

Slamaskes anvendelighed i beton

Anvendelse af slamaske i beton efter fosfor indvinding



Liv Rosenmai s083090
Sabine Svendsen s083045

BEng

Department of Civil Engineering
2012

DTU Civil Engineering
Juni 2012

Forord

Denne rapport er resultatet af et bachelorprojektet udført i perioden 1. februar 2012 til 1. juni 2012 ved instituttet BYG DTU, Danmarks Tekniske Universitet, under vejledning af Lisbeth M. Ottosen og Mette Rica Geiker. Projektet er på 20 ECTS.

Rapporten er udført, for at belyse mulighederne vedrørende anvendelse af slammaske af beton. Målgruppen er andre studerende og undervisere på DTU.

I forbindelse med udarbejdelsen af projektet skal der rettes en stor tak til Lisbeth M. Ottosen for korrekturlæsning og intellektuel sparring undervejs i forløbet. Ydermere rettes en stor tak til teknologichef, Ib Jensen, fra Unicon for at have indvilliget i faglig sparring omkring bioaske i beton. Herudover rettes en særlig tak til Ebba Cederberg Schnell, Christina Maria Winther Dufke, Sabrina Madsen og Rolf Henriksen for hjælp og support ved forsøgene. Afslutningsvist skal der rettes tak til Hans Petersen fra Lundtofteværket.

Rapporten er udført i et samarbejde af Liv Rosenmai og Sabine Svendsen.

Som en ekstra vejledning til læseren oplyses det, at henvisninger er i Harvard format (Forfatter udgivelsesår: sidetal), mens de fulde referencer er at finde i litteraturlisten.

Kongens Lyngby, d. 1. juni 2012

Liv Rosenmai

Sabine Svendsen

Abstract

Phosphorous is a vital element for human beings as well as for animals. The mines from which phosphorous is extracted are almost emptied. Scientists estimate that there will be a grave shortage of phosphorous within the next 40-100 years. It is therefore important to find alternative sources from which phosphorous can be extracted. A secondary source might well be sewage sludge ash, as it contains about 10 % phosphorous.

Sewage sludge ash is transported to Norway for deposition. This is a waste of a phosphorous source and an expensive and bad environmental solution. It is a far better thing to extract phosphorous from the sewage sludge ash and use the residue in the concrete. Furthermore - *not* taking ash to Norway means less CO₂ emission because of shorter transport.

Scientific research shows that sewage sludge ash can be used in concrete. By acid washing the sewage sludge ash most of the phosphorous can be recycled.

This project will examine whether it is possible that ash washed in acid can be used as replacement for cement in concrete. It is a fact that 20 % of the cement can be replaced by ash washed in acid. All in all an up to now unused secondary source of phosphorous and the mineral residue will be used in concrete.

When waste water is cleaned, filtered and burnt by high temperature we have a product called sewage sludge ash.

When iron is used the ash gets a reddish colour, aluminum a neutral color. This project uses iron based ash, "Avedøreaske" and aluminum based ash, "Lundtofteaske".

Sewage sludge ashes are washed with 2 types of acid: H₂SO₄ and HNO₃

"Avedøreaske" and "Lundtofteaske" are both tested for pressure. A mould made of mortar is made *with* and without crushed ashes, and with different amounts of ash according to the cement they replace. These moulds are tested for strength and compared with each other and with references.

Tests are made in order to show the amount of elements in the ashes. By examining the ash before and after the acid wash it is possible to establish what has happened to the ash, for example how much phosphorous has been removed.

Provisional conclusion: Ash washed in acid can be used in concrete. This concrete, however, has diminished strength and must therefore only be used in cases where very strong concrete is *not* a necessity. The ash ought to be washed in acid so that the recovered phosphor in the ash can be recycled.

"Avedøreaske" might create a problem because it gives the concrete a reddish colour. "Lundtofteaske" with its neutral colour it is preferable. Also because:

No or little deposition is needed, Recycling of phosphorous and CO₂ reduction because of shorter transport of the ash.

Indholdsfortegnelse

Forord	2
Abstract	3
1. Indledning	7
2. Teori.....	8
2.1 Beton	8
2.2 Slammaske.....	13
2.3 Miljø.....	17
2.4 Tidligere forskning.....	19
3. Materialer og metoder	24
3.1 Anvendte asker.....	24
3.2 Metoder til karakteristik af asker	25
3.3 Ekstraktion af metaller, tungmetaller og fosfor i syre.....	25
3.4 Mørtelstøbning og prøvning.....	26
4. Resultater og diskussion	27
4.1 Karakteristik af asker	27
4.2 Syrevask.....	32
4.3 Mørtelprøver	37
4.4 I praksis.....	49
5. Konklusion	53
6. Videre forskning	54
7. Litteraturliste	56

Bilagsoversigt

Bilag 3.1 Oplukning af jordprøve efter DS 259
Bilag 3.2 pH i 1 M KCl opslemning. Jord-væske forhold 1:2,5
Bilag 3.3 Måling af ledningsevne i jord
Bilag 3.4 Glødetab i jord
Bilag 3.5 Syrevask, fjernelse af fosfor samt tungmetaller i slammaske
Bilag 3.6 Leaching af tungmetaller fra aske
Bilag 3.7 Vicat
Bilag 4.1.1 Rådata fra pH og ledningsevneforsøg
Bilag 4.1.2 Rådata fra glødetabforsøg
Bilag 4.1.3 Rådata fra ICP-måling efter oplukning
Bilag 4.3.1 Rådata fra blandingsforholdet af screeningsprøverne
Bilag 4.3.2 Rådata fra trykprøvning af screeningsprøverne
Bilag 4.3.3 Rådata fra blandingsforholdet af 42-døgns prøverne
Bilag 4.3.4 Rådata fra trykprøvning af 42-døgns prøverne
Bilag 4.3.5 Rådata fra hærdningsforsøg
Bilag 4.3.6 Rådata fra leaching pH-måling
Bilag 4.3.7 Rådata fra ICP-måling efter leaching af mørtelprøver
Bilag 4.4.1 Beregning af altan.

Figuroversigt

Figur 2.1-1: Tryk og træk (Geiker 2010 (A): slide 8).....	9
Figur 2.1-2: Betons sammensætning (Hansen 2008: s. 50).....	10
Figur 2.1-3: Betons hærdeforløb(Hansen 2010: slide 16).	11
Figur 2.2-1: På Billedet ses 3 betonprøver, en uden asketilsætning, en med et indhold af Al-baseret aske, og en indeholdende Fe-baseret aske. Farveforskellen ses, den Fe-baserede aske giver betonen en rødlig farve (Kjersgaard 2007: s. 8).	15
Figur 4.1-1: Koncentrationer af forskellige stoffer i askerne angivet i gram pr. kilo.....	28
Figur 4.1-2: SEM billede af LA 2009 ubehandlet. Asken på billedet th. er knust og forstørret dobbelt i forhold til tv.. Størrelsen fremgår af barren på billederne.	28
Figur 4.1-3: SEM billede af AA 2009 ubehandlet dog er th. knust og forstørret dobbelt i forhold til tv.. Størrelsen fremgår af barren på billederne.....	29
Figur 4.1-4: Elemental mapping af AA ubehandlet.	30
Figur 4.1-5: Elemental mapping af Lundtofte asken ubehandlet.....	31
Figur 4.2-1: SEM billeder af LA syrevasket. Tv. Ses asken syrevasket med H_2SO_4 og th. med HNO_3 . Størrelsen fremgår af barren på billedet.	33
Figur 4.2-2: Elemental mapping af LA syrevasket med H_2SO_4	34
Figur 4.2-3: SEM billeder af AA syrevasket med H_2SO_4 . Billedet th. er forstørret 5 gange så meget i forhold til tv.. Størrelsen fremgår af barren på billederne.....	35
Figur 4.2-4: SEM billeder af AA syrevasket med HNO_3 . Størrelsen fremgår af barren nede i venstre hjørne.	36
Figur 4.2-5: Elemental mapping af AA syrevasket med H_2SO_4	36
Figur 4.3-1: Trykstyrken for LA mørtelprøver i screnningsforsøg efter 7 døgn angivet i MPa. Resultaterne er afbildet op til middelværdien af de 3 prøveemner og med spredningen angivet.	38
Figur 4.3-2: Trykstyrken for AA mørtelprøver i screnningsforsøg efter 7 døgn angivet i MPa. Resultaterne er afbildet op til middelværdien af de 3 prøveemner og med spredningen angivet.	39
Figur 4.3-3: Trykstyrken i MPa for LU, LUK, AU, AUK, $AHNO_3$, $AHNO_3K$, AH_2SO_4 og AH_2SO_4K efter 7 døgn....	40
Figur 4.3-4: Hærningstiden for REF og $AHNO_3$	41
Figur 4.3-5: Trykstyrken for de 5 forskellige blandinger over 42 døgn. Resultaterne er afbildet op til middelværdien af de 3 prøveemner og med spredningen angivet.....	42
Figur 4.3-6: Trykstyrkeudviklingen for de 5 forskellige blandinger over 42 døgn angivet i MPa.	43
Figur 4.3-7: Trykstyrken efter 28 døgn angivet i MPa.	44
Figur 4.3-8: Sammenhæng mellem v/c og trykstyrken efter 7 døgn angivet i MPa.....	45
Figur 4.3-9: Sammenhæng mellem v/c og trykstyrken efter 14 døgn angivet i MPa.....	45
Figur 4.3-10: Sammenhæng mellem v/c og trykstyrken efter 28 døgn angivet i MPa.....	46
Figur 4.3-11: ICP-resultater efter leaching	47
Figur 4.4-1: Farveforskel på de forskellige mørtelprøver.....	51

Tabeloversigt

Tabel 2.1-1: Udvalgte egenskaber for beton (Geiker & Ottosen 2009: slide 5).....	8
Tabel 2.1-2: Miljøklasser.....	10
Tabel 2.1-3: Sætmål for beton (Geiker 2010 (B): slide 20).....	11
Tabel 2.2-1: Den kemiske sammensætning af Al-baseret og Fe-baseret aske (Kjersgaard 2007: s. 7).....	16
Tabel 2.4-1: Koncentrationer af udvalgte tungmetaller (Jensen mf. 2012: s. 87).....	21
Tabel 2.4-2: Koncentrationer af tungmetaller samt densiteten af askerne (Geiker mf. 2010: s. 4).	22
Tabel 2.4-3: Udsivnings koncentrationer (Geiker mf. 2010: s. 4).....	22
Tabel 2.4-4: Inddeling af restprodukter og jord i kategorier.....	22
Tabel 2.4-1: Oversigt af udførte forsøg.	24
Tabel 3.3-1: Oversigt af anvendte syrekoncentrationer.	25
Tabel 3.4-1: Oversigt af mørtelstøbninger samt metodevalg.	26
Tabel 4.1-1: Koncentrationerne af forskellige macroelementer og sporstoffer, pH, ledningsevne og glødetab for LA og AA ubehandlet.....	27
Tabel 4.2-1: Koncentrationerne af forskellige macroelementer og sporstoffer, pH, ledningsevne og glødetab for LA ubehandlet samt syrevasket med hhv. HNO ₃ og H ₂ SO ₄	32
Tabel 4.2-2: Det procentvise fald for de forskellige stoffer i LA.....	33
Tabel 4.2-3: Koncentrationerne af forskellige macroelementer og sporstoffer, pH, ledningsevne og glødetab for AA ubehandlet samt syrevasket med hhv. HNO ₃ og H ₂ SO ₄	34
Tabel 4.2-4: Det procentvise fald for de forskellige stoffer i AA.	35
Tabel 4.3-1: Procentvise afvigelse på trykstyrken efter 28 døgn i forhold til referencen.....	42
Tabel 4.3-2: Trykstyrke, densitet og v/c for de prøver der blev vurderet til at være ringere.....	46
Tabel 4.3-4: ICP-resultater for leachingprøve.	48
Tabel 4.3-5: Procentvise stigning i forhold til REF.....	48
Tabel 4.4-1: Trykstyrken for AUK, AH ₂ SO ₄ K og LH ₂ SO ₄ K efter 28 døgn, 35 døgn og 42 døgn.	50

1. Indledning

Denne rapport omhandler slamaskes anvendelighed i beton, med særligt henblik på askens indhold af fosfor.

Fosfor er et livsnødvendigt grundstof for både mennesker og dyr. Fosforminerne er ved at være udtømte, og forskerne anslår, at der vil komme en fosforkrise indenfor de næste 40-100 år (Jensen mf. 2012: s. 22). Derfor er det vigtigt at finde alternative fosforkilder. Denne sekundære fosforkilde kan være slamaske, da dette indeholder ca. 10 % fosfor.

I dag deponeres denne slamaske i Norge, hvilket er spild af en fosforressource, samt en dyr og uholdbar miljømæssig løsning. I stedet for at deponere dette grundstof, kan fosforen udvindes fra slamasken, og restproduktet kan anvendes som tilslag i betonen, således at CO₂-emissionerne reduceres ved produktionen.

Tidligere forskning viser, at slamaske kan anvendes i betonen (Biocrete 2007). Ved at syrevaske slamasken kan noget af fosforen genanvendes. I dette projekt er 20 % af cementen erstattet med ubehandlet eller syrevasket aske.

Ved at syrevaske asken muliggør det anvendelse af en hidtil uanvendt sekundær fosforkilde.

Slamaske er restproduktet fra rensning af spildevand. Spildevandet filtreres, og derefter brændes slammet ved høje temperaturer. For at fjerne fosforen fra spildevandet bruges et fældningsmiddel enten indeholdende aluminium (Al) eller jern (Fe). Ved brug af Fe til fældning vil asken få en rødlig farve (Kjersgaard 2007). I dette projekt undersøges en Fe-baseret aske, Avedøreasken (AA), og en Al-baseret aske, Lundtofteasken (LA).

Slamaskerne syrevaskes med 2 forskellige mineralske syrer svovlsyre (H₂SO₄) og salpetersyre (HNO₃).

Trykstyrken undersøges, ved mørtelstøbninger der trykprøves over 42 dage. Trykstyrken for mørtelprøverne indeholdende de to forskellige asker undersøges. Der laves mørtelstøbninger både med knuste og uknuste asker, med forskellige mængder aske i forhold til den cement der erstattes. Disse mørtelstøbninger styrkeprøves, og sammenlignes med hinanden og med referencer.

Der laves oplukningsforsøg, som viser hvilke stoffer, der er i asken. Ved at undersøge asken inden syrevask, og efter ses det af resultaterne, hvor meget fosfor der er blevet fjernet af syrevasken, og hvad der ellers er sket med asken.

Derudover undersøges udsivningen af de færdigstøbte mørtelprøver ved leachingforsøg, hvorefter en måling på ICP kunne foretages. Dette gøres for at undersøge, hvor meget der forurenes ved en knusning. Knusningen kan være den sidste del af en færdigstøbt betonkonstruktions cyklus.

2. Teori

2.1 Beton

I 1824 blev portlandcement opfundet, men allerede i år 120 e. Kr. havde romerne en avanceret betonteknologi, der gjorde, at de kunne bygge Pantheonkuppen, der stadig står den dag i dag. Betonen dengang bestod af brændt kalk blandet med vulkansk aske, vand og knuste teglsten. Det brændte kalk, og den vulkanske aske udgjorde det hydrauliske bindemiddel. Denne viden gik desværre tabt sammen med romernes herredømme i Europa (Herholt mf. 1985: s. 13).

Beton anvendes den dag i dag til rigtig mange ting, lige fra husbygning, dæmninger, broer, kunst og meget meget mere. Den kan bruges både med og uden armering. Armering er stålstænger der indstøbes eller indføres i beton for at øge styrken. Betonen kan enten stå med ubehandlet overflade eller fx med en glattet overflade, hvilket tit ses i parkeringskældre.

2.1.1 Betons egenskaber

Beton har gode byggetekniske egenskaber, idet det er et stærkt materiale som er let at håndtere. Beton kan anvendes til in-situ støbninger, som er beton støbt på stedet eller som præfabrikerede elementer, som produceres på en fabrik. Hvilken slags beton der vælges afhænger af behovene. Ønskes der fx en ekstremt stærk beton benyttes præ-fabrikerede elementer, med forspændt armering. Dette skaber tryk inde i betonen, og denne slags beton vil derfor have en meget større trækstyrke.

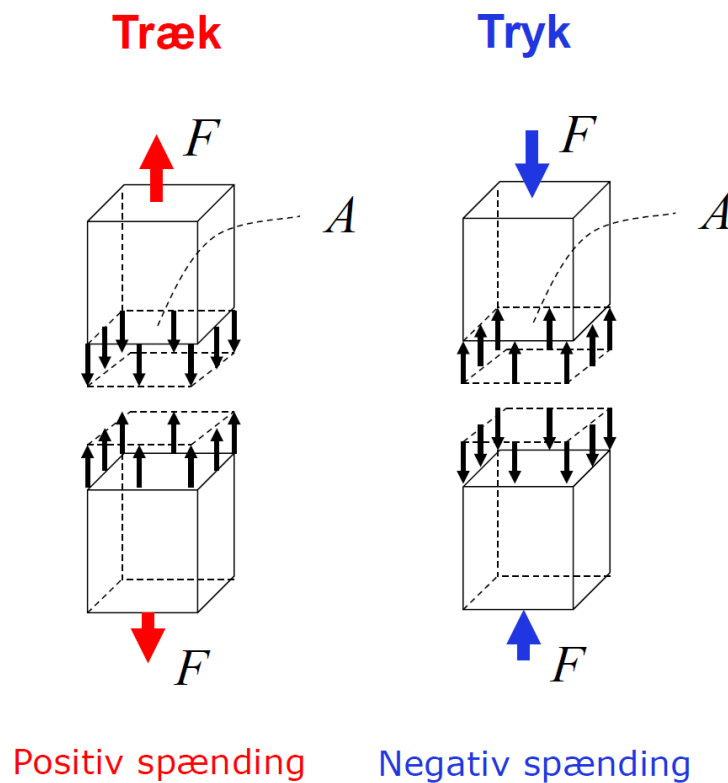
Udvalgte egenskaber for beton	
Egenskab	Typisk værdi
Trykstyrke ved 28 døgns (v/c = 0,4)	40-55 MPa
Trykstyrke ved 28 døgns (v/c = 0,8)	15-25 MPa
Trækstyrken	1/10 af trykstyrken
Densitet (v/c = 0,4)	2250 – 2400 kg/m ³
Densitet (v/c = 0,8)	2000 – 2250 kg/m ³

Tabel 2.1-1: Udvalgte egenskaber for beton (Geiker & Ottosen 2009: slide 5).

2.1.1.1 Styrke

Betons styrke findes ved dens brudstyrke, som er den belastning der netop giver brud ved tryk. Denne er primært bestemt af cementpastaens styrke, da dette som regel er det svageste i betonen. Beton har en høj trykstyrke, dog er trækstyrken meget lavere, ca. 1/10 af trykstyrken. Dette forbedres ved at anvende armering, de steder hvor der er træk i betonen. Ved et positivt moment vil der være tryk i oversiden og træk i undersiden, mens der ved et negativt moment vil være træk i oversiden og tryk i undersiden.

Betonens styrke kan under de rigtige forhold (laboratorieforhold) komme helt op på styrker omkring 400 megapascal (MPa) (Goltermann 2010: slide 12).



Figur 2.1-1: Tryk og træk (Geiker 2010 (A): slide 8).

Normalspændingen som normalt er angivet i MPa, findes ved brug af Formel 1. Hvor F er kraften i newton, og A er arealet i kvadratmillimeter. I Figur 2.1-1 ses forskellen på positiv og negativ spænding.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Formel 1: Normalspændingen.

2.1.1.2 Holdbarhed

Beton har generelt en utrolig lang levetid, og er meget vejrbestandigt. Dog er der nogle nedbrydningsmekanismer, som selv ikke betonen kan undgå. Disse kan være fysiske og kemiske, derudover kan der forekomme elektrokemiske nedbrydninger i armeringen. Frost-tø-nedbrydning er en fysisk nedbrydning, og ses ved frostspringninger i den hærdnede beton. Disse sprængninger skyldes, at der kan være frysbar vand i kapillarporerne, luftporerne, revnerne eller i eventuelt porøst tilslag. Vand udvider sig ca. med 9 %, når det fryser (Geiker & Ottosen 2009: slide 40-69).

Armeringen i betonen udvider sig, når det korroderer. Dette skaber et stort tryk inde i betonen, som ødelægger den. Armeringen kan korrodere, hvis den kommer i forbindelse med vand, hvilket kan ske, hvis revnerne i betonen bliver for store. Der er opstillet krav til betonens revnevidde, og revneafstand. Revner i beton opstår, når betonen bliver udsat for belastning. Små revner i betonen gør, at armeringen bliver fuldt udnyttet. Så revner i betonen er tilladte, bare de overholder kravene for revnevidde og revneafstand.

2.1.2 Opbygning

Beton er opbygget af en blanding af sten og mørtel. Mørtlen består af sand, inert filler¹ og kitmasse. Kitmassen består af luft og cementpasta. Denne pasta indeholder cement og evt. flyveaske, mikrosilica og tilsætningsstoffer. Se Figur 2.1-2.

Beton							
Mørtel						Sten	
Kitmasse					Inert filler	Sand	
Luft	Cementpasta						
	Vand	Tilsætningsstoffer	Mikrosilica	Flyveaske	Cement		
	Væsker		Bindemidler		Tilslag		
	Finstoffer						

Figur 2.1-2: Betons sammensætning (Hansen 2008: s. 50).

Miljøet betonkonstruktionen skal befinde sig i, har en stor betydning for valget af sammensætningen af betonblandingen. I Tabel 2.1-2 ses en oversigt over de forskellige miljøklasser.

Miljøklasser for beton		
Miljøklasse	Stentilslag	Konstruktionsbrug
Passiv	Bakkesten samt porøse sten såsom flint og kalk sten.	Tørt miljø dvs. indenfor, da dette ikke er egnet til frost pga. de porøse materialer suger vand til sig.
Moderat	Søsten og bakke samt en lille smule lettere sten.	Bruges til støbninger der kan blive udsat for frost
Aggressiv	Søsten uden former for kalk	Bruges til støbninger der udsættes for frost
Ekstra Aggressiv	Granit skærver	Broer mm.

Tabel 2.1-2: Miljøklasser.

Som tidligere nævnt er beton for det meste opbygget af sten og mørtel, dvs. betonens styrke afhænger af mørtlen og stenene. Da trykstyrken af stenene som regel er højere end trykstyrken af mørtlen, er det mørtlen, der er den styrkegivende faktor i betonen, idet denne vil bryde/give brud først.

Cement er et uorganisk bindemiddel, der kitter tilslagsmaterialerne sammen ved blanding med vand. Cement fremstilles ud fra kalk, og ler der brændes til store kugler i store ovne ved temperaturer over 1500°C. Kuglerne pulveriseres derefter til korn af størrelsen 15 µm. Ved pulverisering opnås et meget stort overfladeareal, som giver cementen gode bindingsegenskaber.

Cement indeholder fire væsentlige delkomponenter også kaldet klinkemineraler. Disse er C_3SiO_2 , C_2SiO_2 , $C_3Al_2O_3$ og $C_4Al_2O_3Fe_2O_3$.

Tilslaget er det billigste af de faste komponenter i betonen, hvorfor der ønskes det højeste mulige indhold af tilslag, under hensyn til de øvrige krav til beton. Typisk udgør tilslaget ¾ af det samlede betonrumfang.

¹ Tilslagsmateriale, der ikke reagerer kemisk.

² Disse er benyttet grundet tidligere forskning med syrevaskning. HNO_3 (Jensen mf. 2012: s. 47). H_2SO_4 er valgt fordi

Tilslaget er også godt til at nedsætte betons svind, da tilslaget er mere volumenbestandigt end cementpastaen. Hovedparten af de tilslagsmaterialer der bruges i en betonblanding, udvindes af naturlige grusaflejringer.

En god huskeregel med vandet i betonen er at: Kan det drikkes, kan det komme i betonen. Dette skyldes at betonens alkali- og kloridindhold skal kendes (Aalborgportland 2010: s. 49).

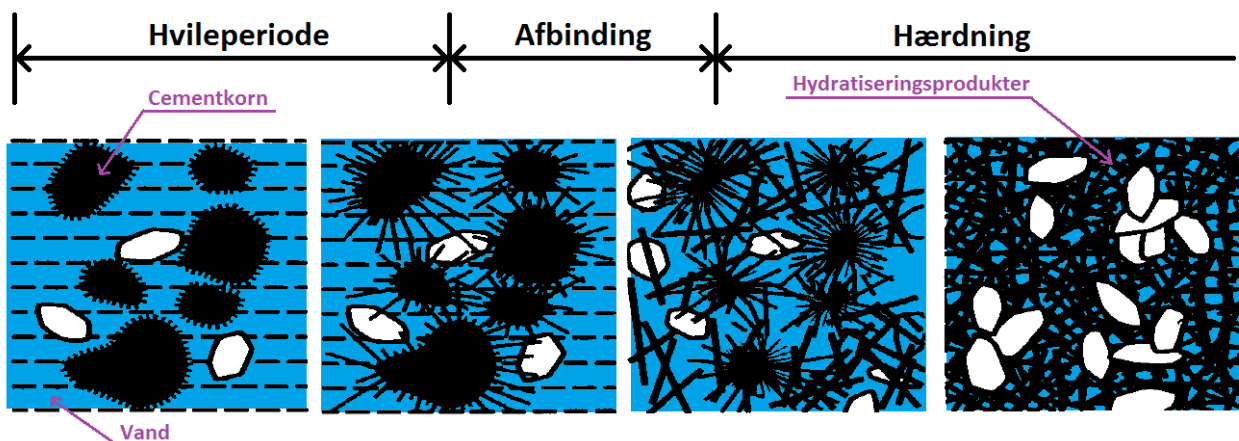
Vandindholdet har stor betydning for sætmålet. Sætmålet siger noget om betonens bearbejdelighed. Jo større sætmål desto mere flyder betonen ud. I Tabel 2.1-3 ses en oversigt mellem konsistens og sætmål.

Sætmål for beton	
Jordfugtig konsistens	0-30 mm sætmål
Stiv konsistens	30-60 mm sætmål
Plastisk konsistens	60-100mm sætmål
Tyktflydendekonsistens	100-150 mm sætmål
Flydendekonsistens	>150 mm sætmål

Tabel 2.1-3: Sætmål for beton (Geiker 2010 (B): slide 20).

2.1.3 Hærdning

Idet cement og vand blandes, vil det begynde at reagere med hinanden. En kemisk forbindelse imellem disse vil få hærdningsprocessen af betonen til at gå i gang.



Figur 2.1-3: Betons hærdforløb (Hansen 2010: slide 16).

I Figur 2.1-3 ses betonens hærdforløb. Den første time kaldes hvileperioden. Herefter afbinder betonen til mellem 6 og 24 timer efter støbning. Herefter og til det 90. døgn vil betonen hærde, det er under hærdningen, at betonen tiltager i styrke, dog er der næsten ingen ændring i styrkeudviklingen efter 28 døgn.

Hærdeprocessen kan enten accelereres eller sænkes. Dette gøres ved at tilsætte enten accelerators eller retardere. I nogle tilfælde er det nødvendigt med en ekstra kort, eller lang hærdetid.

Ved hærdningen må betonens temperatur ikke overstige 70°C. Forskellen på temperaturen i ydersiden af betonen og i midten af betonen må ikke overstige 15°C. Dette er en håndregel for at undgå revnedannelse.

2.1.4 Betonproportionering

Beton proportioneres for at størrelsen af blandesatsen af cement, vand, sand, sten og andre tilsætningsstoffer kan bestemmes, sådan at betonen har en god bearbejdelighed, og at den ønskede styrke og holdbarhed opnås. Til proportionering bruges tabeller og formler til at beregne denne mængde, og derefter laves en prøveblanding for at eftertjekke tallene.

Betons sammensætning bestemmes ud fra en visuel bedømmelse, hvor betonens bearbejdelighed findes ud fra et ønske om et bestemt sætmål og luftindhold. Hvis de ønskede egenskaber ikke opnås, korrigeres indholdet af sand, vand og cement, og der foretages en ny proportionering og prøveblanding. Når de ønskede egenskaber opnås, støbes prøvecylindre, hvis styrke prøves efter en normeret tid på normalt 28 døgn.

2.1.5 Flyveaske

Flyveaske er et restprodukt fra fyring på kraftværker. Der er i betonbranchen fundet anvendelsesmuligheder af dette grundet flyveaskens puzzolanegenskaber. Dette er både godt for miljøet og ikke mindst økonomien. Flyveaske indeholder tungmetaller, og dette kan ved deponering nedrive til grundvandet. Derudover er flyveaske billigere end cement (Dam-Johansen mf. 2005: s. 1).

Betonproducenten Unicon laver bla. Beton med flyveaske. I denne beton erstattes ca. 20 % af cementen med flyveaske.

Flyveaskes bidrag til styrken regnes med, ved hjælp af en aktivitetsfaktor k. Denne k faktor er forholdet imellem, cementen der erstattes, og asken den erstattes med. For flyveaske ligger denne faktor efter 28 døgn mellem 0,3-0,5 (Herholt mf. 1985: s. 143).

Grundet denne faktor k kan der vha. Bolomeys formel beregne trykstyrken ved tilsættelse af flyveaske.

$$f_c = K * \left(\frac{1}{V/(C + k * P)} - 0,5 \right)$$

Formel 2: Bolomeys formel med flyveaske.

I Formel 2 ses denne formel. Hvor K afhænger af cementtypen, og k vil for flyveaske være mellem 0,3 til 0,5, og P er mængden af iblandet flyveaske.

2.2 Slammaske

Slam er restproduktet fra rensning af spildevandet. Spildevandet renses, og det som bliver sorteret fra spildevandet, kaldes slam. Slammet kan brændes, sådan at der kommer slammaske. Denne slammaske deponeres i dag, da der ikke kan findes anvendelse for den.

Der forskes og undersøges i dag meget i, om denne aske kan benyttes i betonen, da det vil have stor positiv effekt på miljøet, og muligvis også økonomisk set, da der evt. ville kunne udskifte en del af cementen med slammaske, og som bekendt er cement dyrt.

I dag er slammasken endnu ikke omfattet af DS/EN-450, som kun omhandler aske fra kulfyrede værker. Asken kan således ikke umiddelbart benyttes i betonproduktion endnu, da det fordres at asken skal være omfattet af denne iht. DS 481 (Hasholdt & Mathiesen 2002: s. 4).

Slammasken indeholder en stor del fosfor, som der forudses en mangel på inden for de næste 100 år. Fosforen kan ved syrevask tages ud af asken, sådan at den kan genindvindes. (Se mere om dette i afsnit 2.3 Miljø.)

2.2.1 Fremstilling af slammaske

Slammasken fremstilles på rensningsanlæg, hvis formål er at rense spildevandet, sådan at det kan genindvindes. Slammasken er således et restprodukt fra rensningsprocessen. Alt efter hvilket rensningsanlæg der benyttes, vil sammensætningen af grundstofferne i askerne være forskelligt. Metoden der bruges til fældning af fosforen, hvor der enten bruges Fe eller Al, og beliggenheden af disse værker har en betydning for indholdet i askerne.

I denne opgave ses der på to forskellige asker, fra to forskellige værker.

Der ses på aske renses på Avedøreværket, som er et stort værk tæt på Hvidovre. Denne aske er Fe-baseret og rødlig, da den har et stort indhold af Fe-ioner.

Derudover ses der på aske fra Lundtofteværket, som er et noget mindre værk. Denne aske er Al-baseret, og har en lys brunlig farve. Denne aske, vil derfor ikke påvirke farven af betonen i et særligt stort omfang.

Da det er disse asker, der benyttes, vil der fokuseres på rensningsprocesserne på Lundtofteværket og Avedøreværket. I det følgende vil rensningsprocesserne, på de to forskellige værker, beskrives.

2.2.1.1 Lundtofte rensningsanlæg

På rensningsanlægget i Lundtofte er der nyligt foretaget en tilpasning af rensningsanlægget, og der er etableret et miljøvenligt og energieffektivt slambehandlingsanlæg. Anlægget renses årligt 8-12 mio. m³ spildevand, hvilket er svarende til ca. 115.000 personers forbrug.

Rensningen af spildevandet foregår på følgende vis:

Første trin i rensningsprocessen er en grovryst, som fjerner de grovere dele såsom papir, vatpinde osv. Dette transporteres til forbrændingsanlægget. Næste trin er sand- og fedtfang, hvor sand bundfældes, og fedt fraskilles. Sandet transporteres til forbrænding i slamforbrændingsanlæg, og det samme sker for fedtet. Derefter kommer finristen, hvor helt fint materiale frasorteres, og transporteres til forbrænding. Herefter bundfældes primær slam, hvorved en del organisk materiale fjernes. En del af fosforen i

spildevandet fjernes sammen med det bundfældede slam. Dette gøres ved brug af fældningsmiddel. Alt dette, som er sorteret fra og transporteret til forbrænding, er det, der senere bliver til slamaske.

De næste trin spildevandet skal igennem er luftningstanke, efterklaringstanke og rådnetanke.

Herefter sammenblandes sand, fedt, det fine materiale og slammet i en slamsilo, inden det føres ind i forbrændingsovnen. Slammet forlader forbrændingsovnen som en røggas, med en temperatur på 870 °C. Røggassen ledes videre til luftforvarmer, hvor den afkøles til 570 °C, og føres videre til kedlen. I kedlen nedkøles røggassen til 200 °C, og varmen fra kedlen genanvendes til andre funktioner på værket. I en multicyklon udskilles 85-90% af asken, som transporteres til en askecontainer (KM 2004).

2.2.1.2 Avedøre rensningsanlæg.

På Avedøre rensningsanlæg foregår rensningen af spildevandet lidt anderledes, men princippet med at filtrere vandet, således at affaldsstofferne sorteres fra, og brændes ved høj varme, og bliver til aske er det samme.

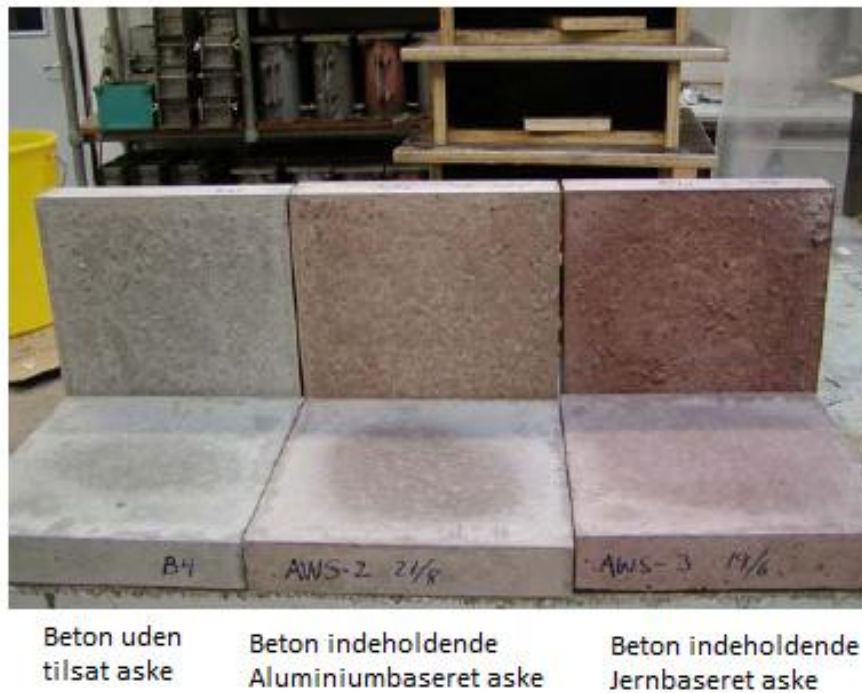
Slammet kommer i en centrifuge, hvor en del af vandet sorteres fra, inden slammet kommer til en slamsilo. Herefter transporteres asken videre til en slamtørrer, som tørrer slammet yderligere, inden det kommer i en tørslamsilo. Næste trin i processen er fluid-bed ovnen, hvor slammet brændes ved en høj temperatur. Hedtoliekedlen er næste trin, hvorefter røgen transporteres videre gennem rør, til et elektrofilter, som renses røggassen for tungmetaller. Derefter filtreres røggassen med et posefilter. Asken som blev sorteret fra i de to filtre, kommer i en flyveaskesilo, hvorfra noget genanvendes, og resten af det deponeres (Kjersgaard 2007: s. 5).

2.2.2 Forskel på Fe-baseret og Al-baseret aske

Under rensningsprocessen af vandet, vil der blive brugt fældningsmiddel til at fjerne fosforen. Det er her, der enten bruges Al eller Fe.

Den kemiske sammensætning af Fe-baseret og Al-baseret aske er forskellig. Derfor vil disse asker have forskellige virkninger på betonen ved tilsætning.

Den Al-baserede aske indeholder mere Al end den Fe-baserede aske. Den Fe-baserede aske indeholder mange Fe-ioner, som har den virkning at askens farve er stærkt rødlig. Dette kan give problemer i en betonproduktion, idet der ofte anvendes flere forskellige betoner til et byggeri, og farveforskellen på beton med Fe-baseret aske, og beton uden aske vil være stor.



Figur 2.2-1: På Billedet ses 3 betonprøver, en uden asketilsætning, en med et indhold af Al-baseret aske, og en indeholdende Fe-baseret aske. Farveforskellen ses, den Fe-baserede aske giver betonen en rødlig farve (Kjersgaard 2007: s. 8).

Problemet med Al-baseret aske i forhold til Fe-baseret aske, vil være at fosforen og tungmetaller vil være sværere at vaske ud. Der skal bruges en større koncentration af syre til syrevaskningen (Jensen mf. 2012: s. 9). Dette kan være et økonomisk aspekt, da syre er dyrt og der skal bruges store mængder til vaskningen af asken.

2.2.3 Kemisk sammensætning af askerne

Der er forskel på den kemiske sammensætning af askerne, alt efter hvilket rensningsanlæg asken kommer fra, og hvilken metode der er anvendt til rensningen.

Al-baserede og Fe-baserede asker er kemisk forskellige. Da der i projektet vil ses på Avedøreværkets Fe-baserede aske og Lundtofteværkets Al-baserede aske, vil disse beskrives i det følgende.

Analytical parameter			Bio ash	
Name	Unit	Method	Iron (Fe)	Aluminium (Al)
Colour			Reddish	Light brownish
Soluble phoshate	Mg/kg	Annex C	75	30
Silicon dioxide (SiO ²)	%	EN 196-2	23	35
	%	EN 197-1	12	15
Reactive silicon dioxide (SiO ₂)	%	EN 196-2	20	16
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	%	EN 196-2	15	6,5
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	%	EN 196-2	6,5	13
Sum of SiO ₂ , Al ₂ O ₃ & Fe ₂ O ₃	%	EN 196-2	45	54
Phosphorus as P ₂ O ₅	%	WDXRF	27	22
Calsium as CaO	%	WDXRF	21	16
Silicon as SiO ₂	%	WDXRF	21	29
Amorphous	%	QXRD	55	63
Calcium phosphate	%	QXRD	19	14
Quartz (crystalline SiO ₂)	%	QXRD	10	15
Haematite (crystalline Fe ₂ O ₃)	%	QXRD	6	<1
Particle density	Kg/m ³	EN 196-6	2820	2640

Tabel 2.2-1: Den kemiske sammensætning af Al-baseret og Fe-baseret aske (Kjersgaard 2007: s. 7).

2.2.3.1 Fe-baseret aske

Af Tabel 2.2-1 ses det, at den Fe-baserede aske har et stort indhold af Feoxid (15%) som gør asken rød. Det store indhold af fosforoxid på 27% ses også af tabellen.

2.2.3.2 Al-baseret aske

Den Al-baserede aske har et højt indhold af aluminiumoxid (13%) og et noget mindre jernoxidindhold (6,5%) end den Fe-baserede aske. Denne aske har også et stort indhold af fosforoxid (22%).

Begge asker har et højt indhold af fosfor, som vil kunne genindvindes, ved syrevaskning af asken.

2.2.4 Densitet og vandbehov

Densiteten af aske er mindre end af cement, hvilket betyder, at aske pr. rumenhed, vejer mindre end cement pr. rumenhed.

Aske har en større porøsitet end cement, hvilket betyder at der er et større volumen af lufthuller i asken. Grundet dette antages det, at askerne må have et større vandbehov end cement, da de pga. porøsiteten kan indeholde mere vand.

Da slamaske ikke er et benyttet materiale i betonblandinger, og ikke er omfattet af DS/EN 450, findes der ingen tabeller, eller normer, for hvor meget vand der skal iblandes mørtelprøver indeholdende de forskellige asker.

Densiteter af forskellige asker kan findes ved at afmåle en bestemt mængde aske, som afvejes. Ud fra vægt og massefylde kan densiteten af askerne udregnes ved brug af Formel 3.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Formel 3: Densitetsbestemmelse.

2.2.5 Syrevask af aske

Syrevaskning af aske foretages for at rense fosfor og tungmetaller ud af asken.

Når der tilsættes syre til aske, vil de fosforholdige askepartikler opløses (Jensen mf. 2012: s. 24). Herved kan asken filtreres, således at fosfor og tungmetaller bliver sorteret fra sammen med syren, som flydende stof.

2.3 Miljø

Miljø er de ydre forhold der påvirker mennesker og andre organismer og omvendt. Miljø er naturen.

Anvendelse af slamaske i beton vil have en stor positiv betydning for miljøet på verdensplan.

Slamaske er et restprodukt fra rensning af spildevandet, som der ikke kan finde anvendelse for, derfor deponeres store dele af den i dag. Produktionen for spildevand har de senere år haft en tendens til at være merkant stigende. I Holland var denne stigning på 10 år mere end 10-doblet (Biocrete 2007: s. 2). Det er derfor vigtigt at finde anvendelsesmuligheder for det, sådan at deponerne ikke bliver fyldt op.

I dag ses der på, om dette affald kan benyttes i betonen, i stedet for en del af cementen. Det cement der således bliver sparet væk, skal derfor ikke fremstilles, og den aske der bruges i stedet, skal ikke deponeres.

Slamaske har et stort indhold af fosfor og tungmetaller. Der forudses en katastrofal fosfor mangel (Nyvold 2008), og derfor er det meget vigtigt at genbruge alt det fosfor der kan. Ved syrevaskning af asken inden den benyttes i betonen, kan fosforen tages ud af asken, og kan derved genindvindes. Udover det kan tungmetallerne også vaskes ud af asken ved samme proces. Dette er en god ting, da tungmetallerne kan forårsage forurening af jord og grundvand.

2.3.1 Miljømæssige årsager til benyttelse af slamaske i beton

Af miljømæssige årsager, ville benyttelse af slamaske i beton være godt af to grunde. For det første ville det være godt at anvende slamasken i stedet for at deponere den, og for det andet kan fosforen udvaskes af asken ved syrevask, således at det kan genbruges.

I dag deponeres slamaske i store mængder, da der ikke kan finde anvendelse for den. På landsbasis i år 2002 blev der deponeret mellem 10-15.000 ton aske. I Danmark (Hasholdt & Mathiesen 2002: s. 4). Mængden af slamaske i verden vokser, og på et tidspunkt vil deponerne være fyldt op. Desuden er det en dyr løsning for rensningsanlæggene, som ville kunne spare penge, på at asken blev benyttet af betonfirmaer, i stedet for at deponere den med deponeringsafgift.

Forskere forudser, at fosforressourcerne er ved at slippe op. Minerne er ved at være udtømte, og det er derfor vigtigt, at finde andre metoder til udvinding af fosfor. Her kunne slamasken være en anden ressource til dette formål, da slamasken har et stort indhold af fosfor. Fosforen kan tages ud af asken, fx ved syrevask, hvilket også ville gøre selve asken mere brugbar til betonproduktion, da fosfor har en retarderende virkning på cementens hydratisering (Jensen mf. 2012: s. 84).

2.3.2 Fosfor

Fosfor er et grundstof, og har nummer 15, dets atomtegn er P. Stoffet indgår i alle levende celler, og er en forudsætning for alt liv på jorden.

Fosfor anvendes som fosforgødning, og er en vigtig brik i landbruget. Uden fosfor i gødningsjorden ville ingenting kunne gro (Kristensen 2012). Fosfor indgår i enhver DNA streng, og for hver eneste celledeling er fosfor en forudsætning.

Fosfor er også en vigtig del af menneskers knogler, da fosfor sammen med calcium bruges til at opbygge knoglemasse. En menneskekrop indeholder 800-1200 g. fosfor, hvoraf 80-85 % befinder sig i skelettet (Kreutzen 2009). Yderligere er musklerne også rige på fosfor.

2.3.2.1 Fosfor-mangel og fosfor i slam

Forskere forudser en kommende fosfor mangel. I dag udvindes fosfor fra fosforminer, men forskere mener, at disse reserver udtømmes indenfor 40-100 år (Jensen mf. 2012: s. 22). Fosfor er et essentielt stof for alt liv, og kan ikke erstattes i fødevareproduktionen.

I landbruget benyttes fosfor i form af fosfor gødning, hvilket er fosfors hovedfunktion (Nyvold, M. 2008).

Hvis minedriften ikke reduceres, vil der opstå en fosfor-krise, som vil være en kæmpe katastrofe for fødevareproduktionen på verdensplan (Nyvold 2008).

Kvaliteten af fosfor i minerne er allerede faldende og prisen på fosforgødning er steget (Nyvold, M. 2008).

Grundet denne kommende krise er det meget vigtigt at genbruge al den fosfor der kan fås adgang til. I dag deponeres asken ved at det smides ned i miner i Tyskland og Norge, fx saltminer, som ikke længere benyttes. At deponere asken på denne måde uden først at tage fosforen ud af den, er spild af en fosforressource.

Slamaske indeholder en stor del fosfor, 10 % af slamasken er fosfor, fosforen findes på mange forskellige former. En del af fosforen kan tages ud af asken ved en syrevaskning af denne, og derfor vil slamaske kunne bruges som fosfor ressource. Fosforen kan på den måde beholdes i det økologiske kredsløb, i stedet for at gå tabt, som den gør det i dag.

Fosforen i slamasken er bundet hårdt i og til slamaskepartiklerne, og kan ikke direkte bruges til plantegødning (Jensen mf. 2012: s. 7). Derfor skal fosfor og aske først, skilles fra hinanden, og det er vigtigt at finde metoder til dette.

I dag deponeres asken ved, at det smides ned i forskellige miner i Tyskland og Norge, fx saltminer, som ikke længere benyttes.

2.3.2.2 Fosfor og beton

Ved at syrevaske slammaske, kan en del af fosforen fjernes herfra.

Af tidligere forsøg ses det at beton indeholdende syrevasket aske, er stærkere end beton indeholdende ubehandlet aske.

At fjerne fosforen fra asken inden denne benyttes i betonen er godt for miljøet og betonen. Fosforen retarderer betonens styrke.

Fosforen, som er et vigtigt næringsstof for planter, kan finde anvendelse som gødning. Grundet den kommende fosfor mangel er det vigtigt at udvinde fosfor hvor det er muligt, og asken er et af de steder, det kan udvindes.

2.3.3 Tungmetaller

Tungmetaller er en betegnelse for det fleste metalliske grundstoffer, og det er et tungmetal, hvis densiteten er på over 5 g/cm³ (Gyldendal 2012). Nogle af de værste miljøgifte er cadmium (Cd), bly (Pb) og kviksølv (Hg).

Slamaske indeholder en del tungmetaller, som er giftige. Derfor er der interesse i at komme af med disse. Tungmetallerne bør derfor tages ud af asken, inden denne tilsættes til betonen, for at beskytte miljøet.

Ved at syrevaske asken inden anvendelse kan tungmetallerne tages ud, og skilles fra syre og øvrige stoffer, og herefter deponeres korrekt.

2.4 Tidligere forskning

Der er tidligere lavet en del forskning omkring slammaske samt anvendelsen af denne i beton. Det er også kommet mere frem, hvorledes fosfor kan udvaskes fra ex slammaske. Nedenfor gennemgås de vigtigste artikler og rapporter.

2.4.1 Chemical Shrinkage In Cement and Sludge ash systems

Denne artikel blev publiceret i år 2000, og er udarbejdet af V. W. Rohde og K. K. Hansen. Den omhandler det kemiske svind, der sker ved tilsætning af slammaske.

Resultatet var, at det kemiske svind for slamasken er større end det kemiske svind for cement. Derudover reagerer slamasken langsommere end andre puzzolaner. Overfladearealet for slamasken er 2-3 gange større end for flyveaske.

2.4.2 Grøn beton

Projektet Grøn beton foregik i 1998 til 2002, og det samlede budget var på 22,5 mio. kr.. I projektet var der en masse samarbejdspartnere. Disse var Aalborg Portland A/S, Unicon, COWI, MT Højgaard, AB Sydsten, Vejdirektoratet, Teknologisk institut, Byg-DTU og Institutet for byggeteknik (Aalborg universitet).

Formålet med projektet var, at give den danske cement- og betonindustri en international konkurrencefordel i forhold til miljørigtig betonproduktion og anvendelse heraf.

Det blev klargjort, at asken ikke kunne tages med i det ækvivalente v/c-forhold for betonen. Slamasken skal tilsættes i betonen som øvrige andre tilsætninger, og kan ikke erstatte flyveaske, pga. asken ikke er

omfattet af DS/EN 450. Den største fordel ved anvendelse af slamaske i betonen miljømæssigt er, at asken ellers skulle have været deponeret.

Beton med slamaske har en lavere styrkeudvikling, og kræver forholdsvist høje doseringer af plastificerende tilsætningsstoffer for at gøre betonen bearbejdelig. Udtørringsbeskyttelsesgraden er den samme som normal beton, da det plastiske svind er identisk.

2.4.3 Biocrete

I 2005 til 2007 foregik projektet Biocrete. Biocrete er et EU-life støttet projekt. De indblandede partere var Unicon, Spildevandscenter Avedøre og Lynettefællesskabet I/S. Derudover bistod Teknologisk institut som konsulent.

Formålet med projektet var at fjerne de tekniske hindringer for anvendelse af slamaske i betonen.

Forinden projektopstart var det påvist, at slamaske er anvendeligt i beton, men manglende dokumentation for slamaske gjorde anvendelsesgraden meget reduceret grundet de høje krav til betonen.

Konklusionerne i dette projekt var, at asken kan håndteres på både rensningsanlæg og på betonværftet som andre pulvermaterialer. Dog i lukkede systemer så der ikke er nogen arbejdsmiljømæssig risiko. Slammaske kan erstatte en del af flyveasken. De opnåede bedste resultater ved at udskiftet 50 % af flyveaskens vægt med slamakse. Derudover er risikoen for udvaskning af tungmetaller ikke større end ved en normal beton. Betonen får en svag rødlig farve ved anvendelse af slamaske, dog dæmpes denne med tiden.

2.4.4 Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash.

Denne artikel blev offentliggjort d. 19. september 2009. Den omhandler effekten på puzzolan-egenskaberne for slamaske og flyveaske ved knusning og syrevask af slamaske. Den er udarbejdet i London af S. Donatello, A. Freeman-Pask, M. Tyler samt C.R. Cheeseman.

Det blev klargjort at knusning af både flyveaske og slamaske forbedrede puzzolan-egenskaberne, dog så de også en "falsk" forbedring hos sand.

Syrevaskning af slamasken for genanvendelse af fosforen har en forringende effekt på puzzolan-egenskaberne, dog kan knusning få slamasken til at kunne erstatte noget af cementen.

Ved anvendelse af H_2SO_4 til syrevaskningen reduceres puzzolan-egenskaberne mærkbart.

Frattini-testen anses for at være en bedre egnet metode til vurdering af puzzolan-egenskaberne, da en række faktorer kan påvirke Styrkeudviklingstestens resultater.

2.4.5 Udvikling af ny teknik til fosfor-indvinding fra aske fra forbrænding af spildevandsslam

I perioden oktober 2010 til september 2011 blev der på DTU udført et projekt om udvinding af fosfor for Miljøstyrelsen. Rapporten blev udgivet i 2012, og er udarbejdet af L. M. Ottosen, P. E. Jensen og G. M. Kirkelund.

Formålet var at udvikle samt teste en ny teknik til urban mining af fosfor fra slamaske. Derudover skal tungmetallerne fældes, således at de kan deponeres. Restasken skal kunne anvendes i byggematerialeindustrien.

Det blev herved eftervist at en separation af fosfor og tungmetaller ved elektrodialytisk separation, er muligt for begge asker, dog nemmere ved AA.

Koncentrationer af udvalgte tungmetaller						
Aske	Cu [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Cd [mg/kg]
LA	540	43	29	1700	85	2,5
AA	690	79	72	2000	112	4,7
Kulaske	77	137	100	181	34	> 10

Tablet 2.4-1: Koncentrationer af udvalgte tungmetaller (Jensen mf. 2012: s. 87).

2.4.6 Andet relevant litteratur

Nedenstående litteratur har været anvendt i et vist omfang ved dette projekt. Dog er disse ikke direkte relateret til projektet, men fundet relevant.

2.4.6.1 Elektrokemisk fjernelse af Cd fra bioasker I pilotskala og vurdering af mulighederne for nyttiggørelse af behandlet aske I beton

Denne rapport blev offentliggjort i 2006, og er udarbejdet af BYG-DTU, Energi E2 A/S og MT Højgaard A/S. Den omhandler fjernelse af Cd fra bioasker, og hvorledes restproduktet kan nyttiggøres, herunder fx nyttiggørelse i beton.

En af konklusionerne var at bioaskerne renses og urenses, ikke havde den ønskede puzzolan-reaktivitet, dog foreslås det at den rensede aske kan anvendes som erstatning for fx sandfraktionerne i betonen.

2.4.6.2 Feasibility test of electrodiagnostically upgraded MSWI APC residue utilization in mortar

I maj 2010 blev denne artikel offentliggjort ved en konference i Beijing. Den omhandler elektrodialytisk fjernelse af tungmetaller og salte i aske fra affaldsforbrænding (MSWI).

Mørtelprøverne blev trykprøvet efter 7, 32 og 56 dage.

Konklusionen var at der er potentiale for anvendelse af elektrodialytisk opgraderet slamasken i Portland cement baserede materialer. Derudover kom de frem til at udvaskningen af tungmetallerne, blev signifikant reduceret ved den elektrodialytiske opgraderede slamaske. Afbindingstiden blev dog ved anvendelse af denne aske forsinket med 10 timer i forhold til referencemørtlen.

Koncentrationer af tungmetaller samt densiteten af askerne			
Parameter	Raw MSWI	Upgraded MSWI	Coal
As	127 mg/kg	192 mg/kg	24 mg/kg
Ba	370 mg/kg	448 mg/kg	1,1 mg/kg
Cd	170 mg/kg	245 mg/kg	1,5 mg/kg
Cr	93 mg/kg	150 mg/kg	46 mg/kg
Cu	575 mg/kg	806 mg/kg	32 mg/kg
Pb	2,220 mg/kg	2,150 mg/kg	19 mg/kg
Zn	14,640 mg/kg	21,600 mg/kg	88 mg/kg
Cl	16 %	0,5 %	0,02 %
Densitet	2860 kg/m ³	1910 kg/m ³	2160 kg/m ³

Tabel 2.4-2: Koncentrationer af tungmetaller samt densiteten af askerne (Geiker mf. 2010: s. 4).

Udsivnings koncentrationerne								
APC residue	pH	As [µm/l]	Ba [µm/l]	Cd [µm/l]	Cr [µm/l]	Cu [µm/l]	Pb [µm/l]	Zn [µm/l]
Raw MSWI	11,8	198	33,911	14	136	3291	484,450	60,459
Upgraded MSWI	12,3	<25	449	0,1	242	15	3,780	1,664
Coal	12,9	<25	669	79	1029	9	31	77

Tabel 2.4-3: Udsivnings koncentrationer (Geiker mf. 2010: s. 4).

2.4.6.3 BEK 1480 – Bekendtgørelse om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om genanvendelse af sorteret, uforurenede bygge- og anlægsaffald.

Denne bekendtgørelse er et udkast fra d. 08.11.2011 udgivet af miljøstyrelsen.

Inddeling i kategorier			
	Kategori 1	Kategori 2	Kategori 3
	Faststofindhold mg/kg TS		
Arsen	0 - 20	> 20	> 20
Bly	0 - 40	> 40	> 40
Cadmium	0 - 0,5	> 0,5	> 0,5
Chrom, total	0 – 500	> 500	> 500
Kobber	0 - 500	> 500	> 500
Kviksølv	0 - 1	> 1	> 1
Nikkel	0 - 30	> 30	> 30
Zink	0 - 500	> 500	> 500

Tabel 2.4-4: Inddeling af restprodukter og jord i kategorier.

2.4.7 Opsamling og ramme for projektet

Som det fremgår i teori afsnittet er slamaskens anvendelighed i betonen delvist blevet undersøgt, samt hvorledes fosfor kan fjernes fra slamasken. Dog har en sammenkobling af disse aldrig været undersøgt.

Puzzolan-egenskaberne for syrevasket slamaske er også blevet undersøgt.

I projektet Grøn beton blev der nævnt en vigtig ting, nemlig:

”Dog er det ikke undersøgt i nærværende projekt, om tungmetaller og andre stoffer i slamasken kan påvirke betonfabrikkernes spildevandskvalitet negativt (Hasholdt & Mathiesen 2002: s. 20).”

I dette projekt vil der kigges nærmere på anvendelse af syrevasket slamaske i betonen. Dette grunder ud i at tungmetaller og fosforen fjernes delvist fra asken inden brug, og herved nedsætter udsivningen. Derudover er der også interesse i at genindvinde fosforen, da dette er en knap ressource.

3. Materialer og metoder

Det følgende afsnit omhandler de udførte forsøg i forbindelse med projektet. Der er udarbejdet et skema, over forsøg og formålet med disse. Herefter oplyses de udførte forsøg, med et kort referat af øvelsesvejledningerne.

Formål med udførte forsøg		
Forsøg	Formål	Bilag nr.
Oplukning samt ICP-måling	Askernes koncentrationer af forskellige elementer blev fundet ved ICP-måling. For at denne måling skal kunne foretages, laves en oplukning først. Dette blev gjort før og efter syrevaskning.	Bilag 3.1
PH og ledningsevne	PH og ledningsevne blev undersøgt for at få en større kendskab til de kemiske egenskaber.	Bilag 3.2 og Bilag 3.3
Glødetab	Glødetabsforsøget foretages for at se hvor stor en del af organisk materiale, askerne indeholder.	Bilag 3.4
Scanning Elektron Microscopy (SEM)	Askens struktur blev observeret ved brug af et SEM.	
Mapping	Askens mineralogi blev analyseret ved brug af SEM-EDX.	
Syrevask	Syrevask af askerne udføres for at udtage en del fosfor og tungmetaller.	Bilag 3.5
Mørtelstøbning	Mørtelstøbningen bruges til at støbe mørtelprøver med forskellige indhold af aske, som undersøges. Der udføres mørtelprøver med LA og AA, vasket med de forskellige syrer.	DS/EN 196-1
Trykstyrke	Styrkeprøvningen udføres for at undersøge de forskellige mørtelstøbningers trykstyrke. Dette giver et billede af, hvordan askerne i betonen kan anvendes i praksis.	DS/EN 196-1
Hærforsøg (Vicat)	Dette gøres for at få en ide om asken har en retarderende effekt på mørtlen.	Bilag 3.7
Leaching	For at vurdere hvorvidt der udsiver tungmetaller fra den knuste beton, laves der en leaching test.	Bilag 3.6

Tabel 2.4-1: Oversigt af udførte forsøg.

3.1 Anvendte asker

Der blev ved dette projekt anvendt to forskellige slamasker fra hvert deres forbrændingsanlæg.

- Avedøreværket
- Lundtofteværket

Asken fra Avedøreværket blev udtaget i 2011, og på dette værk fældes fosforen med jernchloridsulfat. Asken fra Lundtofteværket er fra 2009 og 2012. Her fældes fosforen med Al. Da askerne fældes med forskellige metaller, gør det at sammensætningen ikke er identisk.

3.2 Metoder til karakteristik af asker

Dette afsnit omhandler de anvendte metoder til at karakterisere askernes fysiske og kemiske struktur.

3.2.1 Fysiske og kemiske analyser

For at få et bedre kendskab til askernes fysiske og kemiske egenskaber er nedenstående forsøg foretaget.

3.2.1.1 Oplukning samt ICP-måling

For at kunne foretage en ICP-måling, skal prøven først oplukkes. Dette gøres ved at tage 1,0 g aske, og tilsætter 20 ml 1:1 HNO₃. Dette stilles i en autoklave ved 120°C i 30 minutter. Herefter filtreres væsken og fortyndes med destilleret vand til 100 ml. Denne væske kan således analyseres ved ICP-måling.

3.2.1.2 pH og ledningsevne

En blanding af 10 g tør aske og 25 ml destilleret vand blev sat 1 time på rystebord, hvorefter pH og ledningsevnen kunne findes ved brug af en kombinationsselektrode i forbindelse med et pH-meter og en ledningsevнемåler.

3.2.1.3 Glødetab

Mængden af organisk stof i en prøve på 2,5 g blev fundet ved at sætte en digel med 2,5 g aske ind i en ovn på 550°C i en time, hvorefter prøven vejes igen.

3.2.2 Morfologi og askemineralogi

For at få et bedre kendskab til askernes struktur og kemiske sammensætning blev der foretaget en SEM analyse samt mapping.

3.2.2.1 SEM og mapping

Askens morfologi blev studeret ved brug af SEM-apparat. På et lille stykke karbontape blev der samlet lidt aske op. Dette blev sat ind i maskinen, hvorefter strukturen af asken kunne observeres. Ved mapping bliver der frigivet elektroner, der bliver opfanget af en detektor, som bliver til billeder.

3.3 Ekstraktion af metaller, tungmetaller og fosfor i syre

Asken som bruges til mørtelstøbninger blev først syrevasket.

Askerne afvejes i prøver på 150 g i 1 liters plasticflasker. Til denne tilføjes 750 ml syre enten H₂SO₄ eller HNO₃. Disse syrer blev valgt da de er mineralsyrer. H₂SO₄ er en billig syre, dog er problemet med denne gipsdannelsen.

Oversigt over syrekonzentrationer		
Aske	Svovlsyrekoncentration	Salpetersyrekoncentration
Avedøre	0,5 M H ₂ SO ₄	1,0 M HNO ₃
Lundtofte	0,75 M H ₂ SO ₄	1,5 M HNO ₃

Tabel 3.3-1: Oversigt af anvendte syrekonzentrationer.²

² Disse er benyttet grundet tidligere forskning med syrevaskning. HNO₃(Jensen mf. 2012: s. 47). H₂SO₄ er valgt fordi den er billigst.

Askerne stod i syre i 2 timer, hvorefter der blev vasket efter med destilleret vand 2 gange. Dette gøres ved at filtrere syren fra og tilsætte ca. 750 ml. destilleret vand, som igen filtreres fra når der er dannet bundfald. Afslutningsvist blev asken tørret i en ovn på 55°C.

3.4 Mørtelstøbning og prøvning

Mørtelstøbningen og styrkeprøvningen udføres for at undersøge styrken af de forskellige mørtelprøver.

Oversigt af mørtelstøbninger		
Mørtelstøbning	Metode 1	Metode 2
Screening	x	
42 døgns forsøg		x
Hærdeforsøg (Vicat)	x	

Tablet 3.4-1: Oversigt af mørtelstøbninger samt metodevalg.

I mørtelstøbningerne blev 20 vægt % af cementen erstattet med slammaske.

3.4.1 Mørtelstøbning

Blanding af mørtlen

Metode 1

Cement, vand, sand og aske afvejes. Cement og vand blandes sammen i en mixer. Herefter tilsættes asken, hvorefter der tilsættes sand. Afslutningsvist tilføjes der ekstra vand ved behov.

Metode 2

Cement, vand, sand og aske afvejes. Først blandes cement og asken sammen. Derefter blandes dette med vand i en mixer. Herefter tilsættes sand. Afslutningsvist tilføjes der ekstra vand efter behov.

Form, vibrering samt afforskalling

Mørtelblandingen fyldes i metalforme, som først fyldes halvt, hvorefter der vibreres på vibrationsbord. Efterfølgende fyldes formen helt op med mørtel, og der vibreres igen, mens overskydende mørtel fjernes. Prøven placeres under plastic i omkring 24 timer, hvor de afbinder, hvorefter der afforskalles, og mørtelprøverne opbevares i vandbassiner indtil trykprøvning. Mørtelprøverne trykprøves efter forholdsvis 7, 14, 28, 35 og 42 døgn.

3.4.2 Trykstyrke

Styrkeprøvningen foretages ved at trykprøve mørtelstøbningerne vha. Toni 3000. Mørtelstøbningerne placeres i tonien, og der trykkes indtil brud. Kraften, hvorved mørtelstøbningen bryder, aflæses og noteres. Denne omregnes så til en trykstyrke.

3.4.3 Hærdeforsøg (Vicat)

En portion mørtel blev blandet, som ved metode 1, hvorefter mørtlen kommer i en rund form. Denne stilles i vicatapparatet, som indstilles til at nedstikke med 10 minutters interval.

3.4.4 Leaching

40 g knust mørtelprøve afvejes og iblandes 80,00 ml ionbyttet vand. Dette placeres på et rystebord i 24 timer. Prøven sedimenteres i 15 minutter, hvorefter pH-værdien måles. Herefter filtreres prøven og væsken hældes i 2 prøvebeholdere. Herefter konserveres prøven, således at der kan laves målinger på en ICP.

4. Resultater og diskussion

I dette gennemgås opnåede resultater i forbindelse med forsøgene. Derudover vil relevante diskussioner af disse resultater og en perspektivering til anvendelse i praksis fremgå.

4.1 Karakteristik af asker

Askerne er blevet karakteriseret ved forskellige forsøg, og resultaterne fremgår af det følgende.

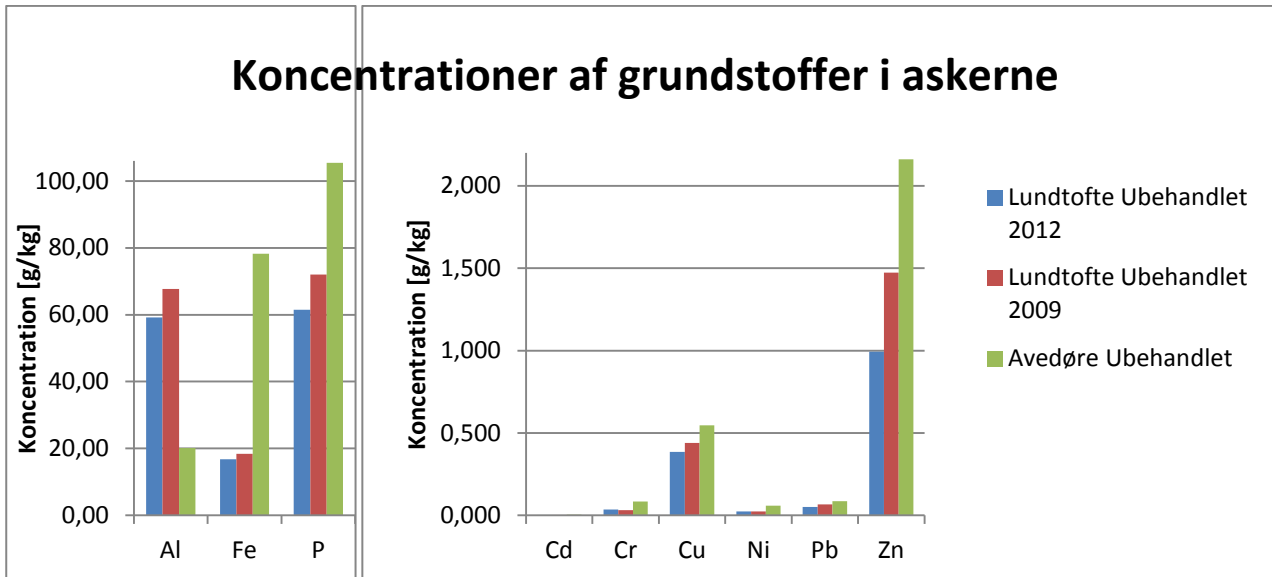
4.1.1 Kemisk sammensætning

I Tabel 4.1-1 fremgår de 2 ubehandlede askers koncentrationer af forskellige stoffer, pH, ledningsevne samt glødetabet. Det bemærkes at der er 2 asker fra Lundtofte, dog er de fra forskellige årstal. Dette skyldes at mængden af aske fra 2009, var ved at være opbrugt.

	Lundtofte Ubehandlet 2012	Lundtofte Ubehandlet 2009	Avedøre Ubehandlet
pH	10,03 ± 0,006	10,03 ± 0,04	10,37 ± 0,02
Ledningsevne [mS/cm]	26,2 ± 0,61	54,10 ± 0,46	2,12 ± 0,02
Glødetab (550°C) [%]	2 ± 0,001	3 ± 1	0,3 ± 0,1
Al [g/kg]	59,18 ± 8,14	67,72 ± 5,45	20,13 ± 0,54
Cd [g/kg]	0,0011 ± 0,0002	0,0014 ± 0,0001	0,0034 ± 0,0001
Cr [g/kg]	0,04 ± 0,004	0,03 ± 0,002	0,08 ± 0,002
Cu [g/kg]	0,39 ± 0,04	0,44 ± 0,03	0,55 ± 0,01
Fe [g/kg]	16,75 ± 2,64	18,44 ± 2,45	78,24 ± 2,93
Ni [g/kg]	0,02 ± 0,002	0,02 ± 0,001	0,06 ± 0,001
P [g/kg]	61,48 ± 8,70	71,99 ± 7,61	105,41 ± 3,77
Pb [g/kg]	0,05 ± 0,01	0,07 ± 0,004	0,09 ± 0,001
Zn [g/kg]	0,99 ± 0,11	1,47 ± 0,13	2,16 ± 0,06

Tabel 4.1-1: Koncentrationerne af forskellige macroelementer og sporstoffer, pH, ledningsevne og glødetab for LA og AA ubehandlet.

Askernes pH-værdi ligger på omkring 10, hvilket indikerer at de er basiske. Derudover er glødetabet for dem alle relativt lavt, hvilket viser en god forbrænding, idet glødetabet generelt er et udtryk for mængden af organisk stof. De ubehandlede asker lever op til kravet for glødetab ved anvendelse i beton, da dette skal være under 5 % (Aune 2006: s. 12). Dog er LAs glødetab 10 gange højere end AA, hvilket betyder at forbrændingen fra lundtofteværket er bedst. Ledningsevnen for de 2 asker lå på hhv. 54,10 mS/cm for LA 2009, 26,2 mS/cm for LA 2012 og 2,12 mS/cm for AA. Dette betyder at LA 2009 har et meget større indhold af letopløselige salte end AA og LA 2012.

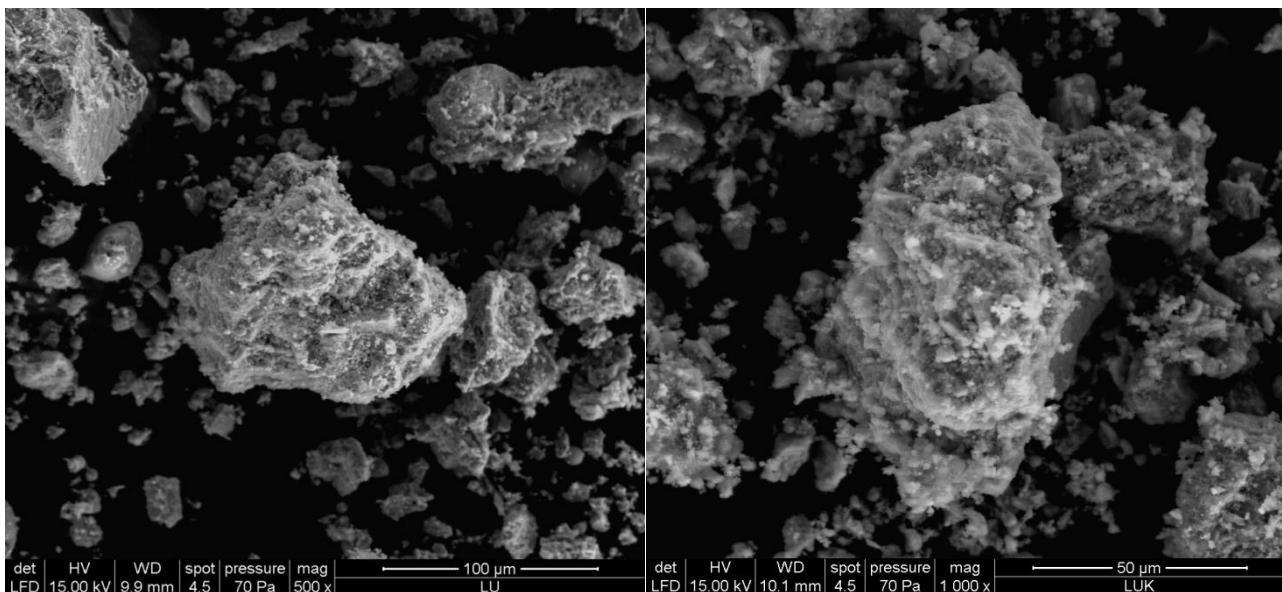


Figur 4.1-1: Koncentrationer af forskellige stoffer i askerne angivet i gram pr. kilo.

Som det fremgår af Figur 4.1-1, er der i alle askerne et stort indhold af fosfor, hhv. 10,5 % for AA og 6,1 % for LA 2012 og 7,2 % for LA 2009, hvilket gør, at askerne har potentiale for at være sekundære ressourcer for fosfor indvinding. Derudover fremgår det også af grafen, at LA indeholder meget mere Al end AA, og at AA indeholder mest Fe. Dette skyldes at fosforen i LA, er blevet fældet med Al, og fosforen i AA er blevet fældet med Fe. Derudover ses det, at koncentrationerne af andre tungmetaller er meget lave sammenlignet med koncentrationerne af fosfor, Fe og Al.

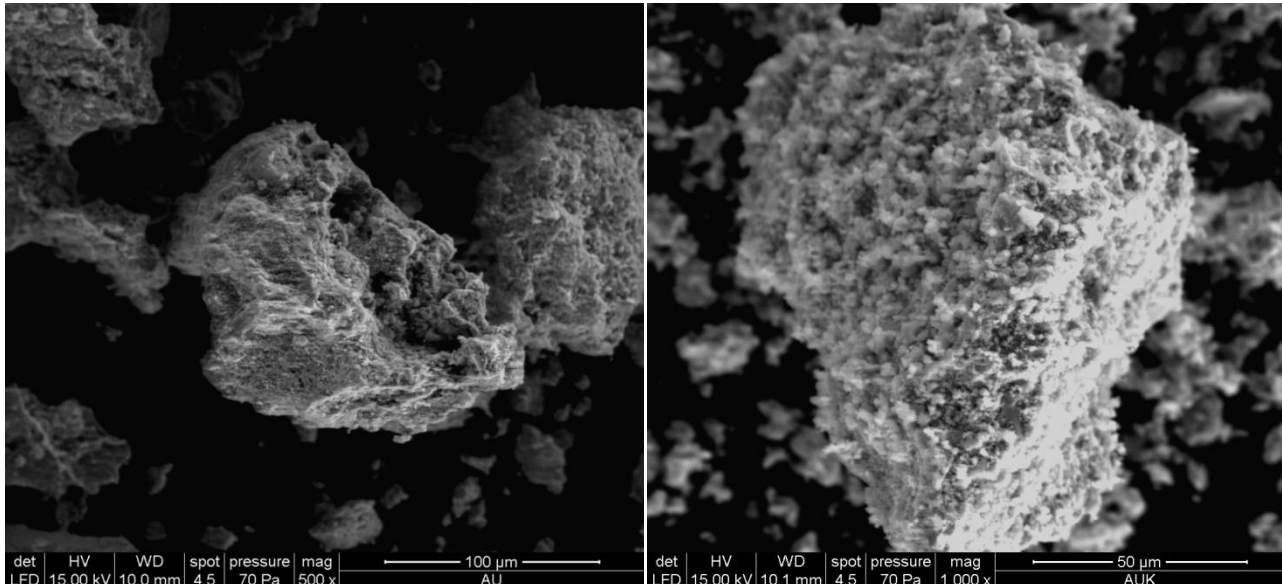
4.1.2 Morfologi (SEM)

For at studere askernes struktur er disse undersøgt med SEM. Da askerne bliver forstørret vil eventuelle forskelle mellem de to asketyper morfologi fremgå.



Figur 4.1-2: SEM billede af LA 2009 ubehandlet. Asken på billedet th. er knust og forstørret dobbelt i forhold til tv.. Størrelsen fremgår af barren på billederne.

I Figur 4.1-2 og Figur 4.1-3 ses der et billede af LA 2009 og AA forstørret op 500 gange og knust forstørret op 1000 gange.

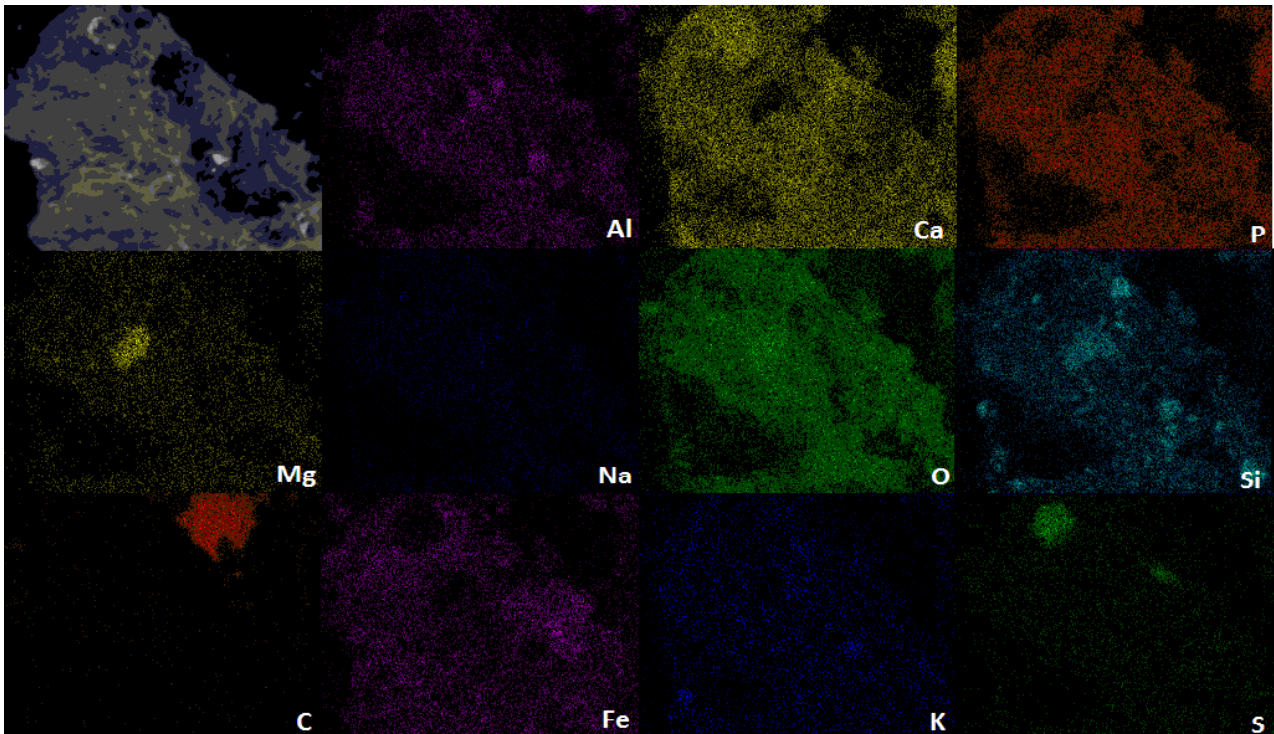


Figur 4.1-3: SEM billede af AA 2009 ubehandlet dog er th. knust og forstørret dobbelt i forhold til tv.. Størrelsen fremgår af barren på billederne.

Det observeres, at LA indeholder mange helt små askekorn i forhold til AA. LA ser kantet ud, mens kornene er mere runde i strukturen i forhold til AA. AA ser mere porøs ud end LA, da der her ses store huller/porer i oversiden. Dog ses det ikke af billederne, hvordan porøsiteten er indeni askerne, så der kan ikke ud fra billederne siges noget endeligt om porøsiteten.

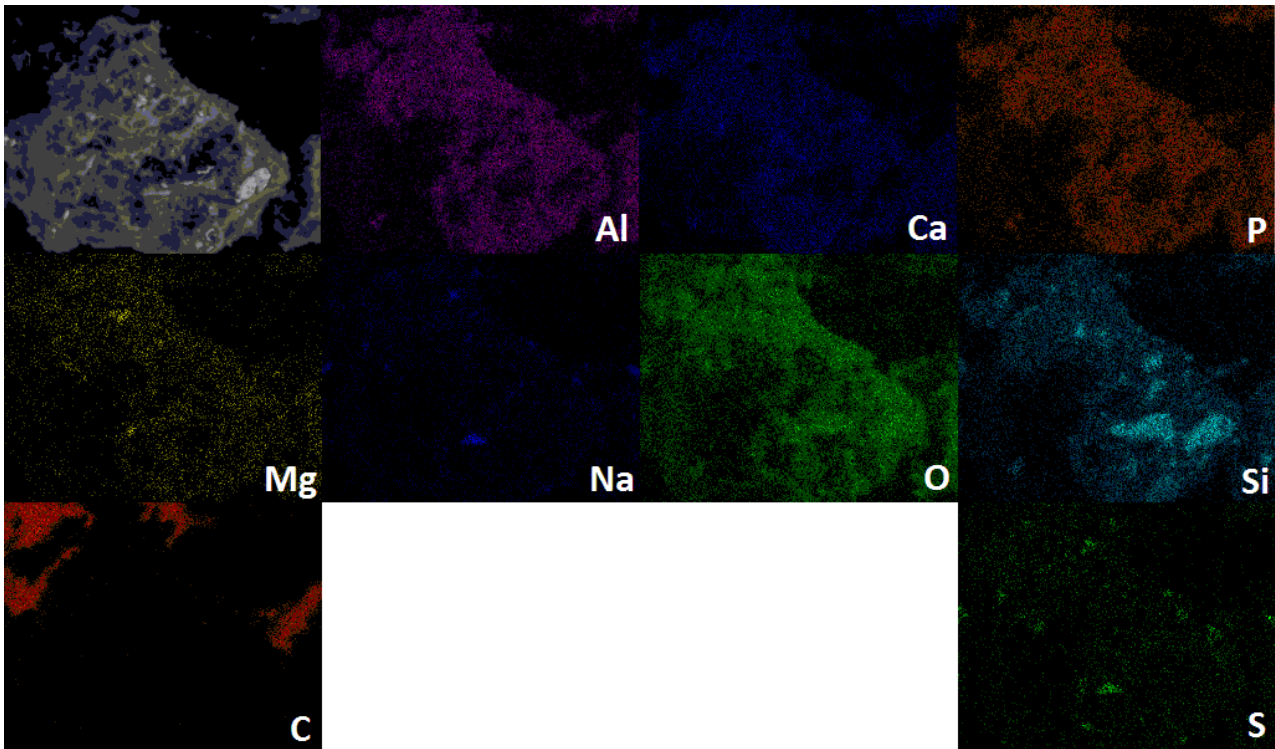
4.1.3 Mineralogi (Elemental mapping)

Mappingen viser sammensætningen af grundstoffer i overfladen af askerne. Det giver altså et billede af, hvilke grundstoffer askerne indeholder, men ikke hvor meget, da målingerne kun tages på overfladen, og derfor ikke fortæller noget om selve partiklens sammensætning. Det er muligt, at der sidder et lag af meget små partikler på overfladen af større partikler, og det vil kunne give et resultat, som ikke er repræsentativt for partiklen selv. Derfor vises tallene fra mappingen ikke i denne rapport, da de præcise resultater for koncentrationer af de forskellige stoffer fås ved en ICP-måling.



Figur 4.1-4: Elemental mapping af AA ubehandlet.

Det ses i Figur 4.1-4, hvilke grundstoffer SEM-EDX målte i overfladen af AA. Der ses mange forskellige metaller, som fx Al, Fe og magnesium (Mg). Det ses også at der er fosfor i overfladen. Mappingen antyder, hvilke grundstoffer der er tilstede, men ikke i hvilken kemisk forbindelse de optræder. Det er derfor ikke sikkert at grundstofferne, som ses ovenfor optræder som eksempelvis ren fosfor eller Natrium. Grundstofferne optræder ofte, som kemiske forbindelser med hinanden. Det observeres at der kun optræder carbon (C) på tapen og ikke i asken.



Figur 4.1-5: Elemental mapping af Lundtofte asken ubehandlet.

I Figur 4.1-5 fremgår mappingen af LA. Her ses det igen at der ikke er C i overfladen af asken. Igen er fosforen fremtræden. I forhold til Avedøre asken ser det ud til at der er mere svovl i overfladen af LA i forhold til AA.

Det observeres, at der i overfladen af AA er fundet Fe, hvilket der ikke er i LA. Derudover er Al mere fremtrædende i LA i forhold til AA, hvilket var forventet.

For begge asker er nogle af grundstofferne fx Si fundet i afgrænsede arealer. Det tyder på, at askepartiklene er konglomerater af partikler så som kvarts kittet sammen med en ikke krystallinsk fase (Donatello mf. 2008: s. 75).

4.2 Syrevask

Under projektopstart tog vi udgangspunkt i Jensen, Kirkelund og Ottosens (Jensen mf. 2012) rapport om syrevaskning. Derfor blev de 2 syrer HNO_3 og H_2SO_4 valgt med forskellige koncentrationer til syrevaskning af de 2 typer aske. Se Tabel 3.3-1.

For at undersøge hvad syrevaskningen, gør ved den kemiske sammensætning af askerne, laves oplukningsforsøg, og ICP-analyser af disse. Resultaterne fra de ikke vaskede asker, sammenholdes med resultaterne fra de vaskede asker. I dette projekt lægges der særlig vægt på hvad der er sket med indholdet af fosfor og tungmetaller. Hypotesen er at disse indhold falder.

Restproduktet efter syrevaskningen vil være en aske, med et noget mindre indhold af fosfor og tungmetaller. Det er denne aske der i opgaven arbejdes med.

Fosforen skal derefter skilles fra syren, sådan at den kan genanvendes. Det vil der ikke komme videre ind på i denne opgave, men der henvises til Jensen, Kirkelund og Ottosens (Jensen mf. 2012) rapport.

4.2.1 LA

Som tidligere nævnt, vaskes Lundtofte asken i syrerne HNO_3 og H_2SO_4 . I det følgende vises resultaterne fra ICP-analyse af oplukningsforsøgene, for asken efter syrevaskning.

	Lundtofte Ubehandlet 2009	Lundtofte HNO_3 2009	Lundtofte H_2SO_4 2009
pH	10,03 ± 0,04	4,20 ± 0,05	4,77 ± 0,10
Ledningsevne [mS/cm]	54,10 ± 0,46	3,57 ± 0,24	4,06 ± 0,20
Glødetab (550°C) [%]	3 % ± 1 %	11 % ± 0,2 %	13 % ± 2 %
Al [g/kg]	67,72 ± 5,45	67,63 ± 2,33	55,24 ± 10,85
Cd [g/kg]	0,001 ± 0,0001	0,001 ± 0,0002	0,001 ± 0,0001
Cr [g/kg]	0,03 ± 0,002	0,04 ± 0,005	0,03 ± 0,01
Cu [g/kg]	0,44 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,30 ± 0,05
Fe [g/kg]	18,44 ± 2,45	25,92 ± 0,99	19,12 ± 3,84
Ni [g/kg]	0,02 ± 0,001	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,01
P [g/kg]	71,99 ± 7,61	44,60 ± 1,53	42,35 ± 6,52
Pb [g/kg]	0,07 ± 0,004	0,08 ± 0,03	0,07 ± 0,02
Zn [g/kg]	1,47 ± 0,13	1,70 ± 0,52	1,33 ± 0,44

Tabel 4.2-1: Koncentrationerne af forskellige macroelementer og sporstoffer, pH, ledningsevne og glødetab for LA ubehandlet samt syrevasket med hhv. HNO_3 og H_2SO_4 .

I ovenstående Tabel 4.2-1 fremgår det at syrevaskningen ved begge syrer, har bevirket et fald i indholdet af fosfor. Dette er gået fra et indhold på 7,2 % af den samlede masse, til hhv. 4,5 % og 4,2 % for HNO_3 og H_2SO_4 .

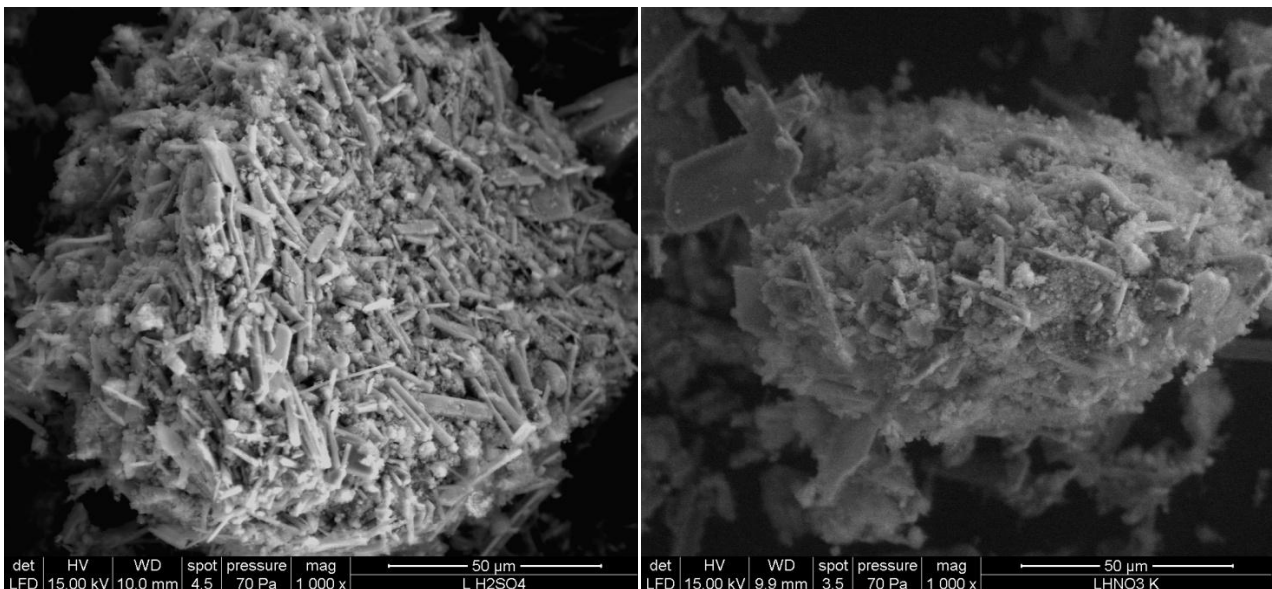
Glødetabet er steget markant, og overstiger kravet på de 5 % for anvendelse i betonen.

Af Tabel 4.2-2 fremgår det at vaskningen med HNO_3 , har fjernet 38 % af fosforen fra asken, mens H_2SO_4 har fjernet 41,17 % fosfor. Det bemærkes også at udvaskningerne af Cd giver resultater, som ligger tæt op af hinanden, på forholdsvis 58,81 % og 57 % af det samlede indhold for de 2 syrer. Syrevaskning med HNO_3 har bevirket en stigning på 29 % krom (Cr) og et fald på 0,78 % Cr, ved syrevaskning med H_2SO_4 . For begge

syrevaske er askens koncentrationer af Fe, nikkel (Ni) og Pb steget i forhold til mængden af aske. Ved dette skal det lige nævnes, at der kommer ikke mere, men grundet askens masse bliver mindre ved syrevaskning, bliver indholdet mere koncentreret.

	Lundtofte HNO ₃ 2009	Lundtofte H ₂ SO ₄ 2009
Al	0,12%	18,43%
Cd	58,81%	57%
Cr	-29%	0,78%
Cu	22%	32%
Fe	-41%	-3,66%
Ni	-33%	-2%
P	38%	41,17%
Pb	-24%	-4%
Zn	-15%	9,82%

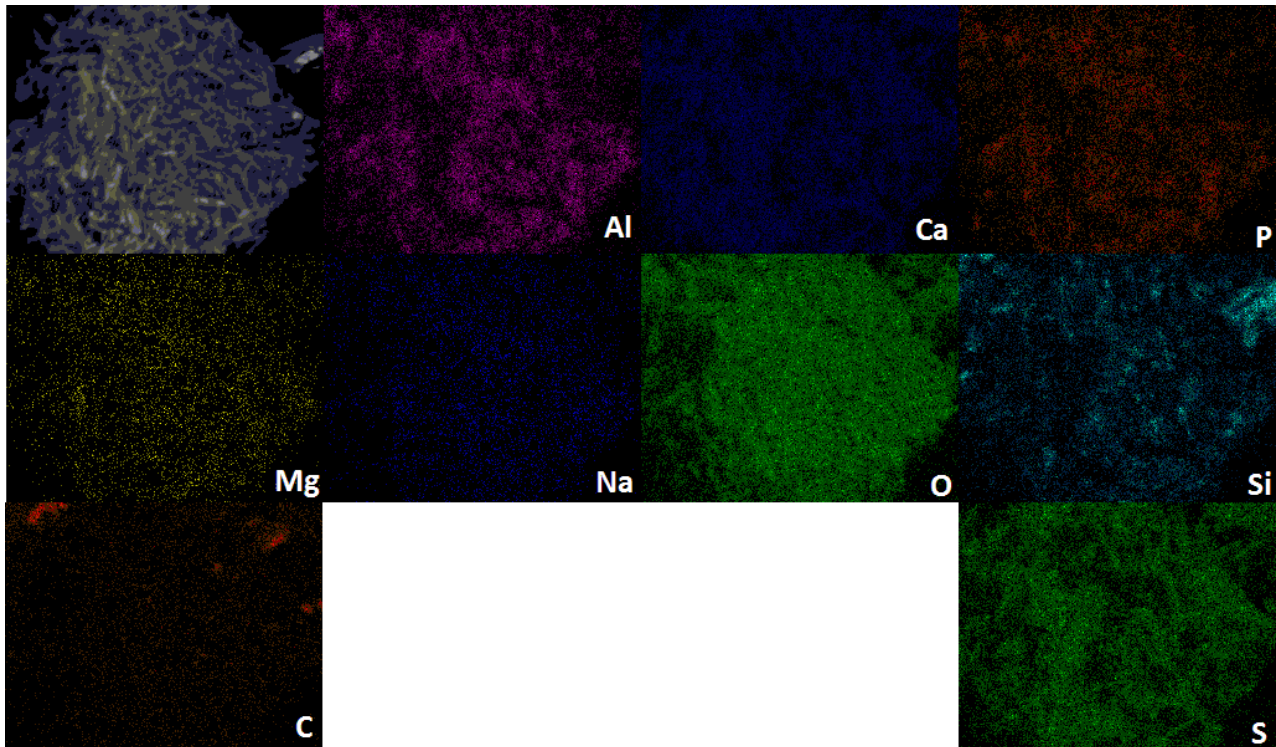
Tabel 4.2-2: Det procentvise fald for de forskellige stoffer i LA.



Figur 4.2-1: SEM billeder af LA syrevasket. Tv. Ses asken syrevasket med H₂SO₄ og th. med HNO₃. Størrelsen fremgår af barren på billedet.

Af Figur 4.2-1 ses tydeligt at syrerne H₂SO₄ og HNO₃, har haft meget forskellig virkning på askerne. Asken tv. ser ud til at danne askekorn sammensat af en masse små splinter, mens askekornet der ses th. mere ligner en sammenhængende helhed.

De nålelignende dele på Figur 4.2-1 ligner gipsminerale. Disse gipsminerale ses også i Jensen, Kirkelund og Ottosens (Jensen mf. 2012: s. 53) rapport. Den kemiske formel for gips er CaSO₄. Dette var forventeligt, da asken indeholder Ca, se evt. Figur 4.1-4 og Figur 4.1-5, og syren indeholder SO₄. Disse gipsminerale ses der ingen af i Figur 4.2-1 th., hvor den er syrevasket med HNO₃, og derfor ikke indeholder SO₄.



Figur 4.2-2: Elemental mapping af LA syrevasket med H_2SO_4 .

Af Figur 4.2-2 ses hvilke grundstoffer, som findes i overfladen af LA vasket i H_2SO_4 , samt deres placering. Igen ses det, at der ingen Fe er i overfladen af asken.

4.2.2 AA

AA gennemgår samme behandling som LA, og vaskes altså i de to syrer. Resultaterne af syrevasken findes ved ICP-analyse. I dette afsnit gennemgås ICP-resultaterne af askernes sammensætning, vasket i begge syrer og sammenlignet med sammensætningen af en ubehandlet aske. Se Tabel 4.2-3.

	Avedøre Ubehandlet	Avedøre H_2SO_4	Avedøre HNO_3
pH	10,37 ± 0,02	4,72 ± 0,01	4,65 ± 0,03
Ledningsevne [mS/cm]	2,12 ± 0,02	2,35 ± 0,03	2,74 ± 0,04
Glødetab (550°C)	0,3 % ± 0,01 %	10 % ± 2 %	3 % ± 0,1 %
Al [g/kg]	20,13 ± 0,54	11,95 ± 3,48	24,11 ± 17,36
Cd [g/kg]	0,003 ± 0,0001	0,002 ± 0,0003	0,002 ± 0,001
Cr [g/kg]	0,08 ± 0,002	0,07 ± 0,01	0,07 ± 0,02
Cu [g/kg]	0,55 ± 0,01	0,31 ± 0,05	0,35 ± 0,06
Fe [g/kg]	78,24 ± 2,93	62,45 ± 10,39	56,50 ± 26,64
Ni [g/kg]	0,06 ± 0,001	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,02
P [g/kg]	105,41 ± 3,77	56,53 ± 8,81	61,31 ± 10,57
Pb [g/kg]	0,09 ± 0,001	0,07 ± 0,01	0,08 ± 0,03
Zn [g/kg]	2,16 ± 0,06	0,96 ± 0,16	1,34 ± 0,50

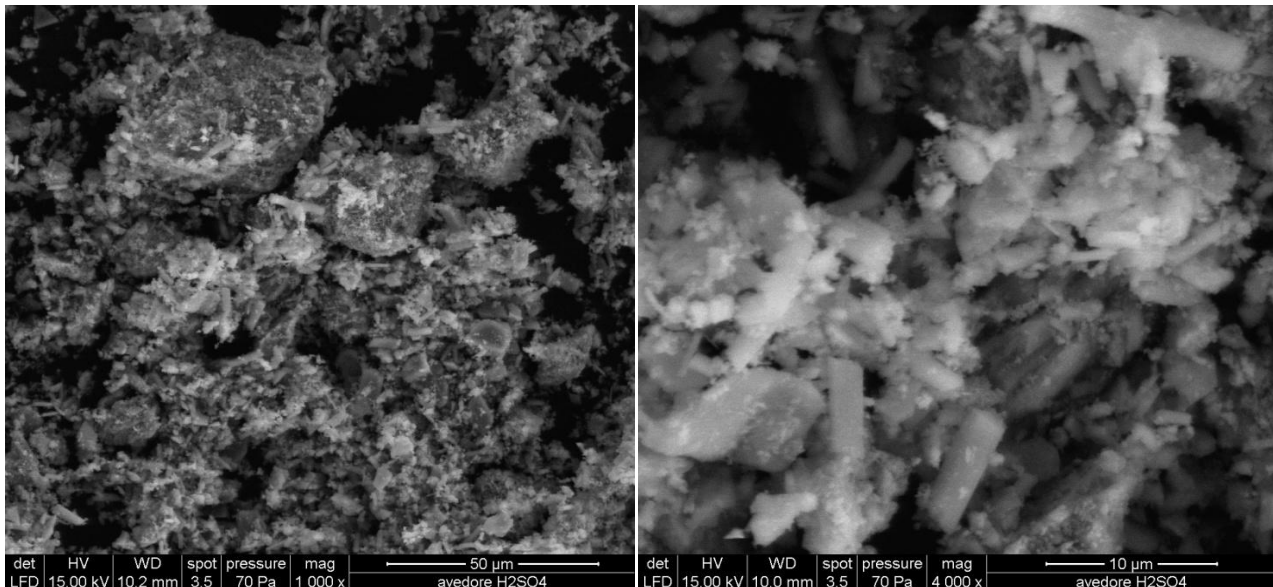
Tabel 4.2-3: Koncentrationerne af forskellige macroelementer og sporstoffer, pH, ledningsevne og glødetab for AA ubehandlet samt syrevasket med hhv. HNO_3 og H_2SO_4 .

AA behandlet med HNO_3 lever op til grænseværdien for glødetabet på max 5 %, hvorimod asken behandlet med H_2SO_4 overstiger denne markant. Dette høje glødetab kan skyldes gipsdannelsen, som kan indeholde vand. Dette vand fordamper ved glødetabstesten (Heijden 2011: s. 103). Men det kan også skyldes, at der ved syrevaskningen ikke fjernes det organiske materiale, som forsvinder ved høje temperaturer.

	Avedøre H_2SO_4	Avedøre HNO_3
Al	41%	-20%
Cd	46%	43%
Cr	16%	15%
Cu	43%	35%
Fe	20%	28%
Ni	30%	25%
P	46%	42%
Pb	19%	10%
Zn	56%	38%

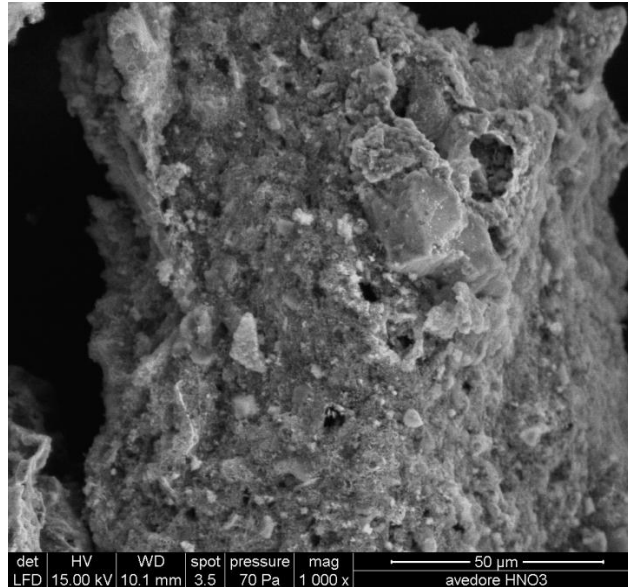
Tabel 4.2-4: Det procentvise fald for de forskellige stoffer i AA.

Af Tabel 4.2-4 ses det, at alle indholdene af tungmetaller og af fosfor er faldende, med undtagelse af Al koncentrationen i den HNO_3 vaskede aske, hvilken stiger med 20 %. Fosfor indholdet i askerne er faldet med 42 % og 46 % efter syrevaskningen. Der ses også store procentvise fald på fx tungmetallerne zink (Zn), Ni, Fe og kobber (Cu). Koncentrationen af Cd ses også at falde med en stor procentdel.



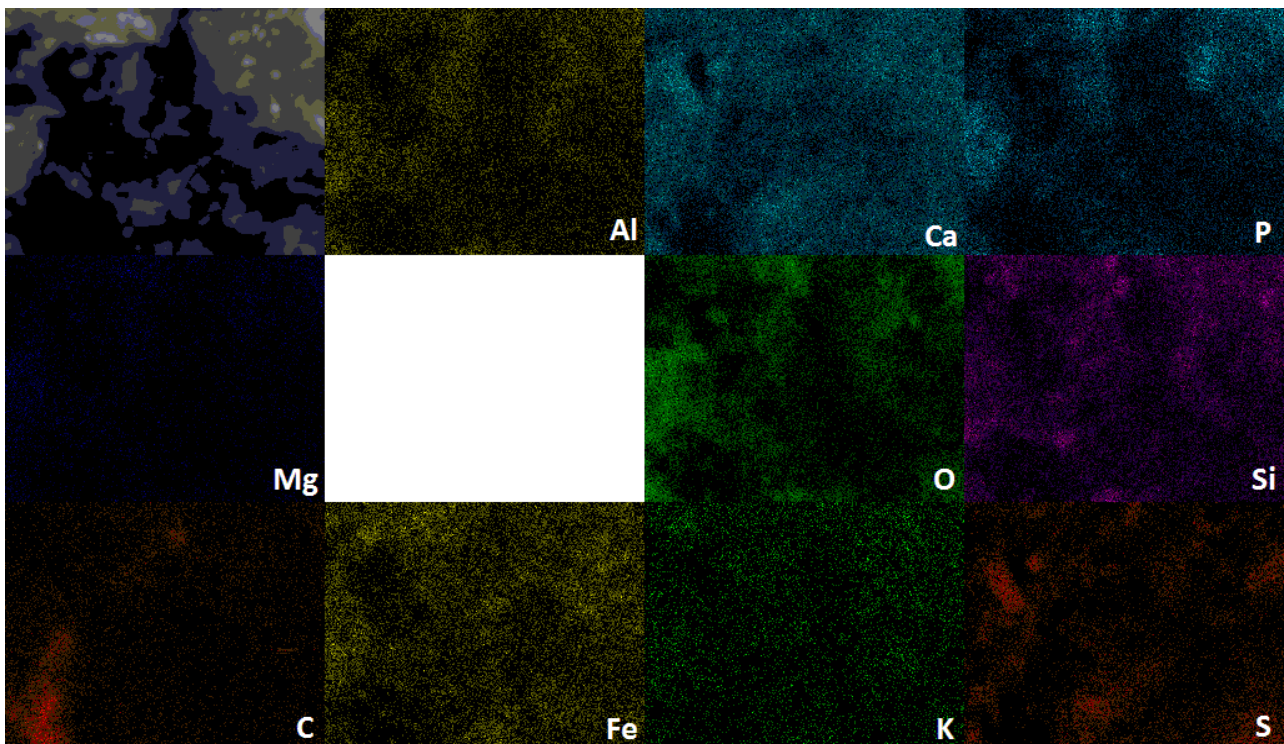
Figur 4.2-3: SEM billeder af AA syrevasket med H_2SO_4 . Billedet th. er forstørret 5 gange så meget i forhold til tv.. Størrelsen fremgår af barren på billederne.

AA syrevasket i H_2SO_4 ses af Figur 4.2-3, ser ud til at være sammensat af en masse små partikler, der uden at hænge sammen ligger meget tæt. Billedet th. viser klart gipsminerallerne og ser mindre kompakt ud i forhold til AA syrevasket med HNO_3 . Se Figur 4.2-4.



Figur 4.2-4: SEM billeder af AA syrevasket med HNO_3 . Størrelsen fremgår af barren nede i venstre hjørne.

Af Figur 4.2-5 ses hvilke grundstoffer, som findes i overfladen af AA vasket i H_2SO_4 , samt deres placering. Det fremgår klart at der masserer af Fe i overfladen af asken. Til gengæld er der ingen Natrium (Na) at spore i overfladen.



Figur 4.2-5: Elemental mapping af AA syrevasket med H_2SO_4 .

4.3 Mørtelprøver

I hht. Teoriafsnittet 2.1.2 er det mørtlen i betonen, der er den væsentlige faktor i trykstyrken. Det er derfor vurderet, at forsøgene er udført som mørtelprøver i stedet for betonprøver. Mørtelprøverne er forsøgt udført efter DS/EN 196-1.

Under projektet blev der støbt 132 stk. mørtelprøver. Heraf 56 stk. til screeningen. Mørtelprøverne blev støbt med ubehandlet aske, syrevasket aske og andre helt uden aske. Støbningerne uden aske blev anvendt som referencer, således at trykstyrken kunne sammenlignes med en prøve uden noget tilsat.

4.3.1 Screening

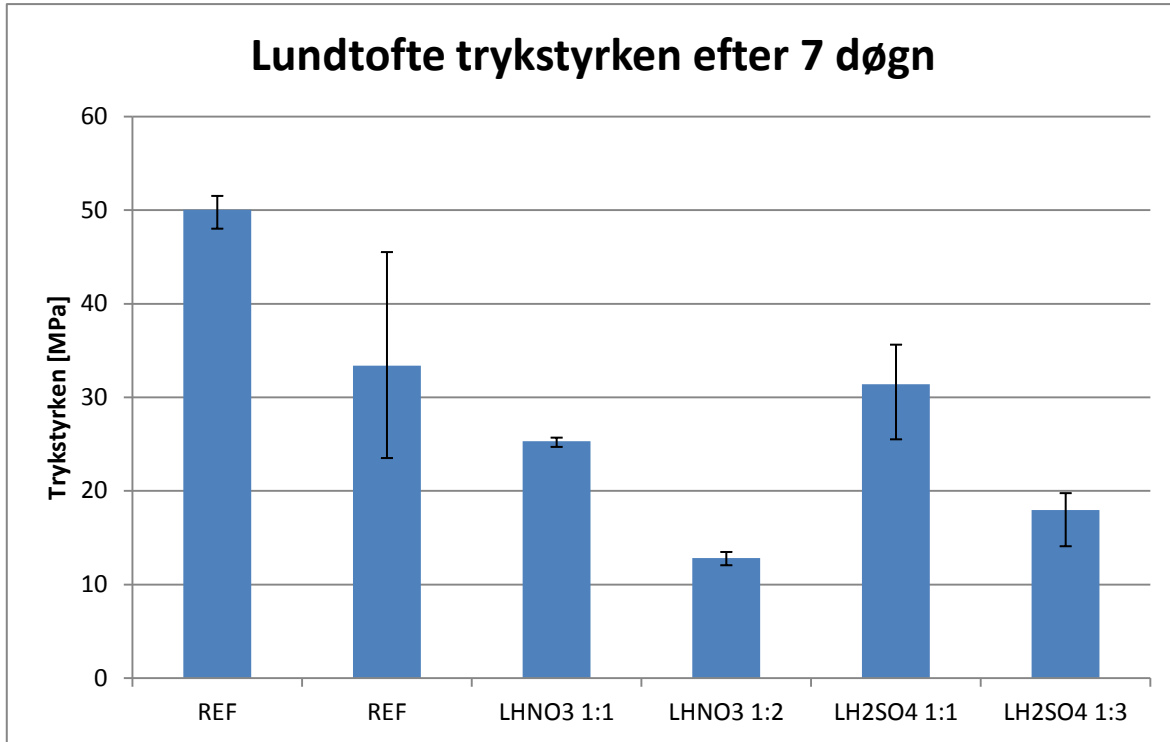
Til opstart blev det undersøgt, hvor meget aske der skal tilsættes, når der fjernes 20 % af cementen. Disse mørtelstøbninger blev lavet med forskellige mængder af aske i forhold til den 20 % fjernede cement. Nogle blev lavet i forholdet 1:1, mens andre blev støbt i forholdet 1:2, altså kom der dobbelt så meget aske i, som der blev taget cement ud, og 1:3. De 20 % af cementen er et erfaringstal fra flyveasken. Se afsnit 2.1.5. Derudover blev der lavet blandinger med forskellige asker. Disse asker var følgende: LA uvasket (LU), LA uvasket knust (LUK), LA syrevasket med HNO_3 (LHNO_3), LA syrevasket med H_2SNO_4 (LH_2SO_4), AA uvasket (AU), AA uvasket knust (AUK), AA syrevasket med HNO_3 (AHNO_3), AA syrevasket med HNO_3 knust (AHNO_3K), AA syrevasket med H_2SNO_4 (AH_2SO_4) og AA syrevasket med H_2SNO_4 knust ($\text{AH}_2\text{SO}_4\text{K}$). Derudover blev der også lavet 2 referencer (REF). I Bilag 4.3.1 ses en oversigt af blandingerne. Da dette blot var et screeningsforsøg hærkede prøverne kun i 7 døgn, sådan at der hurtigt kunne dannes et billede, af hvilke mørteltyper der var værd at gå videre med. For hver type aske og mængde aske blev der lavet 3 mørtelprøver, dog samme blanding. Det vil sige 19 støbninger, der gav 57 mørtelprøver.

4.3.1.1 Trykstyrke

Da det er trykstyrken der undersøges i dette projekt, blev der foretaget 2 trykprøvninger på hver mørtelprøve. En i hver ende da prøven er omkring 16 cm lang. Ved trykprøvningen kom der et resultat ud i form af en kraft i kN, for at kunne sammenligne resultaterne, blev dette omregnet til en trykstyrke i MPa. Se Formel 1. Resultatet af trykprøvningen ses i Bilag 4.3.2.

Herved fås nogle resultater, der kan sammenlignes med hinanden. I Figur 4.3-1 er trykstyrkeresultaterne for LA indtegnet. Det fremgår klart, at der ved iblanding af aske sker en reducere af styrken.

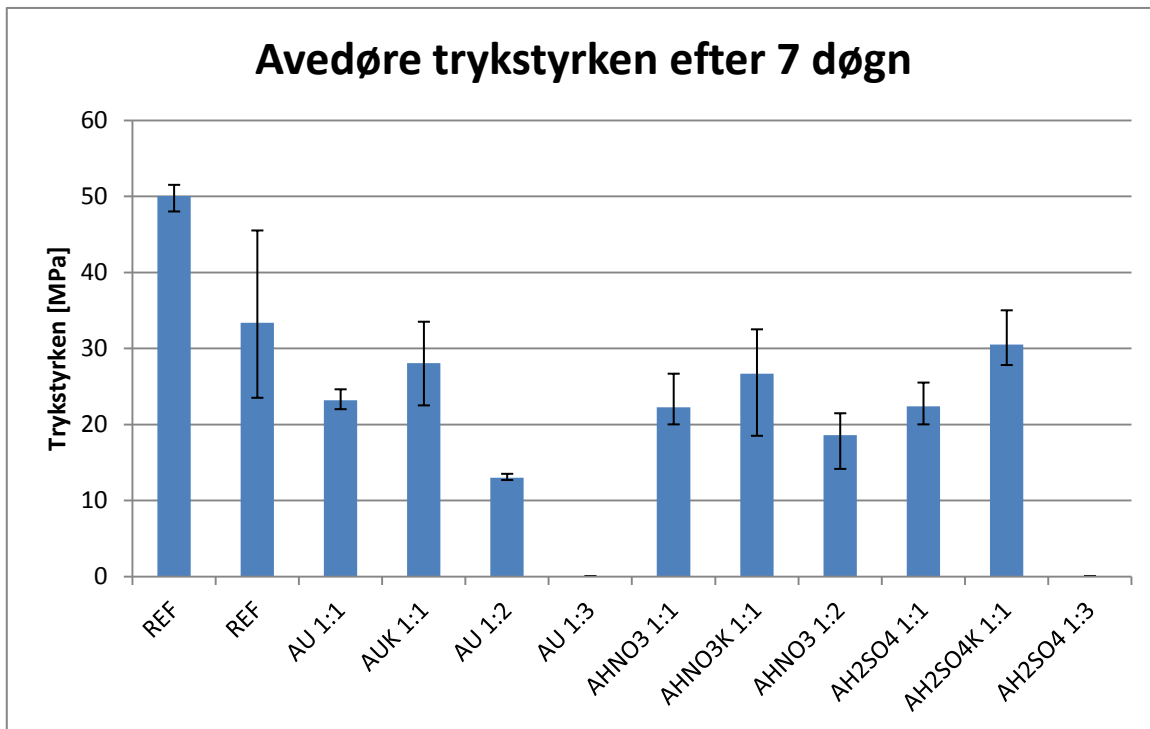
Referenceprøverne lå på en trykstyrke mellem 33-50 MPa hvor LU 1:1 lå på ca. 20 MPa, LHNO_3 1:1 lå på 25 MPa og LH_2SO_4 lå på en middeltrykstyrke af 31 MPa.



Figur 4.3-1: Trykstyrken for LA mørtelprøver i screeningsforsøg efter 7 døgn angivet i MPa. Resultaterne er afbildet op til middelværdien af de 3 prøveemner og med spredningen angivet.

Det ses også at der sker en reduktion af styrken, når der tilsættes aske i forholdet 1:2 og 1:3 i stedet for 1:1 ex sker der en reduktion fra 31 MPa for LH_2SO_4 1:1 til 18 MPa for LH_2SO_4 1:3, dvs. et fald på 42,8 %. Det vil sige at jo større forholdet er, jo dårligere bliver styrken. Grundet dette arbejdes der fremover kun med støbninger hvori cementen er erstattet af aske i forholdet 1:1.

Derudover ses det at LA vasket i syren H_2SO_4 , har en meget større styrke end LA vasket i HNO_3 . Grundet denne observation bliver der fremover kun arbejdet med syren H_2SO_4 til syrevaskning af LA.



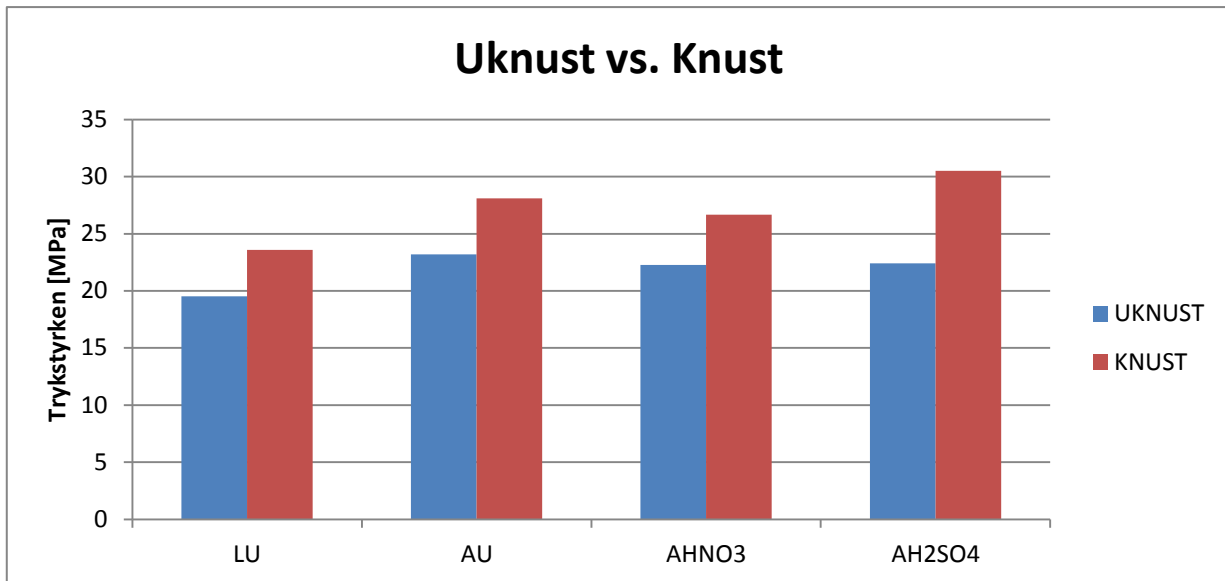
Figur 4.3-2: Trykstyrken for AA mørtelprøver i screeningsforsøg efter 7 døgn angivet i MPa. Resultaterne er afbildet op til middelværdien af de 3 prøveemner og med spredningen angivet.

For AA gælder det tydeligvis også, at jo mere aske der tilsættes, jo dårligere bliver styrken. I mørtelstøbningerne, hvor der er tilsat 3 gange så meget aske, som der er fjernet cement, var det ikke muligt at få målinger. Mørtelstøbningerne var simpelthen så svage, at de smuldrede, og maskinen ikke kunne måle nogen styrke i dem.

Det ses også af Figur 4.3-2, at syrevask i H_2SO_4 ikke giver stærkere mørtelstøbninger end aske vasket i HNO_3 . Dog grundet LA arbejdes der kun videre med H_2SO_4 for begge asker.

4.3.1.2 Knusnings virkning på slamasken

Under screeningsforsøget blev der også lavet mørtelstøbninger med knust aske, for at se om der var en positiv effekt ved dette. I Figur 4.3-3 ses en graf over mørtelprøverne i 1:1 knust og ikke knust.



Figur 4.3-3: Trykstyrken i MPa for LU, LUK, AU, AUK, AHNO₃, AHNO₃K, AH₂SO₄ og AH₂SO₄K efter 7 døgn.

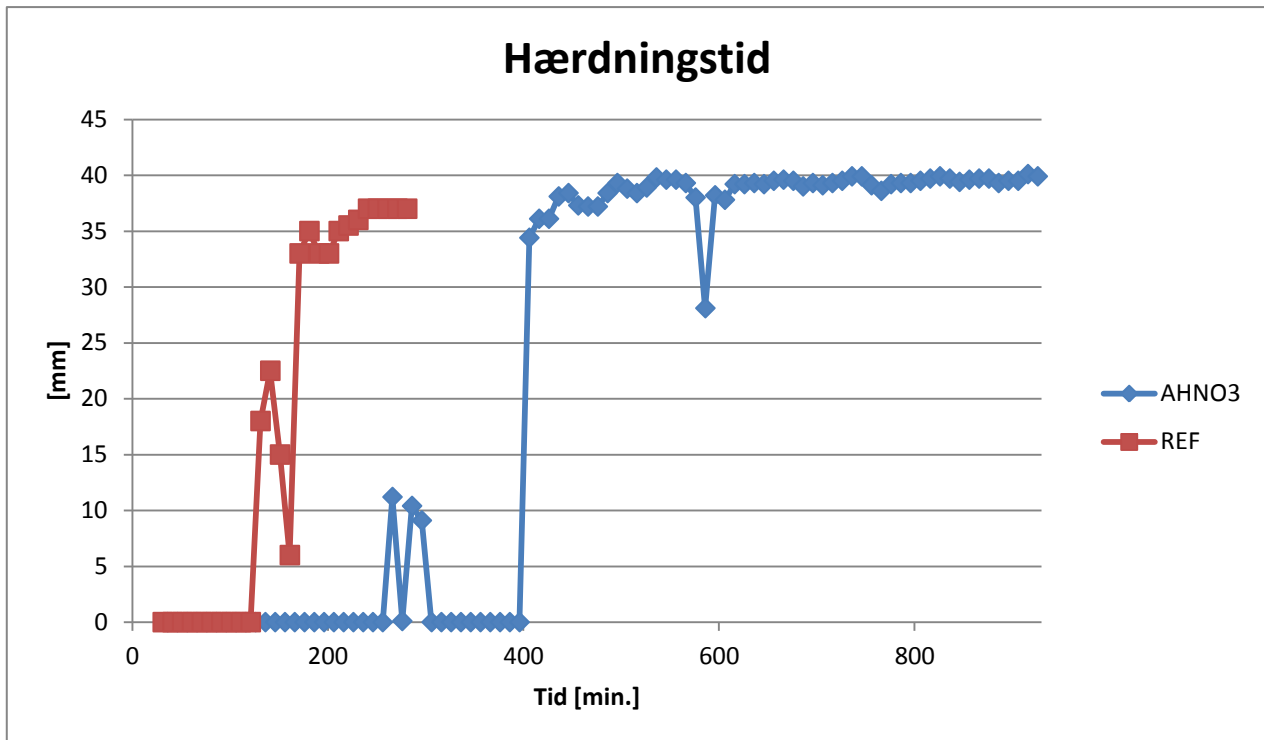
Som det klart fremgår af Figur 4.3-3 har knusningen af asken en positiv effekt på trykstyrken. Mørtlen opnår herved en højere styrke ved knust aske i forhold til ikke knust aske, uanset aske type. Der er i gennemsnit en stigning på 21 % svarende til 5,75 MPa. Dette skyldes formentlig at der opnås en større overflade ved knusning, og dermed bedre bindingsegenskaber. Derudover kunne det forestilles, at nogle af lufthullerne udlignes i asken ved knusningen, der gør de knuste asker mindre porøse, og derfor mere robuste.

Dog kan der være tale om en "falsk" forbedring, som det sås for sandet i Donatello, Freemann-Pask, Tyler og Cheesemans (Donatello mf. 2009) rapport.

4.3.1.3 Hærdning

I tidligere forskning er det nævnt, at fosfor har en retarderende effekt på hærdningen. Derfor blev hærdningstiden af en mørtelstøbning med aske undersøgt, og sammenlignet med hærdningstiden af en reference støbning. Dette undersøges ved brug af et Vicat apparat.

I Figur 4.3-4 ses hærdeforløbet for en af de undersøgte asker, AHNO₃. AF figuren fremgår det at Aafbindingstiden bliver udskudt i forhold til REF. REF påbegynder at afbinde efter 131 min., hvorimod AHNO₃ først begynder efter 266 min. Det tager altså næsten dobbelt så lang tid for AHNO₃ at afbinde i forhold til REF.



Figur 4.3-4: Hærdningstiden for REF og AHNO₃.

Der kan ikke på baggrund af dette forsøg konkluderes, hvorvidt det er fosforen, der har en retarderende effekt, eller om det er andre elementer i asken, men en forskydning af afbindingen ses tydeligt.

Da Vicat apparatet gik i stykker umiddelbart efter dette første forsøg, var det ikke muligt at lave yderligere undersøgelser vedrørende hærdningstid for de andre mørtelstøbninger.

4.3.2 42 døgns forsøg

Ud fra de delkonklusioner der er blevet draget på baggrund af screeningsforsøget blev der lavet 5 mørtelprøver: REF, AUK, LUK, AH₂SO₄K og LH₂SO₄K. For at få en ide om trykstyrkeudviklingen blev der lavet 5 mørtelstøbninger af hver, således at hver enkelte kunne trykprøves efter 7 døgn, 14 døgn, 28 døgn, 35 døgn og 42 døgn. Se Bilag 4.3.3 for en oversigt af blandingerne. I alt blev der lavet 75 mørtelprøver.

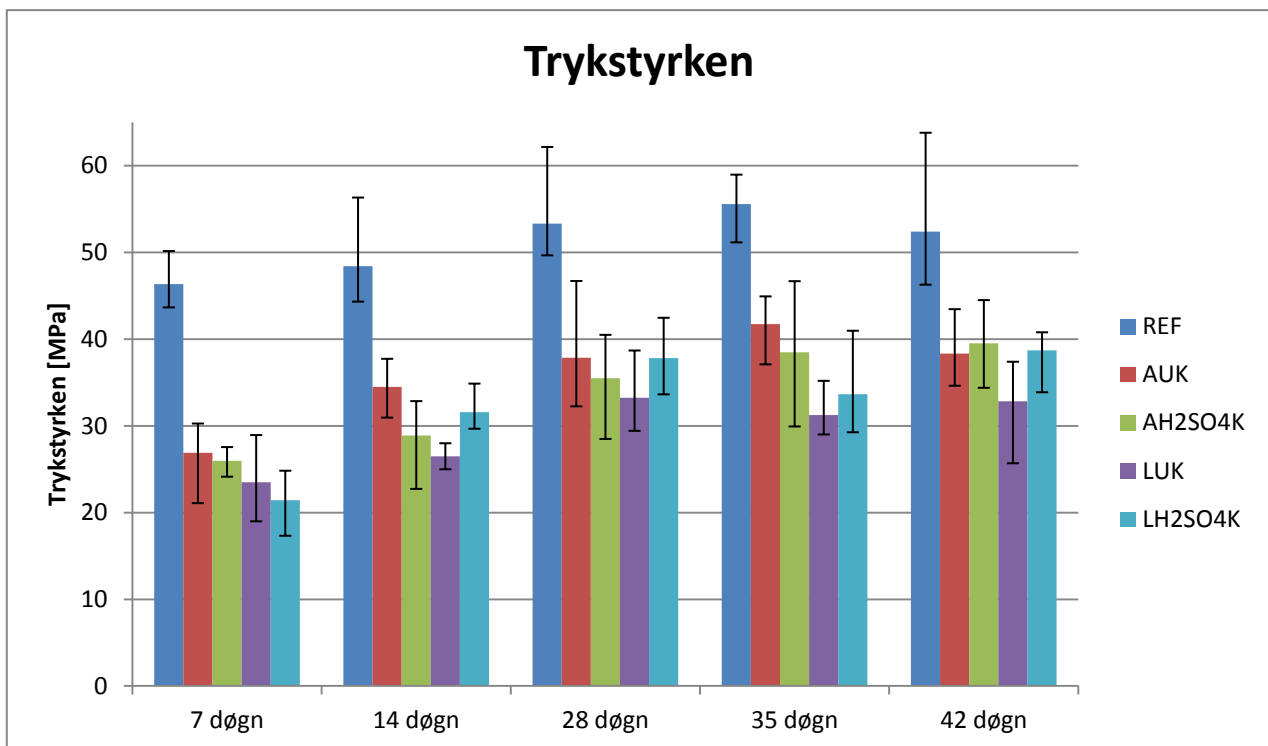
Der er en chance for at en mørtelblanding kan være udført med fejl, sådan at de 3 prøver fra netop denne blanding har en lavere styrke end prøverne fra andre mørtelblandinger af samme type. Af denne grund trykprøves altid 3 mørtelprøver, fra forskellige blandinger af samme type. På den måde vil det blive opdaget, hvis prøverne fra en bestemt blanding, generelt har en lavere styrke end de andre prøver, og det er derved muligt at se bort fra disse resultater.

Resultaterne fra trykprøvningen af de 75 mørtelprøver fremgår af Bilag 4.3.4.

4.3.2.1 Trykstyrke

Af figur 4.3.2-1 ses trykstyrken af de 5 forskellige mørtelstøbninger, efter 7, 14, 28, 35 og 42 dage. Udover at trykstyrken vokser med tiden, ses det også at referencen generelt er noget stærkere end mørtelprøverne indeholdende aske. Dog ser det umiddelbart ud som om, at styrkeforskellen bliver mindre med tiden. Det kan skyldes at de askeindholdige mørtelprøver ganske enkelt er langsommere til at tiltage i styrke, hvilket

stemmer godt overens med hærdeforsøget. Gennem hele forløbet ligger LUK et godt stykke under de andre styrkemæssigt, hvor de andre 3 AUK, $\text{AH}_2\text{SO}_4\text{K}$ og $\text{LH}_2\text{SO}_4\text{K}$, ligger pænt, og følges godt ad.



Figur 4.3-5: Trykstyrken for de 5 forskellige blandinger over 42 døgn. Resultaterne er afbildet op til middelværdien af de 3 prøveemner og med spredningen angivet.

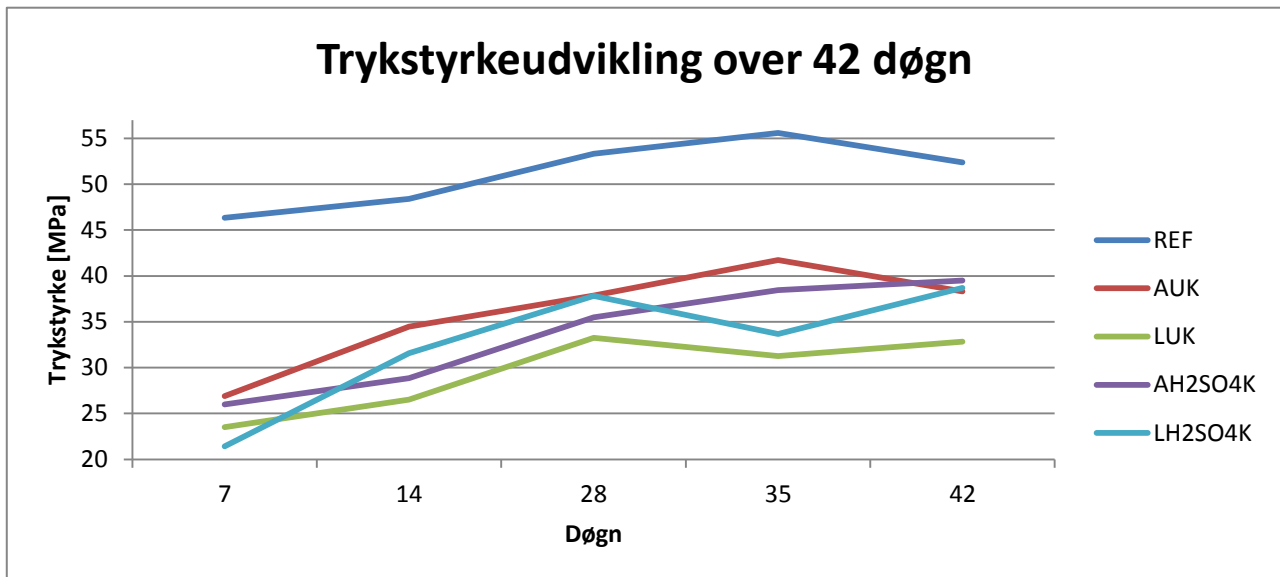
Ifølge DS/EN 196-1 skal trykstyrken efter 28 døgn mindst være 85 % og 95 % efter 90 døgn hærdning. I Tabel 4.3-1 ses det, at ingen af mørtelprøverne lever op til dette krav efter 28 døgn. Dog er $\text{LH}_2\text{SO}_4\text{K}$ og AUK oppe på 71 % af styrken.

Testemne	$R_{c,gen}$ [MPa]	Afvigelse
REF 28 døgn	53,33	0%
AUK 28 døgn	37,86	71%
$\text{AH}_2\text{SO}_4\text{K}$ 28 døgn	35,5	67%
LUK 28 døgn	33,25	62%
$\text{LH}_2\text{SO}_4\text{K}$ 28 døgn	37,82	71%

Tabel 4.3-1: Procentvis afvigelse på trykstyrken efter 28 døgn i forhold til referencen.

4.3.2.2 Styrkeudvikling over tid

Af trykprøveforsøg findes trykstyrken af de forskellige mørtelprøver, efter 7, 14, 28, 35 og 42 dages hærkning. Styrkeudviklingen, af de forskellige mørtler, fremgår af Figur 4.3-6.

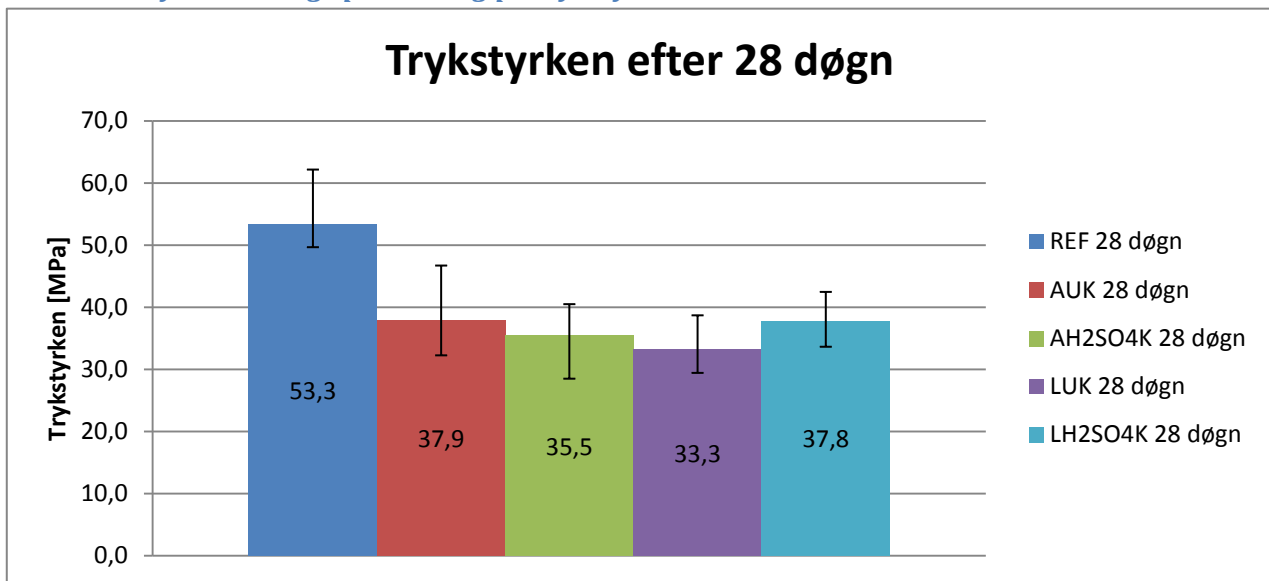


Figur 4.3-6: Trykstyrkeudviklingen for de 5 forskellige blandinger over 42 døgn angivet i MPa.

Det ses af figuren at styrken, for alle forskellige mørteltyper stiger over tid. Dette skyldes at mørtlen hærder. Efter 28 dages hærkning sker der ikke så meget i styrkeudviklingen for referenceblandingen længere. Det ser ud til, at den stiger efter 35 døgn, og falder igen efter 42. Dette skyldes, at der ikke er noget der er helt præcist i praksis, men styrken efter 28 dage ligger så tæt på styrken efter 42 dage, at det må antages at styrkeudviklingen herefter er gået i stå. For de andre mørtelstøbninger som indeholder aske ses det, at styrken efter 35 og 42 dage er stort set det samme. Dette må skyldes at prøverne er hærdet færdigt efter 35 dage.

Det fremgår også her, at REF har en større trykstyrke end mørtelprøverne iblandet aske. Betydningen af dette vil blive diskuteret i afsnit 4.4.1.

4.3.2.3 Syrevasknings påvirkning på trykstyrken



Figur 4.3-7: Trykstyrken efter 28 døgn angivet i MPa.

Af Figur 4.3-7 ses styrkerne af mørtelprøverne efter 28 døgn. Værdierne på figuren er middelværdier for trykstyrkerne. For begge asker er resultaterne af den ubehandlede stillet ved siden af den syrevaskede til sammenligning. Umiddelbart ser det ikke ud som om syrevaskningen af AA, har en positiv effekt på styrken af mørtelprøven, som det burde i forhold til forventningerne af fosforens indflydelse på styrken iht. Aune, Ottosen, Pedersen og Simonsens (Aune mf. 2006: s. 12) rapport, hvor det skrives, at grundet det lavere fosforindhold må styrken efter syrevaskning være højere, da dette kan skyldes fosforens retarderende effekt. Syrevaskningen af LA har haft en lille effekt på trykstyrken, som stiger en smule. Alle trykprøverne ligger over 30 MPa efter 28 døgn, hvilket er en betonstyrke, som ofte bruges i byggeriet.

4.3.2.4 Lundtofte vs. Avedøre

Umiddelbart ses det af Figur 4.3-7 at syrevaskningen har en god virkning på LA. Resultaterne for AA ligger så tæt, at der ikke med sikkerhed kan siges om syrevaskningens påvirkning på trykstyrken. For LA er der sket en større ændring, som også går igen gennem hærtningsforløbet. Se Figur 4.3-6.

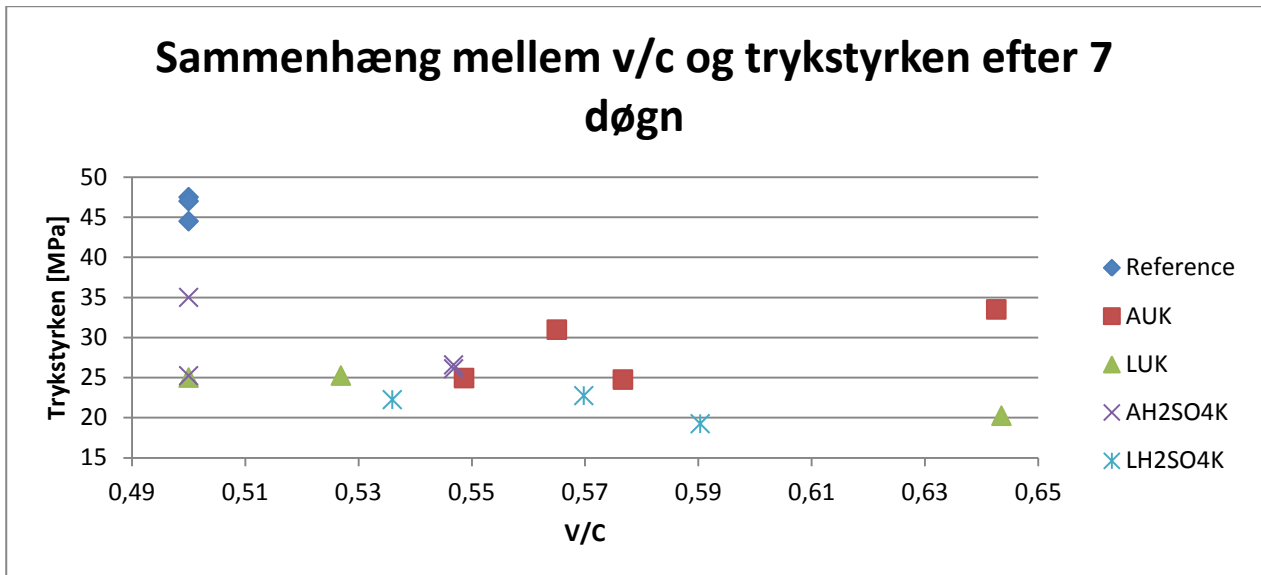
4.3.2.5 Vandbehov og densitet

Grundet den større porøsitet askerne har i forhold til cement, antages det at disse har et større vandbehov end cementen. Når der blandes REF-prøver, som består af cement, vand og sand, er der helt klare normer for mængderne af disse. Da slamasker ikke er omfattet af DS-450, er der ikke opstillet krav for vandindholdet i mørtelstøbninger indeholdende disse.

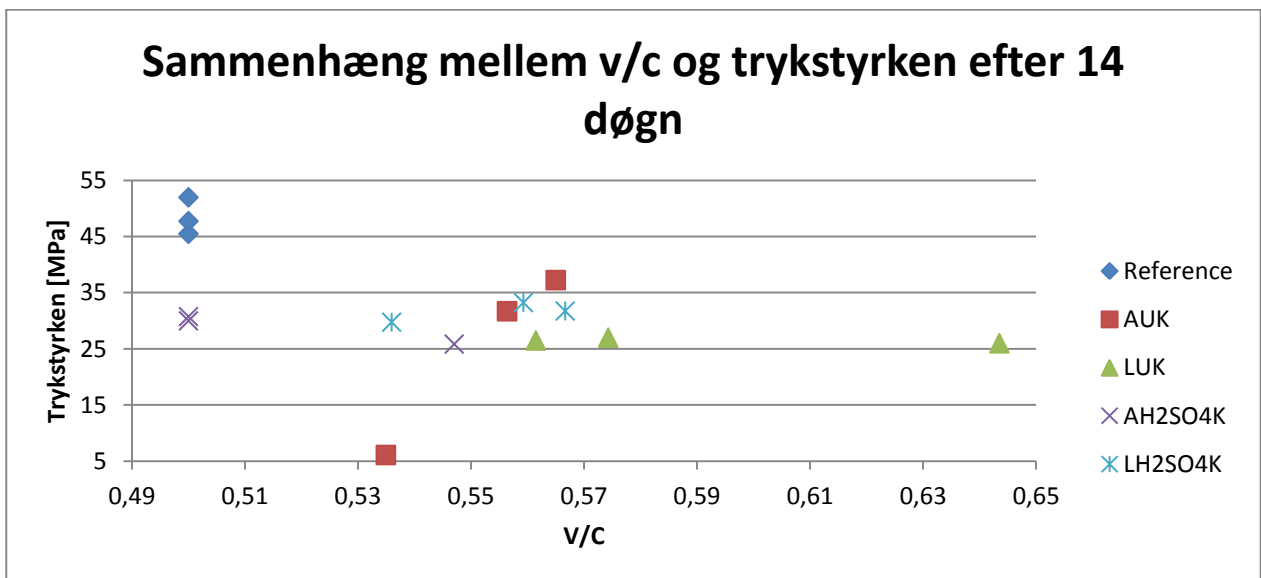
Der må, pga. den manglende viden omkring vandbehovet i mørtelprøver indeholdende aske, eksperimenteres med vandindholdet i prøverne igennem dette projekt. REF-blandingerne udføres ud fra DS/EN standarder, hvoraf det vides hvor meget vand der skal blandes i. Denne konsistens, som referenceblandingerne har, forsøges ramt i blandingerne med aske.

Mørtelprøver som indeholder knuste asker antages at have et mindre vand behov end de ikke knuste asker. Dette antages, da nogle lufthuller vil blive udlignet ved knusningen, sådan at porøsiteten bliver mindre, dog ikke på niveau med cement.

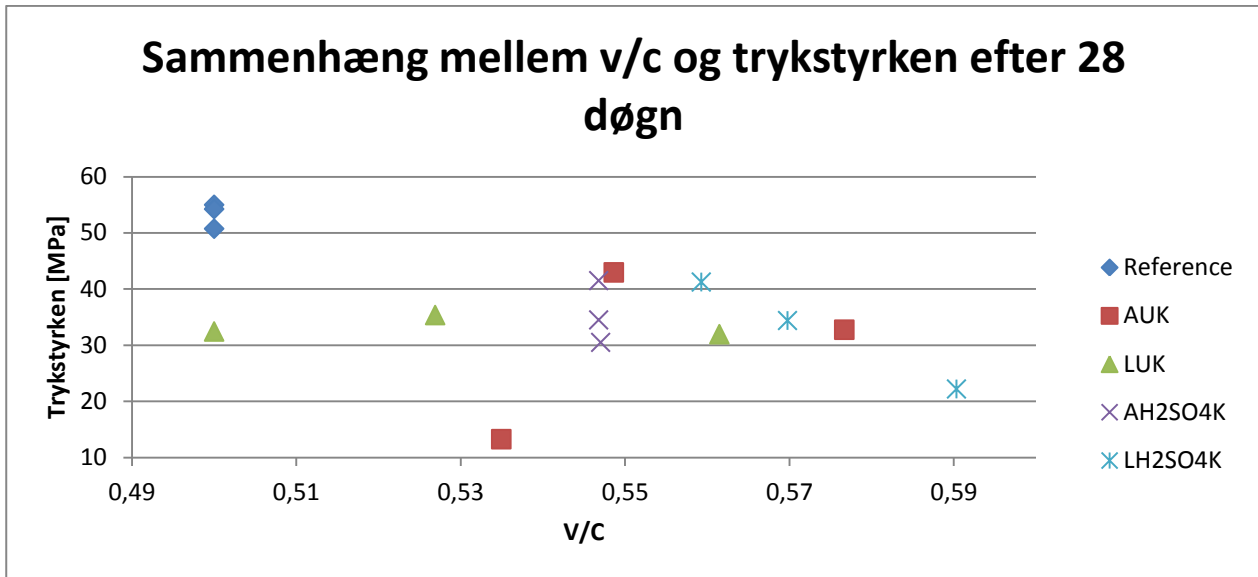
Vandindholdet i de forskellige støbninger, vil i dette afsnit sammenholdes med resultaterne fra trykprøvningen. På den måde vil det vise, hvilken virkning vandindholdet i prøverne har på styrken af disse.



Figur 4.3-8: Sammenhæng mellem v/c og trykstyrken efter 7 døgnet angivet i MPa.



Figur 4.3-9: Sammenhæng mellem v/c og trykstyrken efter 14 døgnet angivet i MPa.



Figur 4.3-10: Sammenhæng mellem v/c og trykstyrken efter 28 døgn angivet i MPa.

Af Figur 4.3-8, Figur 4.3-9 og Figur 4.3-10 ses trykstyrken som funktion af vandindholdet efter 7, 14 og 28 døgn.

Af graferne ses generelt, at der ikke er nogen som helst sammenhæng mellem vandindhold og styrke af mørtelprøverne. Da der er eksperimenteret med vandbehovet er dette et tilfredsstillende resultat i den forstand, at der ikke er blevet "ødelagt" prøveresultater grundet manglende viden om vandindhold.

	$R_{c,middel}$ [MPa]	ρ [kg/m ³]	Vandforhold V/(C+A)
REF 3B	36,3	2197	0,50
REF _{gen 35 døgn}	55,6	2237	0,50
AUK 1D	6,1	1871	0,53
AUK _{gen 14 døgn}	34,5	2212	0,56
AUK 2D	13,3	1941	0,53
AUK _{gen 28 døgn}	37,9	2255	0,56
AUK 3D	16,5	1933	0,53
AUK _{gen 42 døgn}	38,3	2218	0,55
LH ₂ SO ₄ K 1B	19,3	2195	0,57
LH ₂ SO ₄ K _{gen 7 døgn}	21,4	2180	0,55
LH ₂ SO ₄ K 2B	22,2	2193	0,57
LH ₂ SO ₄ K _{gen 28 døgn}	37,8	2193	0,56
LH ₂ SO ₄ K 3B	21,2	2191	0,57
LH ₂ SO ₄ K _{gen 35 døgn}	33,7	2185	0,55

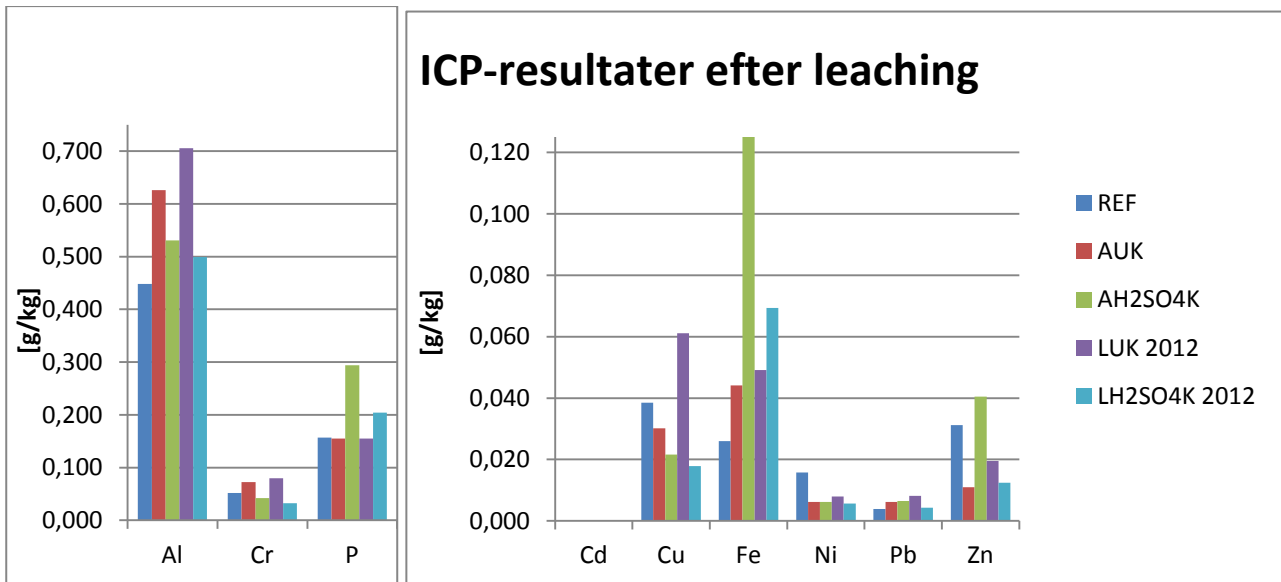
Tabel 4.3-2: Trykstyrke, densitet og v/c for de prøver der blev vurderet til at være ringere.

I Tabel 4.3-2 ses en oversigt af trykstyrken, densiteten og v/c.

Bearbejdigheden af de mørtelprøver med mindst vand, var dårligere og ikke ligeså sammenhængende som dem med mere vand.

4.3.3 Leaching af mørtelprøver

Der er udført leaching forsøg af REF, AUK, AH₂SO₄K, LUK og LH₂SO₄K. Resultaterne fra dette forsøg skal vise omfanget af udsivning til jorden ved eventuel benyttelse af beton med slamaske i praksis. Leaching resultaterne fra mørtelstøbningerne indeholdende aske sammenlignes med de samme resultater fra referenceblandingerne. På den måde undersøges det om der udsiver flere giftige tungmetaller ud, hvis slamasken blev brugt i byggeriet.



Figur 4.3-11: ICP-resultater efter leaching

Af Figur 4.3-11 ses det, at der i de ubehandlede aske udsiver mere Al ud end REF. De syrevaskede aske holder sig tæt på referencen. Udover Al ser det generelt ud til, at der udsiver færre tungmetaller fra de syrevaskede prøver end fra referencen, mens der udsiver lidt mere fra de ubehandlede prøver. For fosfor ses det, at der udsiver mest fra de vaskede aske, hvilket er godt, idet der er interesse i at få fosforen ud i naturen. Det kan skyldes, at syrevaskningen gør at fosforen ikke er så tæt bundet i asken, som den var før. At de syrevaskede aske udskiller mindst tungmetaller, kan skyldes, at syrevaskningen har opløst det, der ikke var så tungt opløseligt, og det der så er tilbage, er så fast bundet at det ikke kan udsive.

Resultaterne fra dette leaching forsøg taler klart for benyttelse af slamaske i stedet for en del af cementen, da det tydeligvis giver mindre udsivning af tungmetaller og mere udsivning af fosfor, hvilket er virkelig godt for miljøet.

	REF	AUK	AH ₂ SO ₄ K	LUK 2012	LH ₂ SO ₄ K 2012
pH	12,533 ± 0,012	12,523 ± 0,015	12,483 ± 0,029	12,520 ± 0,035	12,503 ± 0,012
Al [g/kg]	0,448 ± 0,068	0,626 ± 0,042	0,531 ± 0,101	0,706 ± 0,034	0,499 ± 0,012
Cd [g/kg]	0 ± 0	0,0002 ± 0,0004	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Cr [g/kg]	0,052 ± 0,004	0,073 ± 0,002	0,042 ± 0,002	0,080 ± 0,002	0,032 ± 0,001
Cu [g/kg]	0,038 ± 0,002	0,030 ± 0,002	0,022 ± 0,001	0,061 ± 0,003	0,018 ± 0,001
Fe [g/kg]	0,026 ± 0,009	0,044 ± 0,005	0,125 ± 0,118	0,049 ± 0,021	0,069 ± 0,017
Ni [g/kg]	0,016 ± 0,002	0,006 ± 0,001	0,006 ± 0,002	0,008 ± 0,002	0,006 ± 0,001
P [g/kg]	0,157 ± 0,042	0,155 ± 0,048	0,294 ± 0,069	0,155 ± 0,091	0,204 ± 0,031
Pb [g/kg]	0,004 ± 0,004	0,006 ± 0,006	0,007 ± 0,004	0,008 ± 0,007	0,004 ± 0,004
Zn [g/kg]	0,031 ± 0,018	0,011 ± 0,001	0,041 ± 0,016	0,020 ± 0,006	0,012 ± 0,003

Tabel 4.3-3: ICP-resultater for leachingprøve.

Ovenstående resultater er blevet sammenholdt med miljøstyrelsens grænseværdier for indhold af stoffer se Tabel 2.4-4, og alle lå i kategori 1, hvilket er bedst.

	AUK	AH ₂ SO ₄ K	LUK 2012	LH ₂ SO ₄ K 2012
Al [g/kg]	28%	16%	37%	10%
Cd [g/kg]	100%	0%	0%	0%
Cr [g/kg]	28%	-24%	35%	-60%
Cu [g/kg]	-28%	-78%	37%	-115%
Fe [g/kg]	41%	79%	47%	62%
Ni [g/kg]	-154%	-154%	-99%	-176%
P [g/kg]	-1%	47%	-1%	23%
Pb [g/kg]	37%	41%	53%	10%
Zn [g/kg]	-184%	23%	-59%	-151%

Tabel 4.3-4: Procentvise stigning i forhold til REF.

4.4 I praksis

I det følgende afsnit diskuteres forskellige faktorer der spiller ind i forhold til anvendelsen af slamaske i beton i praksis.

4.4.1 Styrkemæssigt

Beton indeholdende slamaske, har en lavere styrke end beton uden aske, hvilket også ses af resultaterne i afsnit 4.3.2.1.

Ofte benyttes beton af en sådan styrke, at den fulde styrke ikke udnyttes, hvilket er unødvendigt. Beton har en lav trækstyrke, og derfor bruges der ofte armering i betonkonstruktioner. Over og under armering skal der være dæklag. Denne betontykkelse, vil ofte være så stor, at betonen ville overholde normerne ved brug af beton med en lavere trykstyrke.

Beton med aske vil have en så høj styrke, at de styrkemæssigt sagtens vil kunne benyttes, selvom denne er lavere end ved traditionel beton. Dette vil endda ofte kunne lade sig gøre, uden at dimensionere byggeriet anderledes, altså uden at tilføje yderligere armering, eller gøre betonen tykkere.

4.4.1.1 Eksempel

I det følgende vises et uddrag af et eksempel, hvor der er beregnet beton og armering til et altandæk. Det vises, at beton med slamaske kunne være benyttet i det tilfælde.

En altan dimensioneres på følgende måde:

Der benyttes armering i midten af betonen, og dæklaget skal minimum være 35 mm, hvilket er kravet til dæklag i aggressiv miljøklasse.

Ifølge normerne regnes med en nyttelast på altanen på

$$q_k = 2,5 \frac{kN}{m^2}$$

Altanen har en tykkelse på 100 mm, og egenlasten findes til $2,4 \frac{kN}{m^2}$

Den samlede last findes derved til $6,15 \frac{kN}{m^2}$

For aggressiv miljøklasse er minimumskravet til betonen at denne, minimum skal have en karakteristisk styrke på 35 MPa.

Momentet findes til $M = 6,29 kNm$

Ved brug af følgende formler findes arealet af stålet, sådan at altandækkets styrke kan holde til momentet:

$$\omega = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$$

$$A_s = \omega \cdot \frac{b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

Det fås at, altandækket holder til momentet hvis der ilægges armeringsnet på Ø10 pr 140 mm.

I dette uddrag af beregningen eftervises kun momentbæreevnen, da det oftest er denne der er dimensionsgivende. Resten af beregningen er vedlagt som Bilag 4.4.1.

4.4.1.2 Beton med slamaske

I eksempelet fra det forrige afsnit benyttes en beton med en trykstyrke på 35 MPa, til en altan. Altaner dimensioneres efter aggressiv miljøklasse, Aggressiv miljøklasse er den mest belastede miljøklasse, og også den der er højest krav til i form af fx betonstyrke og dæklag.

I eksempelet bruges en beton med en styrke på 35 MPa. Flere af mørtelprøverne, som er trykprøvet i dette projekt, har en styrke på 35 MPa eller over. Der ville derfor kunne benyttes AUK, AH₂SO₄K eller LH₂SO₄K. Mørtelprøverne indeholdende disse asker havde generelt styrker på 35 MPa eller højere, efter 28 dage.

Testemne	R _{c,gen} [MPa]	R _{c,min} [MPa]	R _{c,max} [MPa]
AUK 28 døgnet	37,9	29,0	43,5
AUK 35 døgnet	41,7	38,5	46,3
AUK 42 døgnet	38,3	33,2	42,0
AH ₂ SO ₄ K 28 døgnet	35,5	30,5	42,5
AH ₂ SO ₄ K 35 døgnet	38,5	30,2	47,0
AH ₂ SO ₄ K 42 døgnet	39,5	34,5	44,6
LH ₂ SO ₄ K 28 døgnet	37,8	33,2	42,0
LH ₂ SO ₄ K 35 døgnet	33,7	26,3	38,0
LH ₂ SO ₄ K 42 døgnet	38,7	36,6	43,5

Tabel 4.4-1: Trykstyrken for AUK, AH₂SO₄K og LH₂SO₄K efter 28 døgnet, 35 døgnet og 42 døgnet.

Af Tabel 4.4-1 ses de opnåede trykstyrker efter 28, 35 og 42 dage. Det ses at trykstyrkerne generelt ligger over 35 MPa, dog er de mindst opnåede trykstyrke på 29 MPa for AUK 28 døgnet.

Derfor ville disse betontyper kunne bruges i eksemplet.

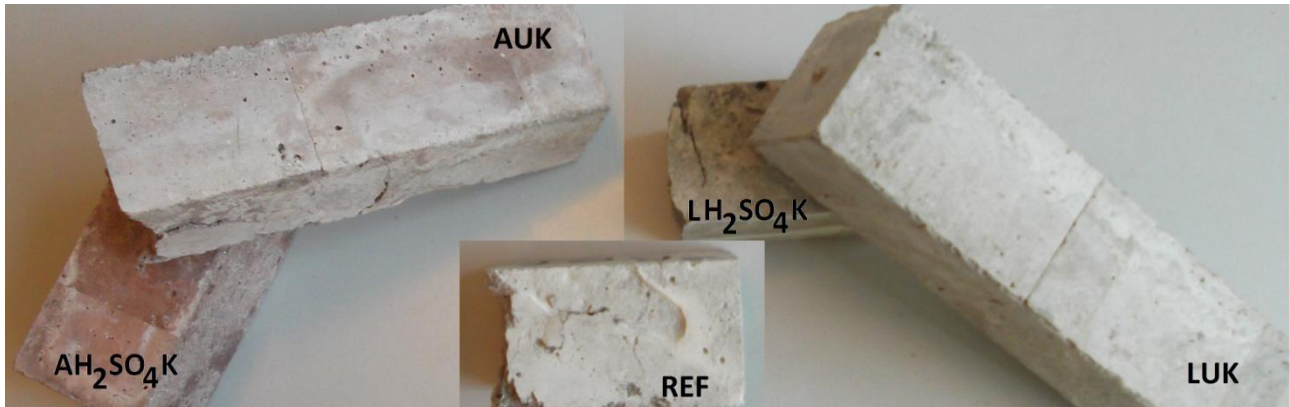
4.4.2 Glødetabets betydning for den hærdnede beton

Det ses af Tabel 4.1-1, at de ubehandlede asker opfylder kravene til glødetabet, da glødetabet for begge asker ligger under 5 %. De syrevaskede asker LH₂SO₄K, LHNO₃K og AH₂SO₄K overskrider dette krav, hvilket ses af Tabel 4.2-1 for LA og Tabel 4.2-3 AA. Glødetabet er et udtryk for hvor stor en del af en aske, som er organisk materiale, da dette vil forbrænde ved høj temperatur. Det organiske materiale forbrændes også igennem rensningsprocessen, og glødetabet er derfor også et udtryk for, om forbrændingen fungerer optimalt på forbrændingsanlægget. Da de ubehandlede asker overholder kravet på de 5 %. Virker forbrændningen på forbrændingsanlæggene altså optimalt, der er ikke for meget organisk materiale i askerne. Grunden til det høje glødetab kan skyldes, at mængden af aske ved syrevaskning er faldet, da noget er opløst, og derfor er den procentvise del af det organiske materiale steget. Det kan også skyldes forbindelser der bliver dannet ved syrevaskningen, ex vides det, at der dannes gipsminerale i asken ved

syrevaskning med H_2SO_4 . Gipsmineraleerne indeholder vand, og dette vil så fordampe ved glødetabsforsøget, og glødetabet bliver derfor højere.

4.4.3 Farve

Ved anvendelse af AA i beton, vil betonen få en rødlig farve. Dette kan være problematisk af flere årsager, fx vil det være besværligt at benytte andre betoner til samme byggeri, da der så vil være en farveforskel.



Figur 4.4-1: Farveforskel på de forskellige mørtelprøver.

I Figur 4.4-1 ses farverne på mørtelprøverne.

For at anvende askerne ville betonværkerne være nødsaget til at lave en silo til opbevaring af asken. Derudover vil det være strengt nødvendigt at vaske biler samt betonblanderen godt igennem ved skift til traditionel beton, da den røde farve vil forekomme i den nye blanding hvis dette ikke gøres.

Spørgsmålet ville så være, om der kunne fremstilles og sælges nok af denne type beton til, at det ville kunne betale sig. I stedet for AA kunne der benyttes LA i betonen, for at undgå den rødlig farve. Problemet med LA, er at der ikke produceres nok fra dette værk, samt det ligger længere væk fra Unicon, som producerer beton. Det ville derfor være dyrere i transport, og der ville ikke kunne produceres ligeså meget.

4.4.4 Knusning af aske

Af ovenstående resultater ses det at beton indeholdende knuste aske, er stærkere end beton med ikke-knuste aske.

Askerne knuses i dette projekt i en ringknuser, hvor der ca. kan knuses 100 g. aske ad gangen. Hvis der skulle knuses store mængder aske, ville det være nødvendigt at finde en anden metode til knusningen, da 100 g ad gangen ville være alt for lidt til en masseproduktion.

Ændringen af styrken efter knusningen er så stor, at det helt klart må anbefales at asken knuses, inden denne tilsættes til betonen.

4.4.5 Økonomi

Før en virksomhed som eksempelvis Unicon vil benytte slamaske i deres beton, skal de have økonomisk incitament til dette.

Som situationen er nu betaler rensningsanlæggende store summer penge for at slippe af med asken. Dette er både transport og deponeringsafgift. Denne deponeringsafgift samt transportudgifterne ville kunne minimeres, hvis de kunne sende asken til fx Unicon. Det økonomiske incitament for Unicon ville være en form af miljøtillæg, for hvert ton slamaske de kunne anvende i betonen. Derudover ville de kunne erstatte en del af cementen med asken, og cement er dyrt.

Dette miljøtillæg skulle komme fra regeringens side, da de har interesse i at genindvende fosforen, samt asken deponeres miljømæssigt korrekt.

Herved ville rensningsanlæggenes eneste udgift ved dette være syrevaskning af asken samt transport til betonfabrikkerne.

4.4.6 Deponering af asken

I dag deponeres asken på den måde at den transporteres til fx Norge eller Tyskland, og deponeres i eksempelvis gamle saltminer. Disse miner vil på et tidspunkt være fyldte, og i det hele taget er denne måde ikke særlig optimal for miljøet.

Asken er sammensat af mange ting, og kun en lille del af den er tungmetaller, som er farlige. Ved at deponere asken som den er, som giftigt affald, fylder den utroligt meget, hvilket er unødvendigt. Ved syrevaskning kunne der udskilles tungmetaller og eventuelt andre giftige ting fra. Herved ville det reelle giftige affald ikke fylde så meget, og de ville kunne deponeres forsvarligt i lukkede containere.

Resten af asken, den ufarlige del, ville kunne spredes over marker.

4.4.7 Slammaske i beton mht. miljø

Metoden til at skille sig af med slamasken i dag, er langt fra optimal. For det første smides en alternativ fosforressource ud. Derudover vil depoterne på et eller andet tidspunkt være opfyldt.

Der mangler metoder til hvordan denne aske kan afskaffes, og at anvende den i betonproduktionen ville være en rigtig god idé. Uanset om asken skal genanvendes i beton, eller deponeres, bliver det i nær fremtid nødvendigt, at vaske fosforen ud af den inden den deponeres.

5. Konklusion

Syrevaskning med H_2SO_4 og HNO_3 er blevet udført på hhv. LA og AA med henblik på anvendelse i beton som en erstatning af cement. Der blev i alt trykprøvet 132 mørtelprøver 2 gange pr. stk.. Udover trykprøveforsøgene blev der også foretaget undersøgelser af askerne ubehandlet og syrevasket, og en leachingtest af mørtelprøverne blev også foretaget.

Ved syrevaskningen kunne der fjernes mellem 38 % og 46 % af fosforen i asken. Dog ses den højeste procent hos AA med H_2SO_4 . Udover fosforen blev der også udvasket Cd og Cu fra begge asker med begge syrer. Generelt set bliver der udvasket mest ved at anvende H_2SO_4 på AA.

Trykstyrken for de forskellige mørtelprøver indeholdende aske kunne optimeres ved forskellige tiltag. Dette var fx ved knusning af asken, hvor der sås en markant forbedring af trykstyrken efter 7 døgn. I gennemsnit blev trykstyrken forbedret med 5,75 MPa svarende til en forbedring på 21 %. Derfor bør asken knuses inden den anvendes i betonen.

Derudover sås også en positiv effekt for trykstyrken af mørtelprøverne indeholdende LA ved syrevaskning med H_2SO_4 , hvorimod syrevask med HNO_3 ikke havde en særlig stor virkning. Forskellen på LA om den var syrevasket eller ej lå på 6 MPa efter 7 døgn, altså der skete en stigning 19 % ved anvendelse af syrevasket aske. Ved syrevaskning af AA var der ingen forskel på, hvilken syre der blev anvendt. Begge mørtelprøver fik en trykstyrke efter 7 døgn på 22 MPa.

De opnåede trykstyrker efter 28 døgn, levede ikke op til kravet fra DS/EN 196-1 om opnåelse af 85 % af trykstyrken i forhold til REF. Både AUK og LH_2SO_4K kom op på 71 % af trykstyrken. LUK lå på 62 % og AH_2SO_4K på 67 % af styrken.

Ud fra det enkelte hærdeforsøg der er foretaget, kan der ikke umiddelbart ikke konkluderes noget. Det tyder på, at asken har en retarderende effekt på hærdningen, dog bør dette undersøges nærmere.

Syrevaskning bør foretages af asken, da dette har en rigtig positiv effekt på udsivningen, og er nødvendigt i forhold til genindvinding af fosforen. Fra leaching resultaterne blev det gjort klart, at udsivningen af tungmetaller blev reduceret, og udsivningen af fosfor blev øget.

På baggrund af de foretagne forsøg er konklusionen, at ved anvendelse af slamaske i betonen bør en syrevaskning være foretaget inden, da dette muliggør genindvinding af fosforen. Den mest optimale løsning for miljø og betonproducenten ville være LH_2SO_4K . Denne mørteltype ligger farvemæssigt tættest på betons farve. LH_2SO_4K opnåede 71 % af trykstyrken efter 28 døgn i forhold til referencen, hvilket ligger relativt tæt på de krævede 85 %. Derudover er udsivningen af fosfor større og mængden af udsivede giftige metaller mindre. Afslutningsvist er H_2SO_4 også den billigste syre.

Selvom denne mørteltype ikke lever op til kravet på opnåelse af 85 % af trykstyrken efter 28 døgn. Vurderes det, at denne godt kan anvendes alligevel, da trykstyrken stadig er så høj at den kan anvendes steder hvor kravet til trykstyrken ikke er højere end 35 MPa. Grundet de miljømæssige aspekter bør aske i beton anvendes.

Et andet alternativ er, at anvende asken som erstatning for sandet i betonen. Dette bør under alle omstændigheder undersøges nærmere.

6. Videre forskning

I og med dette projekt kun var et bachelorprojekt på 20 ECTS, var der desværre ikke tid til at undersøge alt om dette spændende emne, dog er der nedenfor oplistet en række ideer til videre forskning med slamaske.

Chloridindholdet i askerne

Da chlorid (Cl) har en stor betydning i forhold til en øget risiko for korrosion i armeringen i betonen, bør indholdet af Cl i asken undersøges, da denne ikke må overstige 0,1 % ved anvendelse i betonen.

Armering

I forbindelse med undersøgelse af chloridindholdet ville det være relevant, at undersøge om tilsættelse af slamaske har en påvirkning på armeringen.

Hærdning

En nærmere undersøgelse af hærdetiden for mørtel tilsat aske i forhold til en referencemørtel. Herunder kunne det være interessant, at undersøge om det er fosforen der har en retarderende effekt som noget forskning antyder, eller om der er andet der kan medvirke til at hærdetiden er langsommere.

Vandbehov

Askens vandbehov i forhold til cementen har vist sig at være anderledes. Så for at mørtlen havde nogenlunde samme konsistens som REF-prøven, blev der tilsat ekstra vand. Dette ville være relevant at undersøge, da askens porøsitet muligvis har noget med dette at gøre. Der er ikke opstillet normer for vandbehovet i askeindholdige betoner. Det kunne være interessant at finde en sammenhæng, og opstille en formel til beregning af vandindholdet, således at der er et fuldt kendskab til dette.

Luftindhold

Der er i dette projekt slet ikke set på luftindholdet i mørtelprøverne, men det ville være spændende, at se om asken havde en påvirkning på det naturlige luftindhold. Grundet askens porøsitet kunne luftindholdet tænkes at stige.

Som tilslagsmateriale

Det ses at styrken blev lavere ved tilsætning af slamaske i mørtel, hvor asken erstatter en del af cementen. Det kunne være interessant, at se på hvad der ville ske med styrken, hvis der i stedet erstattedes en del af sandet med asken.

Trykstyrken efter 90 døgn

Det ville være interessant, at se på, om askerne lever op til kravet fra DS/EN 196-1, om at 95 % af trykstyrken er opnået efter 90 døgn.

Syrekoncentrationer

For at fjerne fosfor og tungmetaller fra asken blev der syrevasket med 0,5 M H_2SO_4 , 0,75 M H_2SO_4 , 1 M HNO_3 og 1,5 M HNO_3 . Til videre forskning kunne det undersøges, hvilken betydning koncentrationen af syren har på fosfor- og tungmetalindholdet.

Andre slamasker

I dette projekt er der brugt asker fra Lundtofteværket og Avedøreværket. Det kunne være interessant også at lave forsøg med slamasker fra andre rensningsanlægge i Danmark.

Glødetab

I projektet kom det frem, at glødetabet for LHNO_3 , LH_2SO_4 og AH_2SO_4 oversteg de 5 %. Dette bør undersøges med henblik på hvorfor glødetabet stiger, og om det kan anvendes i betonen alligevel. Da det ikke er et problem i de ubehandlede asker, kan det tænkes, at det høje glødetab ikke skyldes for højt indhold af organisk materiale.

7. Litteraturliste

Forfatter	Udgivelsesår	Titel	Type	Udgiver
Aalborgportland	2010	Cement og beton	Bog	Aalborgportland
Andersen, J.	2001	Grøn beton på vej	Artikel	Ingeniøren
Aune, J., Lisbeth M. Ottosen, L. M., Pedersen, A. J. & Simonsen, P.	2006	Elektrokemisk fjernelse af Cd fra bioasker i pilotskala og vurdering af mulighederne for nyttiggørelse af behandlet aske i beton	Rapport	DTU-BYG
Biocrete	2007	Anvendelse af aske fra forbrænding af spildevandsslam (bioaske) i betonproduktionen	Rapport	Biocrete
Dam-Johansen, K., K. V., Jensen, Pedersen, A. & Sander, B.	2005	Flyveaske til betonproduktion – påvirkning af luftindblanding	Artikel	Dansk kemi, 86, nr. 9, 2005, Procesteknik
Donatello, S., Freeman-Pask, A., Tyrer, M. & Cheeseman, C. R.	2008	Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash.	Artikel	Cement & Concrete Composites 32 (2010) 54–61, Elsevier
Geiker, M.	2010 (A)	Betonprøvning_2010-Januar	Undervisningsmateriale	
Geiker, M.	2010 (B)	Betonstøbning_2010-januar	Undervisningsmateriale	
Geiker, M. R., Jensen, P. E. & Kirkelund, G. M.	2010	Feasibility test of electro-diallytically upgraded MSWI APC residue utilization in mortar	Artikel	3 rd International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, May 17-19, 2010 – Beijing, China
Geiker, M. & Ottosen, L. M.	2009	Hærdnet betons egenskaber	Undervisningsmateriale	
Goltermann, P.	2010	Betonens historie	Undervisningsmateriale	
Gottfredsen, F. R. & Nielsen, A.	1997	Bygningsmaterialer – Grundlæggende egenskaber	Bog	Polyteknisk Forlag
Gyldendal	2012	Tungmetaller	Leksikonartikel	Gyldendal

Forfatter	Udgivelsesår	Titel	Type	Udgiver
Hansen, K. K.	2008	Bygningsingeniørernes materialer – uddrag af materialebogen	Bog	Nyt Teknisk Forlag
Hansen, K. K.	2010	Beton 1	Undervisningsmateriale	
Hansen, K. K. & Rohde V. W.	2000	Chemical Shrinkage In Cement and Sludge ash Systems	Artikel	Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark
Hasholdt, M. T. & Mathiesen, D.	2002	Beton med slamaske	Rapport	Teknologisk Institut
Heijden, G. H. A. V. D.	2011	NMR imaging of moisture inside heated porous building materials	Bog	Eindhoven University of Technology
Herholt, A. D., Justesen, C. F. P., Nepper-Christensen, P. & Nielsen, A.	1985	Beton-Bogen	Bog	Aalborg Portland
Jensen, P. E., Kinkelund G. M. & Ottosen, L. M.	2012	Udvikling af ny teknik til fosfor-indvinding fra aske fra forbrænding af spildevandsslam	Rapport	Miljøstyrelsen
Kjersgaard, D.	2007	The reuse of bio-ash for the production of concrete	Power point	Spildevandscenter avedøre
KM	2004	Spildevandsrensning uden spild	Artikel	Dansk kemi, 85, nr. 5, 2004, DanMiljø
Kreutzer, M.	2009	Fosfor	Artikel	Netdoktor
Kristensen, E.	2012	Fosfor – mangel og ressource	Artikel	Økologi og erhverv
Miljøstyrelsen	2010	BEK 1480 – Bekendtgørelse om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om genanvendelse af sorteret, uforurenet bygge- og	Bekendtgørelse	Miljøstyrelsen

Nyvold, M.	2008	anlægsaffald. Overset fosfor-mangel truer fremtidens fødevare-produktion	Artikel	Ingeniøren
------------	------	---	---------	------------

Oplukning af jordprøve efter DS 259

A **Princip**

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

B **Specielt apparatur**

Til målingen benyttes et atomabsorptionsspektrofotometer (AAS).

C **Kemikalie sikkerhed**

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

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

Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D **Reagenser**

1) Salpetersyre halvkonc, (1:1) HNO₃:

500 mL koncentreret HNO₃ overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er ½ fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

E **Analysens udførelse**

1,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i et pyrex-glas med skruelåg (autoklaveglas) og der tilsættes 20,00 mL halvkoncentreret HNO₃ med fuld pipette (skal foregå i stinkskab).

Autoklavflaskerne lukkes helt til, da HNO₃ ellers vil fordampe. Flaskerne stilles i autoklaven ved 200 kPa (120°C) i 30 minutter. Flaskerne afkøles derefter til stuetemperatur.

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

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

F Bestemmelse af metaller

Ekstraktens indhold af metaller måles ved AAS under benyttelse af de standarder som hører til de enkelte metaller.

G Beregning af resultat

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

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

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm

B = g jord afvejet

C = fortyndingsfaktor

H Affaldshåndtering

Salpetersyre hældes i affaldsdunke mærket X 4.18.

Ekstrakerne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskabet.

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

pH i 1 M KCl opslemning. Jord-væske forhold 1:2,5

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes kombinationsselektrode i forbindelse med et pH-meter, der tillader en nøjagtighed på 0,05 pH-enheder.

C Kemikalie sikkerhed

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

Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

1) **Kaliumchlorid 1 M KCl:**

74,56 g KCl afvejes på teknisk vægt og opløses i destilleret vand i en 1000,00 mL målekolbe.

2) **Bufferopløsning, pH 4,01:**

Radiometer pH 4.

3) **Bufferopløsning, pH 7,00:**

Radiometer pH 7.

E Analysens udførelse

1) **Fremstilling af jordopslemningen**

5,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i en 20 mL plastvials. Der tilsættes 12,5 mL 1 M KCl-opløsning med pipette. Opslemningen stilles på rystebord i 1 time, hvorefter jorden bundfældes i 5-10 minutter, indtil en væskefase har udskilt sig over jorden.

2) Målingens udførelse

Elektroden anbringes i den øvre kolloidfattige del af opslemningen således at diafragmaet er under væskeoverfladen (under måling skal gummiproppen være aftaget). Undgå at elektroden ikke rammer jorden. Forud for hver måling skylles elektroden grundigt med destilleret vand, hvorefter en evt. dråbe aftørres forsigtigt med et stykke papir.

F Beregning af resultat

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

G Affaldshåndtering

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

Plastvial med jorden/KCl skal opsamles i beholder til jordaffald.

Måling af 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 lede partikler, der er til stede i væsken.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ledningsevnomåler.

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. Plastikflaskerne stilles ca. ½ time på rysteapparat, hvorefter jorden bundfældes i ca. 20 minutter, indtil en væskefase har udskilt sig over jorden.

Ledningsevneelektroden skylles med destilleret vand. Sæt elektroden ned i væske og der trykkes på "**SAMPLE**". Når displayet viser "STAB" tryk på "**PRINT**" og aflæs resultatet.

D Beregning af resultat

På baggrund af ledningsevnomålingen beregnes jordens ionindhold i jordvæsken.

Det samlede ionindhold i jordvæsken:

$$S_{v\ddot{a}ske}(\text{m\ddot{a}kv./L}) = \frac{10 \text{ cm} * \text{m\ddot{a}kv.} * \text{ledningsevnen}(\text{mS/cm})}{L * \text{mS}}$$

Det samlede ionindhold i jordvæsken kan omregnes til et samlet ionindhold af ioner pr.

$$S_{jord} = \frac{S_{v\ddot{a}ske} * V_{vandtilsat}}{M_{jord}}$$

E **Affaldshåndtering**

Ekstrakerne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Glødetab i jord

A Princip

Jordens indhold af organisk materiale svarer stort set til det opnåede glødetab ved 550°C. I en tungmetalforurennet 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 (1time hvis ovnen er kold). Diglerne afkøles i eksikkator 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 eksikkator og vejes på analyse vægt.

D Beregning af resultat

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

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

E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Syrevask, fjernelse af fosfor samt tungmetaller i slamaske.

Formål

Formålet med dette forsøg er at fjerne fosforen samt tungmetallerne fra slamasken. Dette skyldes at fosfor er ved at blive en knap ressource og ved udvask af dette kan det genanvendes. Udover det fjernes tungmetaller for at undgå forurening ved udsivning.

Teori

Slamaske indeholder fosfor som man gerne vil have frigivet fra asken sådan at den kan anvendes til andre formål. Syren opløser asken sådan at fosfor og tungmetaller kommer på ion-form, og derfor bliver en del af væsken som kan filtreres fra asken.

I rensningsprocessen på anlægget fælles fosfor fra spildevandet enten med jern eller med aluminium. Slamasken kommer derved til at indeholde en af disse efter hvilket middel der er brugt til fældning. Ved begge dele er der ulemper. Behandles asken med jern vil den have en rødlig farve og derfor gøre betonen rødlig, hvilket der ikke er interesse i da man ofte bruger forskellige betoner til at bygge noget, og der så vil være farveforskel på betonerne.

Ved brug af aluminium i stedet for jern vil det være mere besværligt at fjerne fosforen fra asken, og der skal så bruges mere syre som vil gøre processen dyrere og mere besværlig.

I dette forsøg bruges en aske hvori fosforen er fældet med jern, som i det følgende vil omtales Avedøre aske, og en aske hvori fosforen er fældet med aluminium, som i det følgende vil omtales Lundtofte aske.

Materialer

Selve prøverne:

8 prøver a 150 g Lundtofte aske

8 prøver a 150 g Avedøre aske

4 x 750 ml. 1,5 M HNO₃ (salpetersyre)

4 x 750 ml. 1,0 M HNO₃ (salpetersyre)

4 x 750 ml. 0,5 M H₂SO₄ (svovlsyre)

4 x 750 ml. 0,75 M H₂SO₄ (svovlsyre)

Redskaber:

8 plastik flasker a 1 l.

5 tragte (gerne 8)

5 store målebægerglas (gerne 8)

Papirfiltre

8 petriskåle

Vægt til afvejning

Sikkerhedsredskaber:

Stinkskab

Sikkerhedsbriller

Plastichandsker

Kitler

Støvmaske

Fremgangsmåde

150 g. aske afvejes i en plastikflaske.

750 mL syre tilsættes. Ved Avedøre aske tilsættes enten 1,0 M HNO_3 eller 0,5 M H_2SO_4 . Ved Lundtofte aske tilsættes enten 1,5 M HNO_3 eller 0,5 M H_2SO_4 .

Flasken rystes og piftes.

Syreblandingen skal stå i 2 timer.

Flaskens indhold (på nær bundfaldet) filtreres i en glastragt. (Der kan evt. tages en prøve af syren.)

Når syren er løbet igennem filtret. Skylles filtret med destilleret vand og væsken hældes ned i flasken igen. Flasken fyldes nu med destilleret vand og rystes. Dette skal stå til den er bundfældet igen.

Flaskens indhold (på nær bundfaldet) filtreres. Filtret skylles med destilleret vand og væsken hældes ned i flasken igen. Flasken fyldes nu med destilleret vand og rystes. Hele flaskens indhold filtreres denne gang.

Når prøven synes tør stilles den i en petriskål i en ovn på 55°C. Prøverne er helt tørre efter ca. en uge.

Leaching af tungmetaller fra aske

Princip:

Lovgivningen inddeler farligt affald i kategorier efter hvor meget det indeholder af giftige stoffer og hvor mobile de giftige stoffer er. I aske fra affaldsforbrænding er tungmetaller nogle af de vigtigste giftige stoffer. Grunden til at asken betegnes som farligt affald er, at tungmetallerne er meget mobile, dvs. de vaskes ud når asken kommer i kontakt med vand, og vil derved forurene det omgivende miljø. Mobiliteten skal ifølge dansk lovgivning (restproduktbekendtgørelsen nr. 1480 af 12/12/2007) bestemmes ved hjælp af batchleachtest ved L/S 2. Det er denne test, der udføres her.

Apparater:

- 250 mL syreskyllet plastflasker med låg
- Måleglas syreskyllet
- Teknisk vægt
- Rystebord
- Vacumpumpe
- Sugokolbe
- Magnetisk filter
- Filterpapir 0,45µm
- Vials

Reagenser:

- Konc. HNO₃ suprapur
- Ionbyttet vand

Sikkerhed:

Husk værnemidler, hvis der er tungmetaller i materialet der arbejdes med.

Fremgangsmåde:

Afvej 40,0g aske (tørret ved 40 °C) på analysevægt til 250mL syreskyllede plastflaske. Der skal laves 3 dobbelt bestemmelse.

Der tilsæt forsigtigt 80,00mL ionbyttet vand med fuld pipette til plastflasken og sæt låg på. Prøverne sættes på rystebord i 24 timer.

Prøven tages af og sedimenteres i 15 min. Herefter der måles pH på alle prøverne inden filtrering (se vejledning til pH måling).

Prøverne filtreres igennem et 0,45µm filter. Væsken hældes over i 2 vials. Noter på prøven om den skal bruges til IC eller ICP.

Konservering:

Prøver som skal bruges til måling på ICP skal konserveres. Husk handsker, briller og brug stinkskab. Prøverne konserveres med 0,1mL konc. HNO₃ suprapur til 10mL prøve.

Prøverne gemmes til senere måling af tungmetaller på ICP/AAS

Beregning af resultater:


Resultater fra IC/ICP er i mg/L. Der skal ikke foretages beregning af resultater da værdierne holdes op mod tabelværdier i mg/L fra Restproduktbekendgørelsen


BEK 1480 af 12.12.2007

Affaldshåndtering:

- Prøver som indeholder tungmetaller skal smides i dunk mærket forurenede med tungmetaller.
- HNO₃ skal opsamles og hældes i dunk mærket syre.

Vicat

ETTPUNKTSLEKSJON		EPL nr.	
Linje/område: FoU Mørtel	Maskin: Vicat	Laget av gruppe-medlem	EPL/HMS godkjent av linjeleder
Tema: VICAT apparat nr.5 (gammel)		Dato:	Dato:
		Sign.:	Sign.:
<u>Bruksanvisning for VICAT apparat nr.5</u>			
<p><u>Følgende parametere må oppgis for hver ny prøve:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Referanse standard (= EN 196) • Unikt prøve-ID • Manuell mode • Styrt nedslipp (= driven drop) • Vente til testen skal starte (= delay time) • Tid for første nedslipp • Tid for annet nedslipp • Lagrings-modus (= manuell) 			
<u>Start av test:</u>			
<ul style="list-style-type: none"> • Alle valg bekreftes med og trykke [Enter]. • Piletastene brukes til å kjøre opp og ned. • Ved å trykke [STOP] går man et trinn tilbake 			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Gå på «Test Settings» i hovedmenyen 2. Velg «Test Standard» → «EN 196» [Enter] 3. Velg «Dropping rate» → «Manuel Mode» [Enter] 4. Velg «Dropping Mode» → «Driven Drop» [Enter] 5. Velg «Test Data» [Enter] 6. Oppgi unik «Test». Det enkleste er å trykke [↑] for å få et unik ID for testen. 7. Trykk [Enter] gjennom resten av menyen. 8. Trykk [Enter] etter «Drop 01» og «Drop 02» 9. Trykk [STOP] 10. Trykk [Enter] 11. Velg «Data Storage» på menyen. [Enter] 12. Trykk [Enter] 13. Gå tilbake til Hovedmenyen trykk [STOP] 2 gange 14. Velg «Test Execution» [Enter] 15. Trykk [Enter] og er i gang 			

ETTPUNKTSLEKSJON		EPL nr.	
Linje/område: FoU Mørtel	Maskin: Vicat	Laget av gruppe medlem	EPL/HMS godkjent av linjeleder
Tema: Prosedyre når VICAT'ene har nullstilt sig		Dato:	Dato:
		Sign.:	Sign.:

Det skjer at VICAT apparatene nullstiller sig. Dette skjer av ulike grunner.
Bla. dårlig hukommelsesbatteri eller lengere varende strømbrudd.
Når VICAT'ene er nullstilt, er språket tilbakestilt til italiensk og Advanced oppsett.
Språk skal være engelsk og Simplified oppsett.


Prosedyre STEP by STEP:

1. Slå VICAT på bak. (menyen er nu på italiensk).
2. Bruk piletastene til å trykke ned på «Opzioni General» (5 trykk ned).
3. Trykk [Enter].
4. Markert er nu «Lingua».
5. Trykk [Enter]
6. Velg «Inglese» (1 trykk ned).
7. Trykk [Enter].
8. Nu er språket endret til engelsk.
9. Trykk ned på «Mode» (6 trykk ned).
10. Trykk [Enter].
11. Velg «Simplified» (1 trykk ned).
12. Trykk [Enter].
13. Trykk [STOP] 2 gange.
14. Du er nu tilbake i hovedmenyen.

Hovedmeny på italiensk

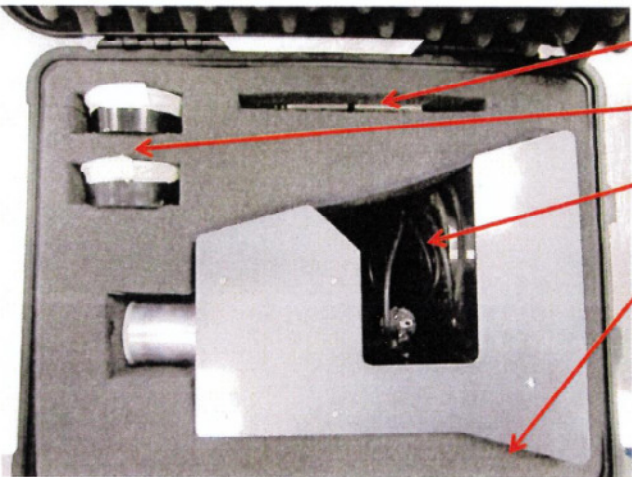
Hovedmeny på engelsk

For ytterligere informasjon om utstyret: Se Bruksveiledningen for VICAT

ETTPUNKTSLEKSJON		EPL nr.	
Linje/område: FoU	Maskin: Vicat apparat	Laget av gruppe-medlem	EPL/HMS godkjent av linjeleder
Tema: Pakking av PELICASE til transport av Vicat apparater		Dato: 21.06.2011	Dato:
		Sign.: SBJ	Sign.:

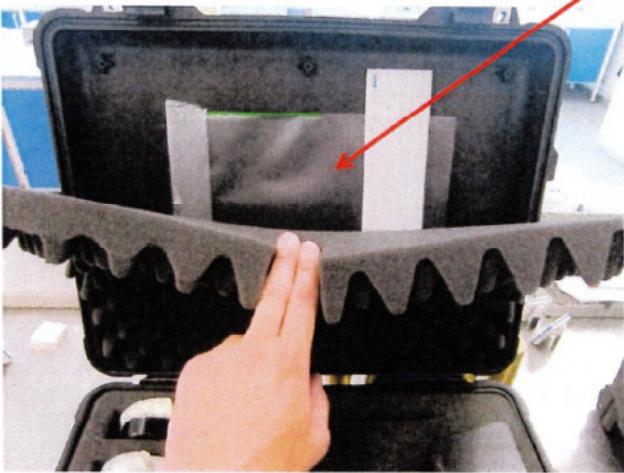
Pakking av Vicat apparat i PELICASE som vist på bildene. Ved avvik fra dette kontakt FoU avd.

Plassering av utstyr



- Lodd og pen
- 2 stk. prøvekopper
- Strømledning
- Strømbryter på baksiden av apparat

Plassert bak foam i lodd



- Registeringspapir
- Brukerveiledning
- Annen relevant info
- Ettpunktsleksjon

Rådata fra pH og ledningsevneforsøg

Værk	Syre	nr.	Forsøgsdato	pH-værdi	Ledningsevne
Lundtofte 2009	Uvasket	a		10,005 pH	54,2 mS/cm
Lundtofte 2009	Uvasket	b		10 pH	54,5 mS/cm
Lundtofte 2009	Uvasket	c		10,07 pH	53,6 mS/cm
Lundtofte 2009	Uvasket	middel		10,025 pH	54,1 mS/cm
Lundtofte	HNO ₃	a	16-02-2012	4,2 pH	3,697 mS/cm
Lundtofte	HNO ₃	b	16-02-2012	4,16 pH	3,729 mS/cm
Lundtofte	HNO ₃	c	16-02-2012	4,25 pH	3,298 mS/cm
Lundtofte	HNO ₃	middel		4,20 pH	3,575 mS/cm
Lundtofte	H ₂ SO ₄	a	16-02-2012	4,83 pH	4,14 mS/cm
Lundtofte	H ₂ SO ₄	b	16-02-2012	4,82 pH	4,21 mS/cm
Lundtofte	H ₂ SO ₄	c	16-02-2012	4,66 pH	3,834 mS/cm
Lundtofte	H ₂ SO ₄	middel		4,77 pH	4,0613 mS/cm
Lundtofte 2012	Uvasket	a	21-05-2012	10,03 pH	25,58 mS/cm
Lundtofte 2012	Uvasket	b	21-05-2012	10,03 pH	26,8 mS/cm
Lundtofte 2012	Uvasket	c	21-05-2012	10,04 pH	26,08 mS/cm
Lundtofte 2012	Uvasket	middel		10,03 pH	26,153 mS/cm
Avedøre	Uvasket	a		10,36 pH	2,121 mS/cm
Avedøre	Uvasket	b		10,36 pH	2,099 mS/cm
Avedøre	Uvasket	c		10,39 pH	2,147 mS/cm
Avedøre	Uvasket	middel		10,37 pH	2,122 mS/cm
Avedøre	HNO ₃	a	16-02-2012	4,63 pH	2,79 mS/cm
Avedøre	HNO ₃	b	16-02-2012	4,64 pH	2,724 mS/cm
Avedøre	HNO ₃	c	16-02-2012	4,68 pH	2,715 mS/cm
Avedøre	HNO ₃	middel		4,65 pH	2,743 mS/cm
Avedøre	H ₂ SO ₄	a	16-02-2012	4,72 pH	2,361 mS/cm
Avedøre	H ₂ SO ₄	b	16-02-2012	4,73 pH	2,318 mS/cm
Avedøre	H ₂ SO ₄	c	16-02-2012	4,71 pH	2,379 mS/cm
Avedøre	H ₂ SO ₄	middel		4,72 pH	2,353 mS/cm

Rådata fra glødetabforsøg

Værk	Syre	nr.	Digel	Før Digel+prøve	Efter Digel+prøve	Aske	% glødetab
Lundtofte 2009	Uvasket	8	17,1076 g	19,8255 g	19,7327 g	2,5015 g	3%
Lundtofte 2009	Uvasket	P	15,5018 g	17,896 g	17,8458 g	2,5005 g	2%
Lundtofte 2009	Uvasket	H	15,5831 g	17,7713 g	17,9299 g	2,5007 g	-7%*
Lundtofte 2009	Uvasket	middel					3%
Lundtofte 2009	HNO ₃	43	35,444 g	37,9478 g	37,677 g	2,5024 g	11%
Lundtofte 2009	HNO ₃	10	14,8027 g	17,3028 g	17,0371 g	2,5002 g	11%
Lundtofte 2009	HNO ₃	45	18,9372 g	21,438 g	21,1792 g	2,5001 g	10%
Lundtofte 2009	HNO ₃	middel					11%
Lundtofte 2009	H ₂ SO ₄	120	21,2325 g	23,7321 g	23,3479 g	2,5006 g	15%
Lundtofte 2009	H ₂ SO ₄	14	21,324 g	23,8238 g	23,523 g	2,5001 g	12%
Lundtofte 2009	H ₂ SO ₄	12	12,2228 g	14,723 g	14,4301 g	2,5012 g	12%
Lundtofte 2009	H ₂ SO ₄	middel					13%
Lundtofte 2012	Uvasket	K	15,373 g	17,8737 g	17,83 g	2,5007 g	2%
Lundtofte 2012	Uvasket	D	18,9336 g	21,4338 g	21,3952 g	2,5002 g	2%
Lundtofte 2012	Uvasket	3	15,3757 g	17,8767 g	17,8336 g	2,501 g	2%
Lundtofte 2012	Uvasket	6	11,6734 g	14,1769 g	14,1384 g	2,5035 g	2%
Lundtofte 2012	Uvasket	middel					2%
Avedøre	Uvasket	6	16,7636 g	19,2691 g	19,2617 g	2,5026 g	0,30%
Avedøre	Uvasket	4	16,0585 g	18,5606 g	18,5525 g	2,5032 g	0,32%
Avedøre	Uvasket	5	16,2158 g	18,7187 g	18,7108 g	2,5035 g	0,32%
Avedøre	Uvasket	middel					0,3%
Avedøre	HNO ₃ K	R	16,3351 g	18,8385 g	18,7707 g	2,5034 g	3%
Avedøre	HNO ₃ K	G1	24,7983 g	27,2993	27,2346 g	2,5029 g	3%
Avedøre	HNO ₃ K	31	15,6378 g	18,1388 g	18,075 g	2,501 g	3%
Avedøre	HNO ₃ K	middel					3%
Avedøre	H ₂ SO ₄	§	36,5738 g	39,0733 g	38,7812 g	2,5001 g	12%
Avedøre	H ₂ SO ₄	44	38,0322 g	40,5333 g	40,3116 g	2,5011 g	9%
Avedøre	H ₂ SO ₄	31	24,8098 g	27,3135 g	27,0899 g	2,5034 g	9%
Avedøre	H ₂ SO ₄	middel					10%

* Der ses bort fra dette resultat ved beregning af middelværdi.

Rådata fra ICP-måling efter oplukning

Sample Labels	Al 308.215 mg/liter	Cd 214.439 mg/liter	Cr 206.158 mg/liter	Cu 324.754 mg/liter	Fe 234.350 mg/liter	Ni 231.604 mg/liter	P 213.618 mg/liter	Pb 220.353 mg/liter	Zn 213.857 mg/liter
Standard 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Standard 2		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		0.020000 e	0,02
Standard 3		0,04	0,04	0,04	0,04	0,04		0.040000 e	0,04
Standard 4		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1	0,1
Standard 5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		0,5	0,5
Standard 6		1	1	1	1	1		1	1
Standard 7		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5		2,5	2,5
Standard 8		5	5	5	5	5		5	5
Standard 9		10	10	10	10	10		10	10
Standard 10	2						2		
Standard 11	4						4		
Standard 12	8						8		
Standard 13	10						10		
Standard 14	20						20		
Standard 15	40						40		
Standard 16	50						50		
Standard 17	100						100		
Avedøre uvasket 20a	204,344	0,034346	0,861649	5,55499	829,301	0,600021	1072,19	0,868085	21,5692
Avedøre uvasket 21b	191,923	0,033275	0,818036	5,29842	761,684	0,575276	1018,84	0,83513	20,6121
Avedøre uvasket 22c	203,892	0,034527	0,84629	5,57796	790,174	0,597524	1082,43	0,867579	21,8549
Avedøre uvasket 23d	201,138	0,033922	0,819994	5,37533	774,011	0,580324	1088,81	0,855572	21,7489
Avedøre uvasket 24e	205,154	0,034616	0,847801	5,50585	756,629	0,600998	1008,23	0,865213	22,2605
Lundtofte uvasket 35a	678,056	0,013226	0,291145	4,18575	184,975	0,232222	744,358	0,635153	15,0772
Lundtofte uvasket 36b	740,832	0,014356	0,310314	4,52954	148,488	0,244536	816,883	0,682697	16,1066
Lundtofte uvasket 37c	590,046	0,013094	0,290495	4,10438	175,058	0,225706	605,989	0,627427	12,6149
Lundtofte uvasket 38d	688,654	0,015248	0,334773	4,78553	204,344	0,261728	707,092	0,723926	14,8176
Lundtofte uvasket 39e	688,297	0,013893	0,303075	4,42067	209,342	0,240169	725,187	0,679795	15,0687
LU a1	583,064	0,014643	0,32169	4,48891	164,019	0,243625	599,846	0,691808	11,2074
LU b2	556,273	0,009956	0,363314	3,50851	155,074	0,222146	574,118	0,428418	9,02221
LU c3	478,796	0,009254	0,329608	3,35655	131,601	0,218458	498,365	0,416176	8,69536
LU 19	670,388	0,011259	0,390844	3,9795	194,303	0,256086	700,28	0,486122	10,331
LU 20	670,63	0,011501	0,401431	3,97175	192,312	0,253893	701,534	0,489331	10,4609
LHNO3 5a	635,93	0,008553	0,312341	2,99985	242,594	0,194054	420,027	0,37392	7,67664
LHNO3 6b	688,179	0,004677	0,391543	3,29305	262,08	0,328044	448,319	0,863536	19,4062
LHNO3 7c	682,138	0,005051	0,438107	3,63149	265,663	0,360028	451,259	0,962868	19,0782
LHNO3 8d	695,142	0,005214	0,415213	3,49898	267,219	0,352416	460,414	0,938937	19,5983
LHNO3 9e	680,307	0,005261	0,419658	3,7159	258,693	0,366271	449,963	1,01395	19,3254
LH2SO4 13a	677,022	0,005246	0,404336	3,45536	246,171	0,341705	460,824	0,907424	19,0271
LH2SO4 14b	489,548	0,006042	0,259484	2,79844	161,305	0,213798	381,113	0,638107	10,8498
LH2SO4 15c	664,286	0,007519	0,333726	3,56119	213,059	0,265698	520,884	0,797725	17,0095
LH2SO4 16d	465,824	0,006248	0,278437	2,70503	181,722	0,21916	383,81	0,631782	10,5473
LH2SO4 17e	465,291	0,00462	0,241842	2,51216	153,733	0,189485	370,932	0,523105	9,01858
AH2SO4 A22	104,726	0,018205	0,712436	3,19034	629,402	0,418782	583,331	0,697318	9,74343
AH2SO4 B24	74,5769	0,013779	0,514776	2,28537	443,686	0,30989	410,375	0,507856	6,78855
AH2SO4 C25	155,436	0,01954	0,745936	3,32861	673,446	0,439475	605,803	0,742352	10,2384
AH2SO4 D28	108,8	0,019837	0,759221	3,34194	688,352	0,44871	598,351	0,742128	10,3228
AH2SO4 E29	153,989	0,020844	0,79322	3,49247	687,61	0,459822	628,658	0,784343	10,7648
AHNO3 A32	542,812	0,008136	0,323014	3,00843	142,474	0,196265	600,894	0,349722	7,36463
AHNO3 B33	199,246	0,025408	0,919965	4,22875	763,172	0,572301	712,424	1,00875	17,9672
AHNO3 C34	101,888	0,017655	0,639159	2,93007	500,69	0,398728	465,056	0,701813	9,2391
AHNO3 D38	156,816	0,020376	0,740813	3,29515	608,664	0,465915	569,886	0,78929	14,1959
AHNO3 E39	204,785	0,025759	0,933738	4,19409	810,117	0,577563	717,38	0,994384	18,2027

Rådata fra blandingsforholdet af screeningsprøverne

Testemne	% aske	Forhold	Dato	Cement	Sand	Vand	Aske	Ekstravand	I alt	Zero	1. vibration	2. vibration
Reference	0		21-02-2012	450	1350	225	0	0	2025	11:11		40
Reference	0		05-03-2012	450	1350	225	0	0	2025	13:53	17,91	42,8
Lundtofte Uvasket	20	1:1	21-03-2012	360	1350	225	90	61,84	2087	09:43	11,86	22,1
Lundtofte Uvasket	20	1:2	21-03-2012	360	1350	225	180	142,22	2257	09:54	10,27	18,13
Lundtofte HNO ₃	20	1:1	21-02-2012	360	1350	225	90	63,72	2089	13:41	32	40
Lundtofte HNO ₃	20	1:2	21-02-2012	360	1350	225	180	120,54	2236	13:41	32	40
Lundtofte H ₂ SO ₄	20	1:1	21-02-2012	360	1350	225	90	10,84	2036	14:20		
Lundtofte H ₂ SO ₄	20	1:3	21-02-2012	360	1350	225	270	171,23	2376	14:20		
Avedøre Uvasket	20	1:1	05-03-2012	360	1350	225	90	68,46	2093	12:31	13,49	39,68
Avedøre Uvasket Knust	20	1:1	05-03-2012	360	1350	225	90	64,16	2089	13:00	20,8	33,35
Avedøre Uvasket	20	1:2	05-03-2012	360	1350	225	180	93,95	2209	12:31	13,49	39,68
Avedøre Uvasket	20	1:3	05-03-2012	360	1350	225	270	167,69	2373	13:00	20,8	33,35
Avedøre HNO ₃	20	1:1	21-02-2012	360	1350	225	90	21,6	2047	12:17	48	34
Avedøre HNO ₃ Knust	20	1:1	05-03-2012	360	1350	225	90		2025	13:34	28,96	51,85
Avedøre HNO ₃	20	1:2	21-02-2012	360	1350	225	180	92,1	2207	12:41	21	36
Avedøre H ₂ SO ₄	20	1:1	21-02-2012	360	1350	225	90	49,9	2075	11:36	24	35
Avedøre H ₂ SO ₄ Knust	20	1:1	05-03-2012	360	1350	225	90		2025	13:34	28,96	51,85
Avedøre H ₂ SO ₄	20	1:3	21-02-2012	360	1350	225	270	119,5	2325	11:54	43	45

Rådata fra trykprøvning af screeningsprøverne

Testemne	Dato	a [cm]	b [cm]	c [cm]	Vægt [kg]	F _{c,1} [kN]	F _{c,2} [kN]	Bemærkning
Reference 1	28-02-2012	4	4,1	16	0,590	96	101	
Reference 2	28-02-2012	4	4,1	16,15	0,590	102	103	
Reference 3	28-02-2012	4	4,1	16,05	0,590	103	103	
Reference 1	12-03-2012	4,1	4	16,15	0,587	75	47	Brud opstod ved første tryk, ved næste tryk forekom revne.
Reference 2	12-03-2012	4	4,1	16,2	0,583	52	71	
Reference 3	12-03-2012	4,1	4	16,2	0,583	70	91	Brud opstod ved første tryk.
Lundtofte Uvasket 1:1 1	28-03-2012	4,1	4	16,1	0,561	39	40	Brud ved begge trykprøvninger
LundtofteUvasket 1:1 2	28-03-2012	4,1	4,1	16,1	0,568	37	39	Brud ved første trykprøvning og revne ved nr. 2.
LundtofteUvasket 1:1 3	28-03-2012	4	4	16,1	0,563	38	44	Brud opstod ved første tryk
Lundtofte Uvasket 1:1 knust 1	28-03-2012	4,1	4	16,1	0,572	37	46	Brud ved begge trykprøvninger
Lundtofte Uvasket 1:1 knust 2	28-03-2012	4	4	16	0,56	51	49	Brud ved første trykprøvning og revne ved nr. 2.
Lundtofte Uvasket 1:1 knust 3	28-03-2012	4	4	16	0,568	56	45	Brud ved første trykprøvning og revne ved nr. 2.
Lundtofte Uvasket 1:2 1	28-03-2012	4,1	4	16	0,557	30	31	Brud ved begge trykprøvninger
Lundtofte Uvasket 1:2 2	28-03-2012	4	4	16,1	0,559		27	Testemne smadret
Lundtofte Uvasket 1:2 3	28-03-2012	4	4	16	0,556	30	31	
Lundtofte HNO ₃ 1:1 1	28-02-2012	4	4,1	16,05	0,563	51	52	
Lundtofte HNO ₃ 1:1 2	28-02-2012	4,05	4,05	16,15	0,568	52	50	
Lundtofte HNO ₃ 1:1 3	28-02-2012	4,1	4,05	16	0,563	51	52	
Lundtofte HNO ₃ 1:2 1	28-02-2012	4,03	4,1	16,2	0,560	26	26	Stor revne i prøve inden F _c opnået
Lundtofte HNO ₃ 1:2 2	28-02-2012	4,01	4,14	16,1	0,566	27	27	
Lundtofte HNO ₃ 1:2 3	28-02-2012	4,15	4,03	16,1	0,567	25		Testemne smadret måling kunne ikke foretages
Lundtofte H ₂ SO ₄ 1:1 1	28-02-2012	4,05	4	16,1	0,569	68	51	
Lundtofte H ₂ SO ₄ 1:1 2	28-02-2012	4,1	4,02	16,2	0,574	59	68	
Lundtofte H ₂ SO ₄ 1:1 3	28-02-2012	4,06	4,1	16,1	0,573	63	73	
Lundtofte H ₂ SO ₄ 1:3 1	28-02-2012	4,08	4,03	16,24	0,553	40	34	
Lundtofte H ₂ SO ₄ 1:3 2	28-02-2012	4,12	4,03	16,24	0,557	29	36	Stor revne i prøve inden F _c opnået
Lundtofte H ₂ SO ₄ 1:3 3	28-02-2012	4	4,05	16,24	0,560	39	40	
Avedøre Uvasket 1:1 1	12-03-2012	3,9	4	16	0,559	48	46	
Avedøre Uvasket 1:1 2	12-03-2012	4,1	4	16,1	0,557	26*	25*	Forkert indstilling af maskine
Avedøre Uvasket 1:1 3	12-03-2012	4	4	16,2	0,558		44	
Avedøre Uvasket 1:1 knust 1	12-03-2012	4	4	16,1	0,570	67	56	
Avedøre Uvasket 1:1 knust 2	12-03-2012	4	4	16	0,566	45	51	
Avedøre Uvasket 1:1 knust 3	12-03-2012	4	4	16	0,569	58	60	
Avedøre Uvasket 1:2 1	12-03-2012	4	3,9	16,2	0,515		25	Testemne smadret ved første måling

Testemne	Dato	a [cm]	b [cm]	c [cm]	Vægt [kg]	F _{c,1} [kN]	F _{c,2} [kN]	Bemærkning
Avedøre Uvasket 1:2 2	12-03-2012	4,1	3,95	16,1	0,512	26		Testemne smadret måling kunne ikke foretages
Avedøre Uvasket 1:2 3	12-03-2012	4	4	16,1	0,514	27	26	
Avedøre Uvasket 1:3 1	12-03-2012	4	3,9	16,1	0,525			Testemne smadret måling kunne ikke foretages
Avedøre Uvasket 1:3 2	12-03-2012	3,95	3,9	16,1	0,513			Testemne smadret måling kunne ikke foretages
Avedøre Uvasket 1:3 3	12-03-2012	3,9	4	16,1	0,520			Testemne smadret måling kunne ikke foretages
Avedøre HNO ₃ 1:1 1	28-02-2012	4	4,1	16	0,563	52	43	
Avedøre HNO ₃ 1:1 2	28-02-2012	4,05	4	16,05	0,560	54	40	
Avedøre HNO ₃ 1:1 3	28-02-2012	4	4	16,05	0,557	40	40	
Avedøre HNO ₃ 1:1 knust 1	12-03-2012	4	4	16,25	0,584	55	60	Revne opstod ved første tryk.
Avedøre HNO ₃ 1:1 knust 2	12-03-2012	4	4	16,2	0,580	37	40	Brud opstod før Fmax ved første tryk.
Avedøre HNO ₃ 1:1 knust 3	12-03-2012	4	4	16	0,569	63	65	
Avedøre HNO ₃ 1:2 1	28-02-2012	4	4,1	16,15	0,567	34	29	
Avedøre HNO ₃ 1:2 2	28-02-2012	4,1	4	16,2	0,563	41	40	
Avedøre HNO ₃ 1:2 3	28-02-2012	4,1	4	16,2	0,56	44	38	
Avedøre H ₂ SO ₄ 1:1 1	28-02-2012	4	4	16,15	0,564	40	40	
Avedøre H ₂ SO ₄ 1:1 2	28-02-2012	4	4	16,12	0,564	51	43	
Avedøre H ₂ SO ₄ 1:1 3	28-02-2012	4	4,1	16,05	0,563	50	46	
Avedøre H ₂ SO ₄ 1:1 knust 1	12-03-2012	4	4,1	16,1	0,572	70	57	Revne opstod før fmax ved anden tryk.
Avedøre H ₂ SO ₄ 1:1 knust 2	12-03-2012	3,95	4,1	16,1	0,579	57	68	
Avedøre H ₂ SO ₄ 1:1 knust 3	12-03-2012	4	4,1	16	0,578	59	59	
Avedøre H ₂ SO ₄ 1:3 1	28-02-2012	4,04	4,03	16,1	0,550			Testemne smadret måling kunne ikke foretages
Avedøre H ₂ SO ₄ 1:3 2	28-02-2012	4,03	4	16,12	0,546			Testemne smadret måling kunne ikke foretages
Avedøre H ₂ SO ₄ 1:3 3	28-02-2012	4	4,03	16,15	0,552			

* Der ses bort fra disse resultater.

Rådata fra blandingsforholdet af 42-døgn prøverne

Testemne	Dato	Ce- ment	Sand	Vand	Aske	Ekstra vand	I alt	Zero	1. vib- ration	2. vib- ration	Bemærkninger
Reference a	19-03-2012	450	1350	225	0	0	2025	08:46	16,01	37,03	
Reference b	19-03-2012	450	1350	225	0	0	2025	09:02	15,45	27,36	
Reference c	19-03-2012	450	1350	225	0	0	2025	09:14	24,33	30,31	
Reference d	19-03-2012	450	1350	225	0	0	2025	09:25	18,35	36,15	
Reference e	19-03-2012	450	1350	225	0	0	2025	09:40	13,58	37,02	
Avedøre Ubehandlet Knust a	20-03-2012	360	1350	225	90	29,25	2054	09:31	13,12	24,38	
Avedøre Ubehandlet Knust b	20-03-2012	360	1350	225	90	34,5	2060	09:40	11,78	27,28	
Avedøre Ubehandlet Knust c	20-03-2012	360	1350	225	90	21,88	2047	09:51	15,2	24,54	Form skilte ad under vibrering
Avedøre Ubehandlet Knust d	20-03-2012	360	1350	225	90	15,72	2041	10:03	12,12	22,75	Konsistens som chokolademousse
Avedøre Ubehandlet Knust e	20-03-2012	360	1350	225	90	25,37	2050	10:15	13,88	23,71	
Lundtofte Ubehandlet Knust a	21-03-2012	360	1350	225	90	64,57	2090	10:03	8,61	18,61	Meget våd
Lundtofte Ubehandlet Knust b	21-03-2012	360	1350	225	90	0	2025	10:14	18,68	24,41	Tør
Lundtofte Ubehandlet Knust c	21-03-2012	360	1350	225	90	12,1	2037	10:26	12,63	22,9	våd
Lundtofte Ubehandlet Knust d	21-03-2012	360	1350	225	90	27,66	2053	10:36	21,78	30,36	Våd
Lundtofte Ubehandlet Knust e	21-03-2012	360	1350	225	90	33,42	2058	10:51	16,34	27,16	
Avedøre H ₂ SO ₄ Knust a	28-03-2012	360	1350	225	90	0	2025	09:22	19,79	29,6	
Avedøre H ₂ SO ₄ Knust b	28-03-2012	360	1350	225	90	21,05	2046	09:46	23,04	33,78	
Avedøre H ₂ SO ₄ Knust c	28-03-2012	360	1350	225	90	21,05	2046	09:46	23,04	33,78	

Testemne	Dato	Ce- ment	Sand	Vand	Aske	Ekstra vand	I alt	Zero	1. vib- ration	2. vib- ration	Bemærkninger
Avedøre H ₂ SO ₄ Knust d	28-03-2012	360	1350	225	90	21,16	2046	10:00	22,28	23,78	
Avedøre H ₂ SO ₄ Knust e	28-03-2012	360	1350	225	90	0	2025	10:13	21,78	34,73	
Lundtofte H ₂ SO ₄ Knust a	10-04-2012	360	1350	225	90	16,18	2041	10:10	37,85	34,81	
Lundtofte H ₂ SO ₄ Knust b	10-04-2012	360	1350	225	90	40,64	2066	10:23	21,25	22,98	
Lundtofte H ₂ SO ₄ Knust c	10-04-2012	360	1350	225	90	31,39	2056	10:35	23,59	27,56	
Lundtofte H ₂ SO ₄ Knust d	10-04-2012	360	1350	225	90	26,67	2052	10:45	22,53	30,08	
Lundtofte H ₂ SO ₄ Knust e	10-04-2012	360	1350	225	90	30*	2055	10:57	19,94	22,01	Konsistens som a

* Denne vejede vandbægeret 303,80 g inden og vi missede at veje den efter.

Rådata fra trykprøvning af 42-døgns prøverne

Testemne	Dato	Tid	a [cm]	b [cm]	c [cm]	Vægt [kg]	F _{c,1} [kN]	F _{c,2} [kN]	Bemærkning
REF 1A 7døgn	26-03-2012	08:45	4	4	16,1	0,581	92	98	Brud
REF 1B 7 døgn	26-03-2012	08:53	4	4	16,2	0,578	92	96	Brud ved første og revne ved nummer to
REF 1C 7 døgn	26-03-2012	08:59	4	4	16,1	0,574	85	93	Brud begge gange
REF 1D 14 døgn	02-04-2012	09:23	4	4	16	0,54	101	81	Revne ved første tryk brud ved næste
REF 1E 14 døgn	02-04-2012	09:28	4	4	16,1	0,527	98	93	Revne ved første tryk brud ved næste
REF 2A 14 døgn	02-04-2012	09:18	4	4	16,1	0,584	103	105	Brud ved første og revne ved nummer to
REF 2B 28 døgn	16-04-2012	08:19	4	4	16,1	0,582	114	89	Brud begge gange
REF 2C 28 døgn	16-04-2012	08:26	4	4	16,1	0,584	108	112	Brud begge gange
REF 2D 28 døgn	16-04-2012	08:30	4	4	16	0,581	111	106	Brud begge gange
REF 2E 35 døgn	23-04-2012	09:40	4,1	4	16,1	0,588	107	111	Brud begge gange
REF 3A 35 døgn	23-04-2012	09:33	4	4	16,1	0,579	112	120	Brud begge gange
REF 3B 35 døgn	23-04-2012	09:36	4,1	4	16,1	0,58	79*	70*	Brud begge gange smuldrede lidt ved 2 tryk
REF 3C 42 døgn	30-04-2012	09:06	4,05	4	16,2	0,584	117	113	Brud begge gange
REF 3D 42 døgn	30-04-2012	09:12	4,1	4	16	0,578	84	99	Brud begge gange
REF 3E 42 døgn	30-04-2012	09:17	4	4	16,1	0,586	117	106	Brud begge gange
AUK 1A 7 døgn	27-03-2012	11:28	4,1	4	16	0,566	60	67	Brud ved den 1. revne ved den 2.
AUK 1B 7 døgn	27-03-2012	11:32	4	4	16,2	0,573	47	52	Brud ved den første
AUK 1C 7 døgn	27-03-2012	11:36	4,05	4,1	16,3	0,597	51	50	Brud ved den første. Stor revne ved 2. trykprøvning
AUK 1D 14 døgn	03-04-2012	08:58	4,1	4	16,1	0,494	25*		Brud ved den første smuldrede ved den 2.
AU 1E 14 døgn	03-04-2012	09:02	4,1	4	16	0,58	64	66	Revne ved begge tryk
AUK 2A 14 døgn	03-04-2012	08:53	4	4	16,1	0,57	73	76	Revne ved første tryk brud ved næste
AUK 2B 28 døgn	17-04-2012	09:23	4	4	16,1	0,575	58	73	Brud begge gange
AUK 2C 28 døgn	17-04-2012	09:26	4,05	4	16,2	0,598	86	88	Brud begge gange
AUK 2D 28 døgn	17-04-2012	09:30	4	4	16	0,497	25*	28*	Smuldrede næsten ved første tryk, brud ved næste.
AUK 2E 35 døgn	24-04-2012	10:22	4	4	16,1	0,578	84	84	Brud begge gange
AUK 3A 35 døgn	24-04-2012	10:15	4,1	4	16	0,571	84	95	Brud ved første tryk revne ved næste (Revne opstod før f _{max})
AUK 3B 35 døgn	24-04-2012	10:19	4	4	16	0,565	77	81	Brud begge gange
AUK 3C 42 døgn	01-05-2012	10:05	4,1	4,1	16,2	0,599	74	68	Brud begge gange
AUK 3D 42 døgn	01-05-2012	10:14	4	4	16,1	0,498	35*	31*	Brud begge gange
AUK 3E 42 døgn	01-05-2012	10:17	4	4	16,1	0,576	84	84	Brud begge gange

LUK 1A7 døgnet	28-03-2012	10:54	4,1	4	16,1	0,572	37	46	Brud ved begge trykprøvninger
LUK 1B 7 døgnet	28-03-2012	10:57	4	4	16	0,56	51	49	Brud ved første trykprøvning og revne ved nr. 2.
LUK 1C 7 døgnet	28-03-2012	10:59	4	4	16	0,568	56	45	Brud ved første trykprøvning og revne ved nr. 2.
LUK 1D 14 døgnet	04-04-2012	09:04	4	4	16	0,56	50	56	Brud ved begge trykprøvninger
LUK 1E 14 døgnet	04-04-2012	09:07	4	4	16,1	0,578	53	55	Brud ved begge trykprøvninger
LUK 2A 14 døgnet	04-04-2012	09:01	4	4	16	0,577	51	53	Brud ved første trykprøvning og revne ved nr. 2.
LUK 2B 28 døgnet	18-04-2012	09:39	4,1	4	16,05	0,579	76	57	Brud ved begge trykprøvninger
LUK 2C 28 døgnet	18-04-2012	09:45	4,1	4	16	0,573	70	75	Brud ved begge trykprøvninger
LUK 2D 28 døgnet	18-04-2012	09:48	4,1	4,1	16	0,559	68	63	Brud ved begge trykprøvninger
LUK 2E 35 døgnet	25-04-2012	09:37	4	4	16,1	0,583	67	66	Revne ved første tryk brud ved næste
LUK 3A 35 døgnet	25-04-2012	09:32	4	4	16,1	0,58	61	65	Revne ved begge tryk
LUK 3B 35 døgnet	25-04-2012	09:35	4,1	4	16,1	0,578	56	63	Revne ved første tryk brud ved næste
LUK 3C 42 døgnet	02-05-2012	09:55	4	4	16	0,568	80	76	Brud begge gange
LUK 3D4 2 døgnet	02-05-2012	09:58	4,1	4	16,1	0,558	58	59	Brud begge gange Lidt smulder
LUK 3E 42 døgnet	02-05-2012	10:01	4	4,1	16,1	0,571	65	59	Brud begge gange
AH ₂ SO ₄ K 2A 7 døgnet	04-04-2012	08:50	4,2	4	16,2	0,585	54	52	Brud ved første trykprøvning og revne ved nr. 2.
AH ₂ SO ₄ K 1B 7 døgnet	04-04-2012	08:55	4,1	4	16	0,577	55	54	Brud ved begge trykprøvninger
AH ₂ SO ₄ K 1C 7 døgnet	04-04-2012	08:58	4,1	4	16	0,567	57	50	Revne ved første tryk brud ved næste
AH ₂ SO ₄ K 1A 14 døgnet	11-04-2012	09:01	4	4	16,1	0,564	59	64	Brud ved begge trykprøvninger
AH ₂ SO ₄ K 1D 14 døgnet	11-04-2012	09:08	4,1	4	16,1	0,575	51	55	Brud ved begge trykprøvninger. Begyndte at bøje ved ca. 48 N i første tryk.
AH ₂ SO ₄ K 1E 14 døgnet	11-04-2012	09:11	4	4,1	16	0,57	70	50	Brud ved begge trykprøvninger
AH ₂ SO ₄ K 2B 28 døgnet	25-04-2012	09:19	4	4	16	0,576	85	81	Brud ved begge trykprøvninger
AH ₂ SO ₄ K 2C 28 døgnet	25-04-2012	09:25	4	4	16	0,569	74	64	Brud ved begge trykprøvninger. Begyndte at smuldre ved 52 ved 2 trykprøvning.
AH ₂ SO ₄ K 2D 28 døgnet	25-04-2012	09:28	4	4	16	0,57	61	61	Ved førsteb tryk opstod

døgn									der brug ved 32.
AH ₂ SO ₄ K 2E 35 døgn	02-05-2012	09:51	4	4	16	0,567	94	72	Brud begge gange
AH ₂ SO ₄ K 3A 35 døgn	02-05-2012	09:42	4,1	4	16,2	0,586	62	75	Brud begge gange
AH ₂ SO ₄ K 3B 35 døgn	02-05-2012	09:47	4,1	4	16,1	0,574	86	80	Brud begge gange
AH ₂ SO ₄ K 3C 42 døgn	09-05-2012	08:58	4	4	16	0,572	89	85	Revne ved første tryk brud ved næste
AH ₂ SO ₄ K 3D 42 døgn	09-05-2012	09:04	4	4	16,1	0,576	69	69	Brud begge gange
AH ₂ SO ₄ K 3E 42 døgn	09-05-2012	09:07	3,9	4	16	0,563	87	71	Brud begge gange
LH ₂ SO ₄ K 1A 7 døgn	17-04-2012	09:16	4	4,1	16	0,571	51	38	Brud begge gange, brud før Fmax ved første tryk.
LH ₂ SO ₄ K 1B 7 døgn	17-04-2012	09:11	4	4,1	16	0,576	36	41	Brud begge gange
LH ₂ SO ₄ K 1C 7 døgn	17-04-2012	09:20	4	4,05	16	0,566	46	45	Brud begge gange
LH ₂ SO ₄ K 1D 14 døgn	24-04-2012	10:09	4	4	16	0,567	66	67	Brud ved første tryk revne ved næste
LH ₂ SO ₄ K 1E 14 døgn	24-04-2012	10:12	4	4	16,1	0,575	62	65	Brud ved første tryk
LH ₂ SO ₄ K 2A 14 døgn	24-04-2012	10:10	4,1	4,1	16,05	0,577	64	58	Brud begge gange
LH ₂ SO ₄ K 2B 28 døgn	08-05-2012	09:19	4,1	4	16,1	0,579	45*	46*	Brud begge gange
LH ₂ SO ₄ K 2C 28 døgn	08-05-2012	09:24	4,1	4	16	0,568	68	73	Brud begge gange
LH ₂ SO ₄ K 2D 28 døgn	08-05-2012	09:13	4	4	16,1	0,572	84	81	Brud begge gange
LH ₂ SO ₄ K 2E 35 døgn	15-05-2012	10:29	4,1	4	16,2	0,582	74	70	Revne ved første tryk brud ved næste
LH ₂ SO ₄ K 3A 35 døgn	15-05-2012	10:21	4,1	4	16	0,572	78	54	Brud begge gange, dog ved 2. tryk brud opstod før
LH ₂ SO ₄ K 3B 35 døgn	15-05-2012	10:23	4,1	4	16	0,575	33*	54*	Brud begge gange, dog ved 2. tryk brud opstod før (v. 46)
LH ₂ SO ₄ K 3C 42 døgn	22-05-2012	09:50	4	4	16	0,563	76	78	Revne ved begge tryk
LH ₂ SO ₄ K 3D 42 døgn	22-05-2012	09:55	4	4	16	0,571	75	87	Brud ved første tryk revne ved anden tryk.
LH ₂ SO ₄ K 3E 42 døgn	22-05-2012	09:58	4,1	4	16,1	0,583	75	77	Brud ved første tryk revne ved anden tryk.

* Der ses bort fra disse resultater.

Rådata fra hærdningsforsøg

TEST NUMBER	AHNO ₃		REF	
MACHINE	Vicatronc automatic single station		Vicat apparat nr. 5	
KIND OF TEST	90 DROP		26 DROP	
CYCLE TYPE	STANDARD			
DATE OF TEST	21-02-2012		22-05-2012	
SPECIMEN TIME	13:25:12		11:11:00	
MIXING TIME	12:49:00		10:40:00	
ZERO TIME	12:41:00		10:34:00	
TIME	00:10:00		00:10:00	
1	00:36:12	0	00:31:00	0
2	00:46:12	0	00:41:00	0
3	00:56:12	0	00:51:00	0
4	01:06:12	0	01:01:00	0
5	01:16:12	0	01:11:00	0
6	01:26:12	0	01:21:00	0
7	01:36:12	0	01:31:00	0
8	01:46:12	0	01:41:00	0
9	01:56:12	0	01:51:00	0
10	02:06:12	0	02:01:00	0
11	02:16:12	0	02:11:00	18
12	02:26:12	0	02:21:00	22,5
13	02:36:12	0	02:31:00	15
14	02:46:12	0	02:41:00	6
15	02:56:12	0	02:51:00	33
16	03:06:12	0	03:01:00	35
17	03:16:12	0	03:11:00	33
18	03:26:12	0	03:21:00	33
19	03:36:12	0	03:31:00	35
20	03:46:12	0	03:41:00	35,5
21	03:56:12	0	03:51:00	36
22	04:06:12	0	04:01:00	37
23	04:16:12	0	04:11:00	37
24	04:26:12	11,2	04:21:00	37
25	04:36:12	0,1	04:31:00	37
26	04:46:12	10,4	04:41:00	37
27	04:56:12	9,1		
28	05:06:12	0		
29	05:16:12	0		
30	05:26:12	0		
31	05:36:12	0		
32	05:46:12	0		
33	05:56:12	0		
34	06:06:12	0		
35	06:16:12	0		
36	06:26:12	0		
37	06:36:12	0		
38	06:46:12	34,4		
39	06:56:12	36,1		
40	07:06:12	36,1		
41	07:16:12	38,1		

TEST NUMBER		AHNO ₃	REF
42	07:26:12	38,4	
43	07:36:12	37,3	
44	07:46:12	37,2	
45	07:56:12	37,2	
46	08:06:12	38,4	
47	08:16:12	39,3	
48	08:26:12	38,8	
49	08:36:12	38,4	
50	08:46:12	38,9	
51	08:56:12	39,8	
52	09:06:12	39,6	
53	09:16:12	39,6	
54	09:26:12	39,3	
55	09:36:12	38	
56	09:46:12	28,1	
57	09:56:12	38,2	
58	10:06:12	37,8	
59	10:16:12	39,2	
60	10:26:12	39,2	
61	10:36:12	39,3	
62	10:46:12	39,2	
63	10:56:12	39,5	
64	11:06:12	39,6	
65	11:16:12	39,5	
66	11:26:12	39	
67	11:36:12	39,3	
68	11:46:12	39,1	
69	11:56:12	39,3	
70	12:06:12	39,5	
71	12:16:12	39,9	
72	12:26:12	39,9	
73	12:36:12	39,1	
74	12:46:12	38,6	
75	12:56:12	39,2	
76	13:06:12	39,3	
77	13:16:12	39,3	
78	13:26:12	39,5	
79	13:36:12	39,7	
80	13:46:12	39,9	
81	13:56:12	39,7	
82	14:06:12	39,4	
83	14:16:12	39,6	
84	14:26:12	39,7	
85	14:36:12	39,7	
86	14:46:12	39,3	
87	14:56:12	39,5	
88	15:06:12	39,5	
89	15:16:12	40,1	
90	15:26:12	39,9	

Rådata fra leaching pH-måling

Testemne	Dato	Vægt	Rystetid	pH		
REF	1	14-05-2012	40,01	13:30	12,52	
REF	2	14-05-2012	40,06	13:30	12,54	
REF	3	14-05-2012	40,00	13:30	12,54	
Middel					12,53	± 0,01
AUK	1	15-05-2012	40,04	14:50	12,51	
AUK	2	15-05-2012	39,97	14:50	12,52	
AUK	3	15-05-2012	40,01	15:05	12,54	
Middel					12,52	± 0,02
LUK	1	15-05-2012	39,99	14:15	12,56	
LUK	2	15-05-2012	40,04	14:30	12,50	
LUK	3	15-05-2012	40,04	14:30	12,50	
Middel					12,52	± 0,03
AH ₂ SO ₄ K	1	14-05-2012	40,08	13:30	12,45	
AH ₂ SO ₄ K	2	14-05-2012	40,00	13:30	12,50	
AH ₂ SO ₄ K	3	15-05-2012	40,06	14:15	12,50	
Middel					12,48	± 0,03
LH ₂ SO ₄ K	1	14-05-2012	40,07	13:30	12,49	
LH ₂ SO ₄ K	2	14-05-2012	40,03	13:30	12,51	
LH ₂ SO ₄ K	3	14-05-2012	40,06	13:30	12,51	
Middel					12,50	± 0,01

Rådata fra ICP-måling efter leaching af mørtelprøver

Sample Labels	Al 237.312 mg/liter	Cd 228.802 mg/liter	Cr 206.550 mg/liter	Cu 324.754 mg/liter	Fe 239.563 mg/liter	Ni 230.299 mg/liter	P 214.914 mg/liter	Pb 220.353 mg/liter	Zn 213.857 mg/liter
Standard 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Standard 2		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		0,02	0,02
Standard 3		0,04	0,04	0,04	0,04	0,04		0,04	0,04
Standard 4		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1	0,1
Standard 5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		0,5	0,5
Standard 6		1	1	1	1	1		1	1
Standard 7		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5		2,5	2,5
Standard 8		5	5	5	5	5		5	5
Standard 9		10	10	10	10	10		10	10
Standard 10	2						2		
Standard 11	4						4		
Standard 12	8						8		
Standard 13	10						10		
Standard 14	20						20		
Standard 15	40						40		
Standard 16	50						50		
Standard 17	100						100		
REF 1A	0,257097	-0.000443 μ v	0,02842	0,020167	0,012119	0,008914	0,05757	0,0045	0,026463
REF 1B	0,274501	-0.000373 μ v	0,027709	0,01985	0,021542	0,008283	0,062758	0.000613 μ v	0,027414
REF 2A	0,209364	-0.000111 μ v	0,02525	0,019791	0,010416	0,006607	0,062775	0.004493 μ v	0,010703
REF 2B	0,211606	-0.000136 μ v	0,026201	0,01997	0,012024	0,008982	0,084989	0,002773	0,010996
REF 3A	0,185719	-0.000571 μ v	0,02431	0,017776	0,009463	0,007349	0,093177	0.002044 μ v	0,009043
REF 3B	0,206953	-0.000271 μ v	0,024045	0,017979	0,012574	0,007078	0,109796	0,004306	0,008938
AH2SO4K 1A	0,249954	-0.000160 μ v	0,020115	0,010432	0,044587	0,001809	0,108306	-0.000080 μ v	0,0124
AH2SO4K 1B	0,210029	-0.000366 μ v	0,01993	0,011035	0,020077	0,00222	0,116342	0,00272	0,010911
AH2SO4K 2A	0,329517	-0.000316 μ v	0,020272	0,011221	0,148424	0,004818	0,183523	0,002739	0,020361
AH2SO4K 2B	0,326549	-0.000189 μ v	0,020455	0,011399	0,126647	0,003895	0,191731	0,00336	0,019637
AH2SO4K 3A	0,232104	-0.000205 μ v	0,022582	0,0107	0,016315	0,002686	0,135442	0,006858	0,029288
AH2SO4K 3B	0,245815	-0.000428 μ v	0,022114	0,010209	0,020287	0,003133	0,147718	0,003963	0,029089
LH2SO4K 1A	0,254735	-0.000023 μ v	0,015998	0,008891	0,028278	0,003453	0,09148	0.001859 μ v	0,005421
LH2SO4K 1B	0,250938	-0.000336 μ v	0,017295	0,008624	0,028576	0,003007	0,107079	0,000985	0,005635
LH2SO4K 2A	0,238924	-0.000222 μ v	0,01628	0,009921	0,026783	0,0034	0,114159	0,004564	0,005471
LH2SO4K 2B	0,254206	0.000011 μ v	0,016582	0,009777	0,034172	0,001772	0,086899	0,004646	0,008482
LH2SO4K 3A	0,253358	-0.000346 μ v	0,016024	0,008522	0,047104	0,002255	0,089063	0.001398 μ v	0,00728
LH2SO4K 3B	0,247079	-0.000160 μ v	0,015372	0,008045	0,04338	0,003238	0,124741	0,002614	0,004974
AUK 1A	0,334902	0.000049 μ v	0,035364	0,01476	0,026074	0,002607	0,065436	0.000829 μ v	0,005869
AUK 1B	0,332443	-0.000578 μ v	0,036002	0,013789	0,02265	0,003858	0,059555	0,004966	0,005875
AUK 2A	0,320317	0,000485	0,036446	0,01495	0,02249	0,003742	0,056664	0.001943 μ v	0,005712
AUK 2B	0,315369	-0.000518 μ v	0,035403	0,015347	0,019917	0,003186	0,075592	0,004099	0,005982
AUK 3A	0,286178	0.000116 μ v	0,03729	0,0162	0,019498	0,002723	0,086619	0,002535	0,005219
AUK 3B	0,28944	-0.000173 μ v	0,037282	0,015318	0,02182	0,002481	0,121377	0,006822	0,00432
LUK 1A	0,353343	-0.000290 μ v	0,038445	0,029971	0,03518	0,004631	0,120482	0.000507 μ v	0,012867
LUK 1B	0,377781	0.000256 μ v	0,038891	0,031031	0,040488	0,00377	0,146129	0,006812	0,013693
LUK 2A	0,342119	-0.000444 μ v	0,03932	0,02931	0,019289	0,002843	0,072226	0.001522 μ v	0,009661
LUK 2B	0,328116	-0.000389 μ v	0,039764	0,028672	0,014981	0,002855	0,04218	0,004736	0,01003
LUK 3A	0,359455	-0.000374 μ v	0,041731	0,032593	0,015566	0,005143	0,044465	0,00696	0,00578
LUK 3B	0,357685	-0.000157 μ v	0,040794	0,031798	0,021848	0,004465	0,039603	0,005965	0,006668

Beregning af altan

Liv Rosenmai

S083090

Praktiksted:

Esben Kirkegård A/S rådgivende ingeniører

Indhold

Indledning.....	3
Dimensionering af armering til altandæk.....	4
Dimensionering af armering.....	7
Dimensionering af stål.....	7
Vederlag.....	9
Udbøjning	10
Revnevidde	12
Eftervisning af bæreevne.....	14
Konklusion	15

Indledning

I denne opgave vil jeg beskrive en opgave jeg har haft i løbet af mit praktikforløb. Opgaven omhandler et altandæk, som skal dimensioneres. Opgaven var interessant, fordi altandækket skulle gøres så tyndt som muligt, men stadig overholde normerne.

Man armerer beton, da stål har en større styrke end beton, og armeringen derfor gør betonen stærkere.

Der er krav til bæreevnen, udbøining, revnevidde, dæklag osv.

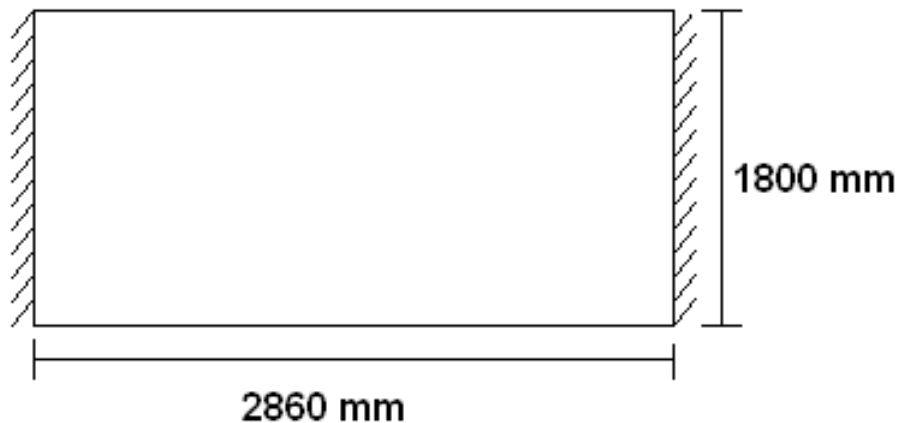
Opgaven indeholder beregninger som jeg har udarbejdet i praktikperioden.

Dimensionering af armering til altandæk

En gammel altan skal rives ned, da den er for slidt, og i stedet skal der bygges ny altan. Pga. de nye krav til isolering, hvilket jeg ikke kommer nærmere ind på i denne opgave, skal det nye altandæk være tyndere end det gamle, sådan at der er plads til isoleringen. Opgaven gik derfor ud på at dimensionere armering og beton til et nyt altandæk, sådan at altandækket kunne blive så tyndt som muligt, men stadig overholde normerne.

En altan regnes som værende i aggressiv miljøklasse, da den ikke er beskyttet imod f.eks. vejr, da den ligger udendørs. Til aggressiv miljøklasse er kravet at der minimum skal være et dæklag på 30 mm + tolerancetillæg, som jeg her regner med er 5 mm. Altså skal der minimum være et lag beton på begge sider af armeringen på 35 mm¹, som beskytter armering mod f.eks. regnvand, som vil få armeringen til at korrodere.

Dimensionerne af altandækket, samt understøtninger vises på figur 1:



Figur 1: af denne figur fremgår dimensionerne af altandækket. Det ses at dækket er understøttet i begge ender, hvor den ligger af på ydermuren af kalksandsten.

Ifølge normerne regnes med en nyttelast på altaner på²:

$$q_k = 2,5 \frac{kN}{m^2}$$

Egenlasten af altandækket udregnes:

Da vi endnu ikke kender tykkelsen af altanen, regnes med en tykkelse på 100 mm. Hvis det af senere beregninger fremgår, at dette ikke er nok, laves beregningen senere om med den nye tykkelse.

¹ Betonkonstruktioner s. 33

² Dansk standard

Længden og bredden af altanen medtages ikke i beregningen, da vi gerne vil have egenlasten givet i last pr. areal.

Densiteten af beton kendes som $2400 \frac{kg}{m^3}$.

Tyngdeaccelerationen, g, kendes som $9,82 \frac{m}{s^2}$.

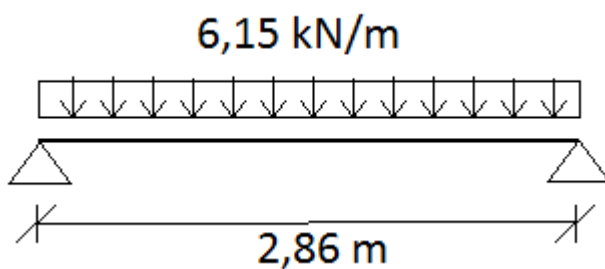
Disse tal multipliceres med hinanden og egenvægten af altanen fås deraf:

$$9,82 \frac{m}{s^2} \cdot 2400 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,1m \approx 2400 \frac{N}{m^2} = 2,4 \frac{kN}{m^2}$$

Den dimensionsgivende last er nyttelasten, som ganges med en sikkerhedsfaktor på 1,5 og egenlasten lagt sammen.

$$2,5 \frac{kN}{m^2} \cdot 1,5 + 2,4 \frac{kN}{m^2} = 6,15 \frac{kN}{m^2}$$

I det følgende regnes forskydningskraft og moment:

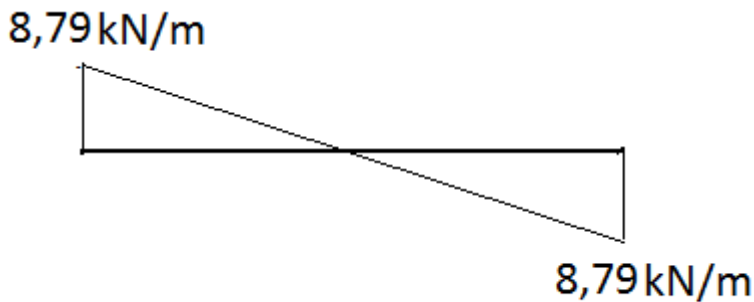


Figur 2: her ses dækket tænkt som en bjælke med belastning pr. m. bredde (enhedsmeter)

Forskydningskraften findes som

$$\frac{1}{2} \cdot P \cdot l^2$$

$$\frac{1}{2} \cdot 6,15 \frac{kN}{m^2} \cdot 2,86m^2 = 8,79 \frac{kN}{m}$$

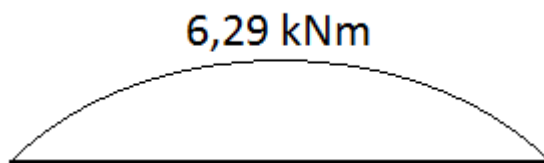


Figur 3: Her ses forskydningskraftkurven

Momentet regnes som:

$$\frac{1}{8} P \cdot l^2$$

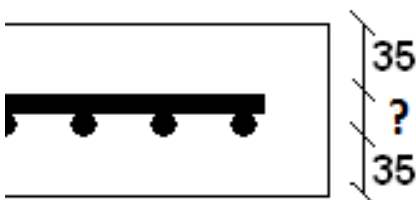
$$\frac{1}{8} \cdot 6,15 \frac{kN}{m} \cdot 2,86 m^2 = 6,29 kNm$$



Figur 4: Her ses momentkurven.

Det ses af ovenstående figurer at det største moment findes på midten af dækket, mens den største forskydningskraft findes ved understøtningerne.

Vi kender ikke tykkelsen af dækket, men vi ved der er dæklag på 35 mm på begge sider af armeringen, men da vi ikke kender armeringens dimensioner, ved vi altså ikke hvor tykt dækket bliver:



Figur 5: Her ses en skitse af et snit af altandækket

Dimensionering af armering

For at dimensionere armeringen skal man bruge styrken af armering og af beton. De karakteristiske værdier er givet og ud fra disse findes de regningsmæssige værdier³.

Beton:

Der bruges C35 Beton til altanen da dette er minimumskravet for aggressiv miljøklasse⁴

$$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c = 1,45$$

Ud fra disse to værdier findes den regningsmæssige bæreevne⁵

$$f_{cd} = \frac{35 \text{ MPa}}{1,45} = 24,1 \text{ MPa}$$

Stål:

$$f_{yk} = 355 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = 1,2$$

$$f_{yd} = \frac{355 \text{ MPa}}{1,2} = 295,8 \text{ MPa}$$

Dimensionering af stål

For at dimensionere armeringsstålet bruges følgende formler⁶

$$A_s = \omega \cdot \frac{b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

Hvor

b er bredden af altanen

d er tykkelsen af altanen

f_{cd} er den regningsmæssige betonstyrke

f_{yd} er den regningsmæssige stålstyrke

³ Teknisk Ståbi

⁴ Betonkonstruktioner

⁵ γ_c og γ_s er fundet i Betonkonstruktioner s. 37

⁶ Teknisk ståbi

ω er armeringsgraden

Armeringsgraden findes vha. følgende formler

$$\omega = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu}$$

Hvor

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$$

I det følgende beregnes arealet af stål pr. m. altan

$$\mu = \frac{6,29 \text{ kNm}}{1,8 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m}^2 \cdot 24,1 \text{ MPa}}$$

$$\mu = 0,0906$$

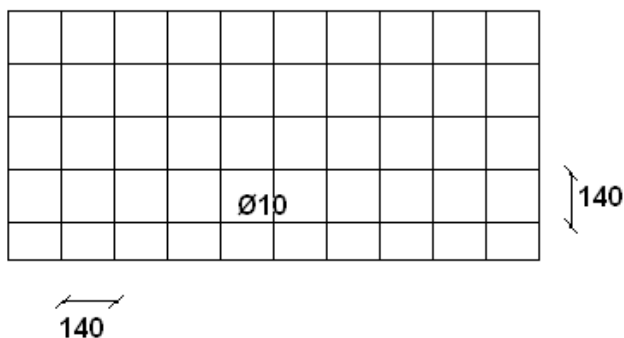
$$\omega = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,0906}$$

$$\omega = 0,023$$

$$A_s = 0,023 \cdot \frac{1,8 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 24,1 \text{ MPa}}{295,8 \text{ MPa}}$$

$$A_s = 130 \text{ mm}^2$$

Der bruges derfor et armeringsnet med $\varnothing 10$ pr 140 mm.



Figur 6: Armeringsnet

Med dette armeringsnet er nu bevist at altandækket kan holde til momentet uden at bryde. I det følgende vil eftervises forskydningsbæreevne, bæreevne af vederlag, udbøjning og revnevidde.

Vederlag

Altandækket ligger af på ydermuren af kalksandsten. Denne mur har eksisteret i lang tid, og styrken er derfor forringet. Der regnes derfor med en værdi for bæreevnen på 1 MPa, for at være på den sikre side.

Vi kender lasten, som er den dimensionerende last på $6,15 \frac{kN}{m^2}$.

Altandækket er understøttet i begge ender, så lasten går til begge sider, sådan at hver understøtning skal tage halvdelen af belastningen hver.

Der benyttes følgende formler til vederlags beregning⁷

$$F_{Ed} \leq f_m \cdot b$$

$$P = 6,15 \frac{kN}{m^2}$$

Bæreevne af kalksandsten:

1 MPa

Halvdelen af lasten til hver understøtning:

$$\frac{6,15 \frac{kN}{m^2} \cdot 1,8m}{2} = 5,5 \frac{kN}{m}$$

Der ganges med de 1,8 m. for at få lasten pr. m. længde af altanen.

Der omregnes til $\frac{N}{mm}$ fra $\frac{kN}{m}$:

$$F_{Ed} = 5,5 \frac{kN}{m} = 5,5 \frac{N}{mm}$$

Vi har nu belastningen pr vederlag pr mm og bæreevnen af kalksandsten MPa. MPa er kraft pr. arealenhed. Altså skal det ganges med en længdeenhed for at de to værdier svarer til hinanden og kan samlines. For at finde ud af hvor bred understøtningen skal være ganges denne på bæreevnen af kalksandsten. Deraf fås en ligning med en ubekendt.

$$F_{Ed} \leq f_m \cdot b$$

$$5,5 \frac{N}{mm} \leq 1 MPa \cdot b$$

$$b \geq 5,5 mm$$

⁷ Teknisk Ståbi

Altså behøver vederlaget ikke at være bredere end 5,5 mm. Muren er en helstensmur og altså over 5,5 mm bred. Derfor er det nu bevist at understøtningen overholder bæreevneberegningen.

Udbøjning

Det er nu bevist at altandækket kan holde til lasten uden at bryde. Der er også krav til udbøjningen som i det følgende undersøges.

Moment:

Momentet regnes, da der i denne beregning bruges karakteristiske laster og ikke regningsmæssige, som i det foregående.

$$P = 5,5 \frac{kN}{m^2} + 2,4 \frac{kN}{m^2} = 4,9 \frac{kN}{m^2}$$

Der ganges med en enhedsmeter for at have lasten i kraft pr. længde af altanen.

$$P = 4,9 \frac{kN}{m}$$

Formlen for moment er⁸

$$\frac{1}{8} \cdot P \cdot l^2$$

Momentet fås:

$$\frac{1}{8} \cdot 4,9 \frac{kN}{m} \cdot (2,86 m)^2 = 5,01 kNm$$

Inertimomentet for beton regnes i det følgende.

Betontværsnittet er rektangulært. Derfor bruges følgende formel for inertimoment⁹:

$$I_{co} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

$$I_{co} = \frac{1}{12} \cdot 1800 mm \cdot (80 mm)^3$$

Momentet fås til

$$I_{co} = 7,68 \cdot 10^7 mm^4$$

⁸ Teknisk ståbi

⁹ Teknisk ståbi

Inertimomentet for stålet regnes som inertimomenter for cirkler, da armeringsstænger har et cirkulært tværsnit.

Formlen for inertimoment for cirkulære tværsnit er¹⁰

$$I_s = \frac{\pi}{64} \cdot d^4$$

Inertimomentet fås således til:

$$I_s = \frac{\pi}{64} \cdot (10 \text{ mm})^4 = 490,87 \text{ mm}^4$$

Der ligger en armeringsstang pr. 14 cm. For at beregne hvor mange stænger der ligger pr. m. divideres en meter med de 14 cm:

$$\frac{1000 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = 7,14$$

Der regnes derfor med 7 stænger pr. m.

Vi skal nu have fundet Inertimomentet af det både beton og stål sammen. Da stål vejer mere end beton og altså bidrager med mere til inertimomentet ganges en α -værdi på stål-leddet. Denne værdi kan findes i teknisk ståbi og er i dette tilfælde fundet til 5. Der ganges også med 7 idet der er 7 stænger pr m.

$$I_t = I_{co} + 5 \cdot I_s \cdot 7$$

Deraf fås det samlede inertimoment til:

$$I_t = 7,682 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Til beregningen af udbøjningen skal også beregnes, κ , som beregnes vha. følgende formel¹¹

$$\kappa = \frac{M}{E_{cm} \cdot I_t}$$

Hvor

M er momentet, som beregnet tidligere i dette afsnit

E_{cm} som er E-modulet for beton. Fundet til 2600 MPa¹²

Deraf fås:

¹⁰ Teknisk ståbi

¹¹ Betonkonstruktioner s. 89

¹² Dansk standard

$$\kappa = \frac{5010000Nmm}{2600 MPa \cdot 7,682 \cdot 10^7 mm^4} = 0,000003$$

Udbøjningen beregnes nu vha. Følgende formel:

$$u_{max} = \frac{5}{48} \cdot \kappa \cdot l_s^2$$

l_s , i dette tilfælde, er længden af altandækket.

$$u_{max} = \frac{5}{48} \cdot 0,000003 \cdot (2860 mm)^2 = 2,56 mm.$$

Hvis udbøjningen er mindre end $\frac{l}{250}$ vil det normalt sikre konstruktionens udseende og generelle anvendelighed.

Hvis udbøjningen er mindre end $\frac{l}{500}$ vil det normalt sikre tilstødende konstruktionsdele¹³

$$\frac{2860}{250} = 11,44 mm$$

$$\frac{2860}{500} = 5,72 mm$$

Udbøjningen overholder altså grænserne.

Revnevidde

I en betonkonstruktion vil der som regel forekommer revner. Disse revner er nødvendige for at armeringens bæreevne kan udnyttes fuldt ud. Der er regler for hvor store disse revner er, da der vil kunne trænge vand ind til armeringen hvis revnerne er for store. Vand som går i forbindelse med stål vil få det til at korrodere og gøre bæreevnen mindre, samt få armeringen til at udvide sig, så betonen revner yderligere.

Revnvidden findes vha. følgende formler¹⁴

$$\alpha = 7,7$$

$$\frac{\alpha \cdot A_s}{b \cdot d} = \frac{7,7 \cdot 561 mm^2}{1800 mm \cdot 40 mm} = 0,06$$

¹³ Betonkonstruktioner s. 89

¹⁴ Beton konstruktioner

$$\beta = 0,06 \cdot \sqrt{\frac{2}{0,06} + 1} - 1 = 0,29$$

$$\varphi_b = \frac{1}{6} \cdot \beta \cdot (3 - \beta) = 1,13$$

$$\gamma = \frac{1 - \beta}{\beta} = 2,44$$

$$\sigma_c = \frac{M}{\varphi_b \cdot b \cdot d^2} = 13,38 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = \alpha \cdot \gamma \cdot \sigma_c = 7,7 \cdot 2,44 \cdot 13,38 = 251,38 \text{ MPa}$$

Betons trækstyrke er fundet til¹⁵

$$f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

Det effektive areal findes til¹⁶

$$A_{c,eff} = d \cdot b = 40 \text{ mm} \cdot 1800 \text{ mm} = 72000 \text{ mm}^2$$

Arealet af stålet¹⁷

$$A_s = 561 \text{ mm}^2$$

Ståls E-modul findes til¹⁸

$$E_s = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ er den største værdi af

$$\frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t}{E_s} \cdot \left(\frac{A_{c,eff}}{A_s} + \alpha \right) \cdot f_{ctm}$$

Og

$$0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\frac{251 \text{ MPa}}{2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}} - \frac{0,6}{2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}} \cdot \left(\frac{72000 \text{ mm}^2}{561 \text{ mm}^2} + 7,7 \right) \cdot 3,2 \text{ MPa} = 0,000047$$

¹⁵ Teknisk ståbi

¹⁶ Beton konstruktioner

¹⁷ Teknisk ståbi

¹⁸ Teknisk ståbi

$$0,6 \cdot \frac{251 \text{ MPa}}{2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}} = 0,001195$$

Altså er $\epsilon_{sm} \cdot \epsilon_{cm} = 0,001195$

$$S_{r,max} = 1,3 \cdot (h - x)$$

$$1,3 \cdot 40 \text{ mm} = 52 \text{ mm}$$

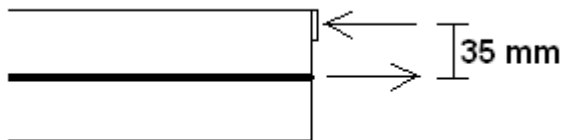
Revnevidden findes herefter til¹⁹

$$W_k = 52 \cdot 0,001195 = 0,062 \text{ mm}$$

Dette overholder normen for revnevidde.

Eftervisning af bæreevne

I det følgende laves en simpel beregning af bæreevnen, for at eftertjekke om det virkelig holder.



Momentet, som tidligere er beregnet bruges:

$$M = 5,01 \text{ kNm}$$

$$5,01 \text{ kNm} / 0,035 \text{ m} = 143,143 \text{ kN}$$

Først tjekkes om betonens tværsnitsareal kan holde til belastningen.

Beton

Da belastningen kommer ovenpå dækket og trykker ned, vil der opstå tryk i oversiden af tværsnittet og træk i undersiden. Altså tryk på betonen og træk i armeringen.

Der regnes med en trykzone på 10 mm.

$$\frac{143134 \text{ N}}{1000 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}} = 14,31 \text{ MPa}$$

¹⁹ Beton konstruktioner

Vi ved fra tidligere at beton har en trykstyrke på 24,1 MPa.

$$14,31 \text{ MPa} < 24,1 \text{ MPa}$$

Heraf ses det at betonen godt kan holde til belastningen.

Stål:

$$\frac{143143 \text{ N}}{561 \text{ mm}^2} = 255,16 \text{ MPa}$$

Stålets trykstyrke er tidligere fundet til

$$F_{yd} = 295,8 \text{ MPa}$$

$$295,8 \text{ MPa} > 255,16 \text{ MPa}$$

$$295,8 \text{ MPa} > 255,16 \text{ MPa}$$

Det ses her at stålet også kan holde til belastningen. Altså viser denne beregning også at altanen holder.

Konklusion

Altanen kan altså bygges med en tykkelse på armering + dæklag

$$2 \cdot 10 + 2 \cdot 35 = 90 \text{ mm}$$

Og med et armeringsnet med $\varnothing 10$ pr. 140mm.

DTU Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Technical University of Denmark

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

www.byg.dtu.dk