	131		
		Vand	247,75					
		mineaffald	22,51					
N5 #2	18	Cement	427,5	58	60	118		
		Søsand 0-4 mm	1350,02	59	57	116		
		Vand	242,99					
		mineaffald	22,53					
N5 #3	20	Cement	427,52	70	53	123		
		Søsand 0-4 mm	1350,02	72	57	129		
		Vand	245,05					
		mineaffald	22,52					
N5 #4 A	19	Cement	427,55	60	60	120	X	<u>123</u>
		Søsand 0-4 mm	1349,99	65	58	123		
		Vand	244,10					
		mineaffald	22,49					
N5 #4 B	19	Cement	427,56	60	68	128	X	<u>123</u>
		Søsand 0-4 mm	1350,08	58	63	121		
		Vand	244,06					
		mineaffald	22,54					

D.2 Data for optimering af flydesætmål

Emne: Flydesætmål optimering

Side 2 af 2

Dato: 07-10-2016

Nalunaq 10 %								
Recept Nr.	Ekstra vand [g]	Blanderecept [g]	Mål 1 [mm]	Mål 2 [mm]	Mål 1 + 2	Valgte recept	Gennemsnit valgte recept	
N10 #1 A	13	Cement	405,00	60	60	120	X	<u>123</u>
		Søsand 0-4 mm	1350,03	58	66	124		
		Vand	238,09					
		mineaffald	45,00					
N10 #1 B	13	Cement	405,08	58	65	123	X	
		Søsand 0-4 mm	1350,02	57	67	124		
		Vand	238,03					
		mineaffald	45,04					

E | Data for afbindingstid

E.1 Data for afbindingstid

I dokumentet med data for afbindingstid er tidspunkterne for den begyndende afbinding markeret med grå.

side 1 af 2

E.1 Data for afbindingstid

Blandeforhold for afbindingsprøver					
Prøve nr.	Type	BASIS Cement [g]	Søsand [g]	Dem. Vand [g]	Mineaffald [g]
RF	Referenceprøve, m tørret sand	450,07	1350,04	225,01	0,00
Z5	Zinkgruvan, m. tørret sand og tørret mineaffald	427,47	1350,04	225,04	22,53
Z10	Zinkgruvan, m. tørret sand og tørret mineaffald	405,02	1350,01	225,08	45,02
N5	Nalunaq, m. tørret sand og tørret mineaffald	427,50	1350,01	225,03	22,53
N10	Nalunaq, m. tørret sand og tørret mineaffald	405,02	1350,05	225,11	45,00

Data for afbinding									
RF	Z 5		Z 10		N 5		N 10		
tid [min] [mm]	tid [min]	[mm]	tid [min]	[mm]	tid [min]	[mm]	tid [min]	[mm]	[mm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	10	0	10	0	10	0	10	0
20	0	20	0	20	0	20	0	20	0
30	0	30	0	30	0	30	0	30	0
40	0	40	0	40	0	40	0	40	0
50	0	50	0	50	0	50	0	50	0
60	0	60	0	60	0	60	0	60	0
70	0	70	0	70	0	70	0	70	0
80	0	80	0	80	0	80	0	80	0
90	0	90	0	90	0	90	0	90	0
100	0	100	0	100	0	100	0	100	0
110	0	110	0	110	0	110	0	110	0
120	0	120	0	120	0	120	0	120	0
130	0	130	0	130	0	130	0	130	0,1
140	0,2	140	0	140	0	140	0	140	0
150	5	150	7,4	150	0	150	0	150	0
160	5,1	160	0	160	0	160	3,6	160	0
170	16,6	170	0	170	0	170	11,6	170	0
180	27,5	180	25,7	180	0	180	14,5	180	15,5
190	28	190	10,5	190	0	190	21,3	190	23,9
200	30,5	200	27,1	200	2	200	21,3	200	17,5
210	31,7	210	31	210	0	210	33,5	210	28,1
220	31,3	220	35	220	24	220	31,6	220	30,2
230	34,8	230	34,3	230	32,6	230	34,8	230	33,3
240	35,1	240	33,5	240	24,3	240	35,2	240	36,7
250	36,8	250	38,2	250	23,7	250	36,5	250	32,4
260	38,4	260	35,4	260	24,2	260	36,5	260	31,4
270	35,9	270	37,1	270	33,9	270	37,8	270	37,2
280	36,8	280	39,8	280	36,7	280	38,7	280	38,9
290	35,8	290	39,9	290	35,2	290	39,5	290	39,5
300	35,9	300	37,1	300	34,6	300	37,6	300	40,2
310	36,9	310	39,3	310	35,6	310	40,3	310	41,3
320	37,9	320	40,2	320	36,4	320	40,4	320	41,4
330	38,3	330	39,5	330	35,6	330	38,2	330	41,8
340	38,3	340	38,2	340	38,4	340	38,8	340	40,9
350	38,1	350	39,7	350	42,7	350	37,6	350	40,8
360	38,3	360	39,7	360	40,1	360	39,1	360	38,6
370	38,4	370	39,6	370	39,4	370	39,1	370	39,6
380	39,5	380	40,6	380	39,6	380	40,9	380	38,9
390	39,6	390	40,7	390	39,6	390	42,4	390	39,8

E.1 Data for afbindingstid

400	38	400	41,8	400	39	400	39,1	400	40,1
410	37,6	410	40,9	410	38,9	410	40,6	410	40,5
420	37,4	420	39,3	420	37,6	420	40,3	420	41,6
430	38,1	430	40,7	430	38,5	430	40,8	430	41,5
440	38,6	440	40	440	36,6	440	41,5	440	41
450	38,2	450	39,9	450	38,5	450	40,9	450	40,8
460	38,4	460	40,2	460	42	460	39,1	460	41,8
470	38,7	470	39,6	470	43,6	470	40	470	40,8
480	38,6	480	39,6	480	41	480	39,3	480	40,8
490	39,5	490	39,9	490	40,2	490	39,9	490	40,3
500	40,2	500	41,1	500	40,2	500	39,9	500	40,1
510	39,8	510	41,3	510	40,2	510	41,4	510	41,8
520	37,9	520	40,8	520	39,2	520	40,4	520	42,6
530	37,2	530	40,2	530	38	530	40,9	530	42,2
540	38,3	540	39,4	540	37,1	540	40,4	540	41,3
550	39,1	550	39,6	550	37,4	550	40,4	550	41,4
560	39,2	560	39,2	560	36,8	560	38,8	560	41,8
570	38,8	570	40,5	570	41,4	570	39,7	570	40,9
580	39,1	580	40,1	580	42,7	580	39,6	580	41,1
590	39,3	590	40,2	590	39,6	590	39,9	590	41,2
600	40,1	600	39,6	600	40	600	40,4	600	40,9
610	38,9	610	40,3	610	39,7	610	40,4	610	42,2
620	39,3	620	39	620	38,7	620	40,6	620	40,3
630	38,6	630	40,6	630	37,6	630	40,6	630	41,5
640	39,7	640	39,1	640	36,5	640	40,2	640	41,4
650	39	650	40,8	650	38,9	650	39,2	650	41,4
660	39,1	660	40,4	660	43,8	660	39,7	660	41,6
670	39,3	670	40	670	39,8	670	39,4	670	40,9
680	39,9	680	40,4	680	40	680	40,1	680	40,9
690	39,3	690	40,6	690	40,6	690	40,4	690	40,1
700	38,3	700	39,6	700	39,2	700	40,6	700	43,2
710	38,8	710	38,8	710	37,8	710	40,4	710	40,7
720	38,6	720	38,5	720	38,3	720	40,4	720	40,8
730	39	730	38,8	730	36,6	730	40,2	730	43,1
740	39,1	740	41,4	740	41,3	740	39,6	740	42,2
750	39,7	750	40,4	750	39,3	750	39,9	750	41,6
760	38,6	760	39	760	39,7	760	39,9	760	40,7
770	38	770	38,6	770	38,8	770	40,4	770	42,4
780	39	780	38,3	780	37,3	780	40,5	780	40,7
790	39,5	790	40,9	790	38,7	790	41,3	790	42,7
800	39,2	800	41,3	800	40,9	800	39,7	800	41,4
810	38,7	810	39,6	810	39,8	810	40,2	810	41,1
820	39,1	820	38,9	820	39,8	820	40,4	820	41,6
830	37,8	830	38,2	830	37,8	830	40,3	830	41,9
840	38,6	840	38,1	840	37,4	840	40,1	840	42,5
850	38,4	850	39,5	850	39,2	850	40,8	850	41,3

F | Poster fra midtvejspræsentation

F.1 Poster fra midtvejspræsentation

F.1 Poster fra midtvejspræsentation

DTU Byg
Institut for Byggeri og Anlæg



Anvendelse af Mineaffald i Beton - Sammenligning af to slags

Aktuelle planche er udarbejdet i forbindelse med diplom Byg af gangprojekt. Projektet har til formål at sammenligne to forskellige typer mineaffald og deres indflydelse på betonens egenskaber.

Fordele ved at anvende mineaffald i beton

Mineaffald i beton kan gøre betonfremstilling billigere og mere miljøvenlig. Dette skyldes at mineaffald, som er problematisk for mineindustrien, kan anskaffes billigt og måske endda gratis. Oplagring af mineaffald har ofte miljømæssige konsekvenser, som for eksempel forurening af drikkevand og oversvømmelser. Som ementerstatning vil mineaffald reduceres disse, nedbringe CO₂ udslippet, og måske også forbedre betonens egenskaber.

Blandeforhold

Forsøgene er udført for fire forskellige mørteltyper hvor en procentdel af cementen er erstattet med mineaffald fra de forskellige miner Zinkgruvan, Sydsverige og Nalunaq, Sydgrønland. Blandingen af mørtlen er udført i henhold til¹.

1. Zinkgruvan 5 % mineaffald benævnt Z 5
2. Zinkgruvan 10% mineaffald benævnt Z 10
3. Nalunaq 5% mineaffald benævnt N 5
4. Nalunaq 10% mineaffald benævnt N 10

Karakteristik af Minetailings

De målte værdier for minetailings karakteristikk er sammenlignet med værdier for godkendt kulflyveaske jf.².

Forsøg	Enhed	Nalunaq	Zinkgruvan	Kulflyveaske ^a
Vandopløselighed	%	0.81	0.88	1.19
Glødetab	%	0.19	0.29	2.26
ph		8.24	7.7	12.0
Ledningsevne	mS/cm	0.56	1.17	2.53

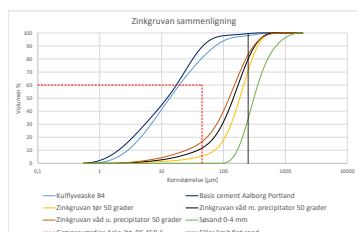
^aværdier jf. Sigvardsen 2016

Som forventet er vandopløseligheden og glødetabet lavt. En lav ledningsevne betyder mindre sandsynlighed for uønskede reaktioner ved opblanding i mørtel. Kulflyveasken indeholder reaktiv silicium hvilket kan forklare den højere ledningsevne.

Kornstørrelsesfordelinger

Kornstørrelsesfordelingerne sammenlignes med BASIS cement, søsand 0-4 mm samt godkendt kulflyveaske. Filler limit for flyveaske i henhold til³. Filler limit for tilslag⁴.

Det ses nedenfor, at Zinkgruvan ikke overholder filler limit, kornstørrelsesfordelingen ligger tæt opad søsand 0-4 mm.



Det ses nedenfor at Nalunaq overholder filler limit for fint tilslag.

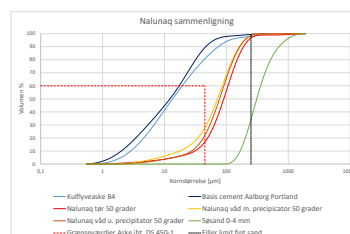
¹DS / EN 196-1

²Sigvardsen, N. (2016) Properties of Concrete with Co-Combustion Ash from Coal and Wood

³DS/EN 450-1

⁴Hansen, K.K. (2012) Bygningsingeniørernes materialer

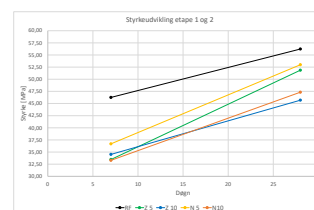
⁵DS/EN 196-1



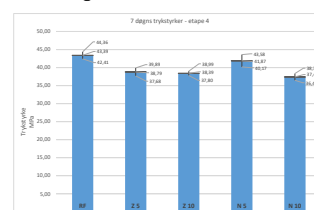
Trykstyrker

Trykprøvninger er udført i henhold til⁵ For Etape 1 og 2 er anvendt vådt sand og minetailings. For Etape 3 og 4 er anvendt tørt sand og minetailings.

Der var størst spredninger i resultaterne for Etape 1 og 2. Styrkeudviklingen for etape 1 og 2 viser at styrken reduceres ved at erstatte cement med minetailings.



7 døgns trykprøvning for Etape 4 viser, at styrken falder mere ved tilsætning af Zinkgruvan minetailings end den gør ved tilsætning af Nalunaq minetailings.



Konklusion og videre arbejde

Kornstørrelsesfordelingerne viser at Nalunaq kan have potentiale som filler, og trykprøvningerne viser at mørtlens styrke kun reduceres lidt når der erstattes med 5 % af cementen. Der er derfor sandsynligvis en sammenhæng mellem kornstørrelse og styrken. Undersøgelser af sætmetallet kan vise om der også er en sammenhæng mellem kornstørrelse og bearbejdigheden. Videre er det planlagt at undersøge afbindingstiden med Vikat, og mineralogien med røgtendifraktometer.



Mona Randahl Nielsen
s124942@student.dtu.dk

DTU Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Technical University of Denmark

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

www.byg.dtu.dk