

Brug af aske i beton – nye problemer nye muligheder

Anvendelse af røggasaske i beton



Katharina Lyngholm

BEng

Department of Civil Engineering
2012

DTU Civil Engineering
Januar 2012

Forord

Denne rapport er resultatet af et bachelorprojekt udført på Danmarks Tekniske Universitet, DTU, i perioden fra 3. september 2012 til 7. januar 2013, under vejledning af Lisbeth M. Ottosen.

Projektet er på 20 ECTS. Målgruppen er andre studerende og undervisere på DTU.

Projektet tager udgangspunkt i anvendelsesmulighederne af røggasaske i beton. Formålet er at undersøge denne røggasaske, som på nuværende tidspunkt er et farligt affaldsprodukt og definere askens egenskaber, med øje for anvendelse i betonindustrien og derved gøre et farligt affaldsprodukt til et værdifuldt byggemateriale.

I forbindelse med udarbejdelsen af projektet rettes en stor tak til Lisbeth M. Ottosen, Ebba Cederberg Schnell, Pernille Erland Jensen, Christina Maria Winther Dufke, Sabrina Madsen, Per Goltermann og Marc Lund Frederiksen for hjælp, assistance og sparring.

Rapporten er udført af Katharina Lyngholm.

Kongens Lyngby, 7. januar 2013.

Abstract

The amount of raw materials is shrinking while the production and consumption in the building industry are still growing and growing. The production of cement causes waste of resources and contributes heavily to CO₂ production.

About 5 % of the CO₂ emission in the world is due to cement production. Another contribution to the CO₂ emission is the transportation of waste products to other countries for deposition, which also is very costly. By using ashes from waste incineration in concrete we can improve the environmental and economic situation.

The purpose of this report is to study if flue gas ash from waste incineration can be used in concrete and thereby replace some of the cement. The studies are made by performing a series of laboratory tests for characterizations of the ash. Since flue gas ash contains a high level of metal and ion concentration, the amount and mobility of these metal and ion concentrations has been examined. The strength development of hardened mortar containing flue gas ash is also being studied. And the results show that the strength achieved in some cases with flue gas ash is similar to the strength achieved by only using cement in the mortar.

This report shows that there are potential for use of flue gas ash in concrete due to the strength development and workability, but the flue gas ash still has some flaws, which makes it unacceptable for use in concrete. The flue gas ash has to be adjusted considering the chloride concentration, the amount of organic material and the mobility of elements by leaching, so that the ash can fulfil the requirements for use in concrete.

Indholdsfortegnelse

Forord.....	1
Abstract.....	2
Indledning.....	5
Teori.....	6
Røggasaske	6
Anvendt røggasaske til forsøg	6
Beton	7
Styrke.....	7
Holdbarhed	8
Krav til beton.....	10
Betons sammensætning	11
Karakteristik af røggasaske	14
Saltindhold	14
Oplukning af røggasaske	15
Leaching	15
Glødetab	15
Vandindhold	16
Ledningsevne	16
Bufferkapacitet.....	16
pH.....	16
Porøsitet og densitet.....	17
Kapillarsugning	18
Metode.....	19
Mørtelstøbning	19
Trykprøvning	21
Ultralyd	22
Karakteristik af røggasaske	22
Saltindhold	22
Oplukning af røggasaske	22
Leaching	23
Glødetab	23
Vandindhold	24
Ledningsevne	24
pH.....	24
Vandopløselighed	24
Bufferkapacitet.....	25
Densitet af røggasaske	25
Porøsitet og densitet.....	25
Kapillarsugning	26
Resultater og diskussion.....	27
Trykstyrke.....	27
Yderligere trykstyrkeforsøg	30
Ultralyd	32
Karakteristik af røggasaske	33
Saltindhold	33
Oplukning af røggasaske	35
Leaching	37
Glødetab	38

Mikroskopdata (SEM)	39
pH og ledningsevne	41
Bufferkapacitet.....	42
Densitet af aske	43
Porøsitet og densitet af mørtelprøver.....	43
Kapillarsugning	45
Konklusion.....	47
Videre forskning	48
Styrkeudvikling og chloridindhold	48
Tungmetaller	48
Knusning af aske.....	48
Armering	48
Hærdetid	48
Glødetabet	48
Litteraturliste	49
Litteratur	49
Bilag.....	49
Appendix: BMA-vejledninger	50

Bilagsoversigt

Bilag 01 – E-mail korrespondance med Pernille E. Jensen
Bilag 02 – ICP Teori
Bilag 03 – Ionchromatograf teori
Bilag 04 - Porøsitet, densitet og kapillarsugning.
Bilag 05 - Gipskompositter.
Bilag 06 – Leaching af tungmetaller fra aske
Bilag 07 - Mørtelstøbninger
Bilag 08 – Rådata fra trykprøvning
Bilag 09 – Rådata fra IC måling
Bilag 10 – Rådata fra ICP måling for oplukning
Bilag 11 – Rådata fra leaching
Bilag 12 – Organisk stof
Bilag 13 - Vandindhold
Bilag 14 - Vandopløselighed
Bilag 15 – Bufferkapacitet
Bilag 16 – Densitet af røggasaske
Bilag 17 – Porøsitet og densitet
Bilag 18 – Rådata for kapillarsugning
Bilag 19 – Kemisk indhold i ubehandlet røggasaske

Indledning

Omkring 5% af verdens CO₂ udslip skyldes cementproduktion, halvdelen skyldes afbrænding af fossile brændstoffer til opvarmning af roterende cement-brændeovne. Den anden halvdelen skyldes kalcinering, som er en proces hvor kalk, CaCO₃, opvarmes til et punkt hvorved CO₂ frigives. (Johannesson, 2012)

En reduktion af cement produktionen vil medføre en reduktion af CO₂ udslip og derved gavne miljøet.

Ønsket er derfor at kunne erstatte en del af cementindholdet i beton med alternative asker, her røggasaske fra affaldsforbrænding, for derved at reducere cement produktionen og omkostningerne herved. Samtidig ønskes også at mindske deponering af røggasaske, der er forbudt i Danmark på grund af højt tungmetalindhold, som derfor bliver transporteret til udlandet. Denne transport udgør også en uønsket CO₂ produktion som ligeledes er skadeligt for miljøet.

I Danmark har vi 3,7 millioner tons affald per år, heraf produceres 90.000 tons røggasaffald per år. Deponeringsomkostninger for røggasaffald er omkring 600 kroner per ton og det er uden medregning af transportomkostninger som ligger et sted mellem 100-200 kroner per ton røggasaffald. (Jensen, 2010)

At benytte affaldsprodukter som alternative asker i beton, har derfor også en økonomisk betydning, da der kan spares mange penge på affaldsafgifter, samt transport og samtidig tjenes penge, på at sælge røggasaske til byggeindustrien. Brug af røggasaske vil også medføre en besparelse i cementforbrug, som er et dyrt byggemateriale.

Denne rapport vil derfor belyse undersøgelser og vurderinger af muligheden for brug af røggasaske i beton.

Røggasasken der benyttes, har forud for projektet været igennem en elektrodiaylsebehandling for at udskille de mest mobile tungmetaller og salte i asken.

Igennem projektet vil røggasasken blive karakteriseret ved forskellige laboratorieforsøg og der støbes mørtelprøver med forskellige mængder af aske som erstatning for cement og for sand. Trykstyrken for de forskellige typer mørtelprøver med røggasaske, sammenlignes med referenceprøver som er støbt med basis aalborg cement. Røggasaskens egenskaber vurderes og holdes op imod krav for anvendelse i beton.

Igennem nogle af de foretagne forsøg sammenlignes resultaterne fra røggasaske med cement og flere af disse forsøg foretages også på vasket røggasaske, til sammenligning.

Teori

Røggasaske

Røggasaske fra affaldsforbrænding udgør en potentiel ressource til brug i beton, da røggasaske minder om kulflyveaske der et velegnet biprodukt til beton, som udvindes fra kulfyringskraftværker. Der er dog imidlertid et stort problem ved røggasaffald, da indholdet af vandopløselige salte og tungmetaller er stort, hvilket kan have en negativt indflydelse på egenskaberne for beton.

Der arbejdes derfor på at udskille disse tungmetaller og salte fra røggasasken for således at gøre røggasaffald til en værdifuld ressource i beton produktion. Samtidig ønsker man at separere udskilte tungmetaller som bly og zink, som forekommer i større mængder i røggasaffald, da disse i deres primære forekomst svinder ind.

Udskillelsen af mobile tungmetaller og salte fra røggasasken sker ved elektrodialytisk ekstraktion, hvor asken blandes med en væske hvorefter denne væske føres igennem såkaldte ionbyttermembraner som kun er gennemtrængelige for anioner og kationer, hvorved ioner fra mobile stoffer i asken udtrækkes. (Jensen, 2010)

Anvendt røggasaske til forsøg

Den røggasaske der bliver anvendt i dette projekt kommer fra affaldsforbrændingsanlægget REFA A/S, og er fra forsøget kaldet REFA 9, hvor elektrodialysebehandlingen er kørt ved 3 ampere i 10 timer. Ved dette forsøg har asken reelt været udsat for elektrodialyse i 1,9 timer. Asken har inden rensning, været udsat for karbonisering. (Bilag 1 – E-mail korrespondance med Pernille E. Jensen)

Ved forsøg til bestemmelse af askens densitet og mørtelprøvers kapillarsugning, porøsitet og densitet er der brugt røggasaske fra forsøget REFA 5, som minder om REFA 9. Dette skyldes at røggasasken fra REFA 9 var brugt op.

REFA 5, er ligesom REFA 9 karboniseret før elektrodialysebehandlingen. Ved dette forsøg, har behandlingen kørt ved fem ampere i 14,5 timer, hvilket betyder en reel opholdstid for asken i elektrodialyse i 2,7 timer.

Ved forsøg REFA 5, var strømstyrken ved forsøgets afslutning faldet til fire ampere, fordi ledningsevnen i prøven var faldet. (Bilag 1 – E-mail korrespondance med Pernille E. Jensen)

Beton

Beton består af cement, vand og tilslag i form af sand og sten, som i de rigtige blandingsmængder giver et byggemateriale med god bearbejdelighed, styrke og holdbarhed. Beton er derfor at foretrække i mange konstruktions- og bygningssammenhænge.

Betonens kvalitet betragtes hovedsagligt ved dets styrke og holdbarhed, derfor findes der en række standarder som stiller krav til netop betonstyrke og holdbarhed, for at sikre en rimelig levetid for betonkonstruktionerne, alt afhængig af anvendelsen.

Styrke

Betons styrke bestemmes ved brudstyrken, som defineres ved den maksimale last en betonkonstruktion belastes med, før et brud i konstruktionen indtræffer. Belastningen som et prøvelegeme udsættes for, kan både være i form af tryk, træk, forskydning, bøjning eller vridning. For beton er trykstyrken den mest interessante, da beton kan optage størst last ved tryk.

Denne last måles i kiloNewton (kN) og omregnes herefter til en trykstyrke i megapascal (MPa), som udtrykkes ved tryklasten over trykarealet, af følgende formel:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [MPa]} \quad [1]$$

For omregning til megapascal angives trykarealet i kvadratmillimeter, mm².

I skemaet herunder vises styrkeintervallet for beton med forskellige vand/cement-forhold og styrkeintervallet for cement mørtel. Både tryk- og trækstyrke er angivet. Trækstyrken for beton er omtrent en tiendedel af trykstyrken. Da trækstyrken er meget lav, anvendes ofte armering i betonkonstruktioner. (Gottfredsen, 2008)

	Trykstyrke [Mpa]	Trækstyrke [Mpa]
Beton v/c=0,4 (28 døg)	40-55	4-6
Beton v/c=0,6 (28 døg)	25-40	3-4
Beton v/c=0,8 (28 døg)	15-25	1-3
Cementmørtel	5-20	0,5-2

Tabel 1 – Tryk- og trækstyrker for beton og cementmørtel (Gottfredsen, 2008)

Styrken er afhængig af vand/cement-forholdet i betonblanding, for at opnå høj styrke skal vand/cement-forholdet været lavt. Dog ikke for lavt, for hvis der ikke er tilstrækkelig vand i blandingen vil bearbejdeligheden reduceres og den kemiske reaktion mellem vand og cement, vil muligvis ikke være tilstrækkelig hvorved hærdeprocessen forringes.

Holdbarhed

For at sikre holdbarheden for beton, benyttes parametre i form af miljø- og eksponeringsklasser, som udtrykker hvilke påvirkninger betonen forventes at blive udsat for, ved forskellige anvendelsesforhold. Ud fra disse påvirkninger, opstilles så en række krav som skal sikre holdbarheden for betonkonstruktion i den pågældende miljø- og eksponeringsklasse.

Miljøklasser

Miljøklasserne er opdelt i fire grupper; passivt miljø, moderat miljø, aggressivt miljø og ekstra aggressivt miljø. I skemaet herunder fremgår en beskrivelse af miljøet for hver af de fire nævnte klasser og derved hvilke påvirkninger beton kan forventes at blive udsat for. Der er i skemaet også givet eksempler på hvilke bygningsdele der typisk vil forekomme i hver af disse fire miljøklasser.

Miljø-klasse	Beskrivelse	Typiske konstruktioner
Passiv	Tørt miljø, hvor korrosion ikke forekommer	Konstruktioner i indendørs tørt miljø, jorddækkede fundamenter i lav eller normal sikkerhedsklasse
Moderat	Fugtigt miljø, hvor der ikke er risiko for frostpåvirkning i kombination med vandmætning, og hvor der ikke i nævneværdig grad kan tilføres alkalier og/eller klorider til betonoverfladen	Fundamenter delvis over terræn, jorddækkede fundamenter i høj sikkerhedsklasse, udvendige vægge, facader og søjler, udvendige bjælker med konstruktiv beskyttet overside, altanbrystninger, installationskanaler, ingeniørgange, elevatorgruber, konstruktionsdele i svagt aggressivt grundvand
Aggressiv	Fugtigt miljø, hvor der kan tilføres alkalier og/eller klorider til betonoverfladen, eller hvor der forekommer kraftig fugtbelastning med risiko for vandmætning i kombination med frostpåvirkning	Udvendige dæk og bjælker uden konstruktiv beskyttet overside, støttemure, lyskasser, udvendige trapper, kælderydervægge delvis over terræn samt kanaler og gruber og andre konstruktionsdele i moderat aggressivt grundvand
Ekstra aggressiv	Fugtigt miljø, hvor der enten tilføres eller ophobes store mængder alkalier og/eller klorider ved betonoverfladen	Altangange, altanplader og altankonsoller, parkeringsdæk, svømmebade, søjler og kantbjælker på broer, marine konstruktioner i splashzone

Figur 1 – Miljøklasser, herunder påvirkninger og bygningsdele (Aalborg Portland, 2010)

Eksponeringsklasser

Udover miljøklasserne, anvendes også eksponeringsklasser til at definere påvirkninger af betonkonstruktioner, hvis eksempelvis beton eksponeres for salt, syre eller frost.

Nedenfor er en oversigt over eksponeringsklasserne.

X0	Ingen risiko for korrosion – ingen armering eller meget tørt
XC1, XC2, XC3, XC4	Risiko for korrosion forårsaget af karbonatisering
XD1, XD2, XD3	Risiko for korrosion forårsaget af andre klorider end havvand
XS1, XS2, XS3	Risiko for korrosion forårsaget af klorider fra havvand
XF1, XF2, XF3, XF4	Risiko for frost-/tø skader med eller uden tøsalt
XA1, XA2, XA3	Risiko for kemisk nedbrydning, f.eks. sulfat, syre m.v.

Figur 2 – Inddeling af eksponeringsklasser efter risici (Aalborg Portland, 2010)

Tallet i hver notation for eksponeringsklasse indikerer aggressivitet, jo højere tal, jo større aggressivitet.

Sammenhæng mellem miljø- og eksponeringsklasser

I DS2426, som er en dansk tillægsstandard, er sammenhængen mellem miljø- og eksponeringsklasserne vist.

Miljøklasser	Passiv	Moderat	Aggressiv	Ekstra Aggressiv
Eksponeringsklasser	X0	XC2	XD1	XD2
	XC1	XC3	XS1	XD3
		XC4	XS2	XS3
		XF1	XF2	XF4
		XA1	XF3	XA3
			XA2	

Figur 3 – Sammenhæng mellem miljø- og eksponeringsklasser. (Aalborg Portland, 2010)

Heraf fremgår det at eksponeringsklasserne X0 og XC1 kan forekomme ved beton i passiv miljøklasse, eksponeringsklasserne XC2, XC3, XC4, XF1 og XA1 kan forekomme i moderat miljø, og så fremdeles.

Sammenhængen mellem miljø- og eksponeringsklasser indikerer også at en betonkonstruktion kan være påvirket af flere eksponeringsklasser samtidig. (Aalborg Portland, 2010)

Krav til beton

På baggrund af miljø- og eksponeringsklasser for betonkonstruktioner, opstilles en række krav til produktion af beton, hvorved holdbarheden sikres for de påvirkninger betonen kan risikere at blive udsat for i de respektive miljø- og eksponeringsklasser.

Aalborg Portland har i deres håndbog om cement og beton, sammensat et skema med de væsentligste krav til beton i henhold til både DS 411, DS/EN 206-1, DS 2426 og DS 482, som ses herunder.

	Miljøklasser			
	Passiv	Moderat	Aggressiv	Ekstra Aggressiv
Cementindhold	–	$\geq 150 \text{ kg/m}^3$	$\geq 150 \text{ kg/m}^3$	$\geq 150 \text{ kg/m}^3$
v/c-forhold	–	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$	$\leq 0,40$
Fillerindhold	–	–	$\geq 375 \text{ kg/m}^3$	$\geq 375 \text{ kg/m}^3$
Styrkeklasse	$\geq \text{C12}^{1)}$	$\geq \text{C25}$	$\geq \text{C35}$	$\geq \text{C40}$
Luft i frisk beton Luft i hærdnet beton	–	$\geq 4,5 \text{ vol-\%}$	$\geq 4,5 \text{ vol-\%}$ $\geq 3,5 \text{ vol-\%}$	$\geq 4,5 \text{ vol-\%}$ $\geq 3,5 \text{ vol-\%}$
Frostbestandighed	–	–	God	God
Afstandsfaktor	–	–	$\leq 0,20 \text{ mm}$	$\leq 0,20 \text{ mm}$
Tilslagsklasse Sand/Sten	P/P	A ² /M	A/A	E/E
Alkaliindhold	–	$\leq 3,0 \text{ kg/m}^3$	$\leq 3,0 \text{ kg/m}^3$	$\leq 3,0 \text{ kg/m}^3$
Kloridindhold – slap armering	$\leq 0,40 \text{ \%}$ af binder	$\leq 0,20 \text{ \%}$ af binder	$\leq 0,20 \text{ \%}$ af binder	$\leq 0,20 \text{ \%}$ af binder
Max FA / C - forhold	–	0,33	0,33	0,33
Max MS / C - forhold	–	0,11	0,11	0,11
Varighed af udtørnings- beskyttelse	$\geq 15 \text{ m.-}$ timer ³⁾	$\geq 36 \text{ m.-}$ timer	$\geq 120 \text{ m.-}$ timer	$\geq 120 \text{ m.-}$ timer
Dæklag på armering (tolerancetillæg 5 mm)	$\geq 10 (+ 5)$ mm	$\geq 20 (+ 5)$ mm	$\geq 30 (+ 5)$ mm	$\geq 40 (+ 5)$ mm

1) Gælder for armeret beton, for uarmeret beton kan styrkeklassen C8 tillige benyttes.

2) Klasse M sand er ikke defineret.

3) m.-timer = modenhedstimer (se side 80)

Figur 4 – Krav til beton i de respektive miljøklasser (Aalborg Portland, 2010)

For at opnå en bestemt miljøklasse og derved en vis holdbarhed og styrke, stilles der blandt andet krav til en nedre værdimængde af cementindholdet, samt en øvre grænse for vand/cement-forholdet.

For hver miljøklasse er der også et krav til en minimum styrke, som for de fire miljøklasser er henholdsvis 12 MPa, 25 MPa, 35 MPa og 40 MPa. (Aalborg Portland, 2010)

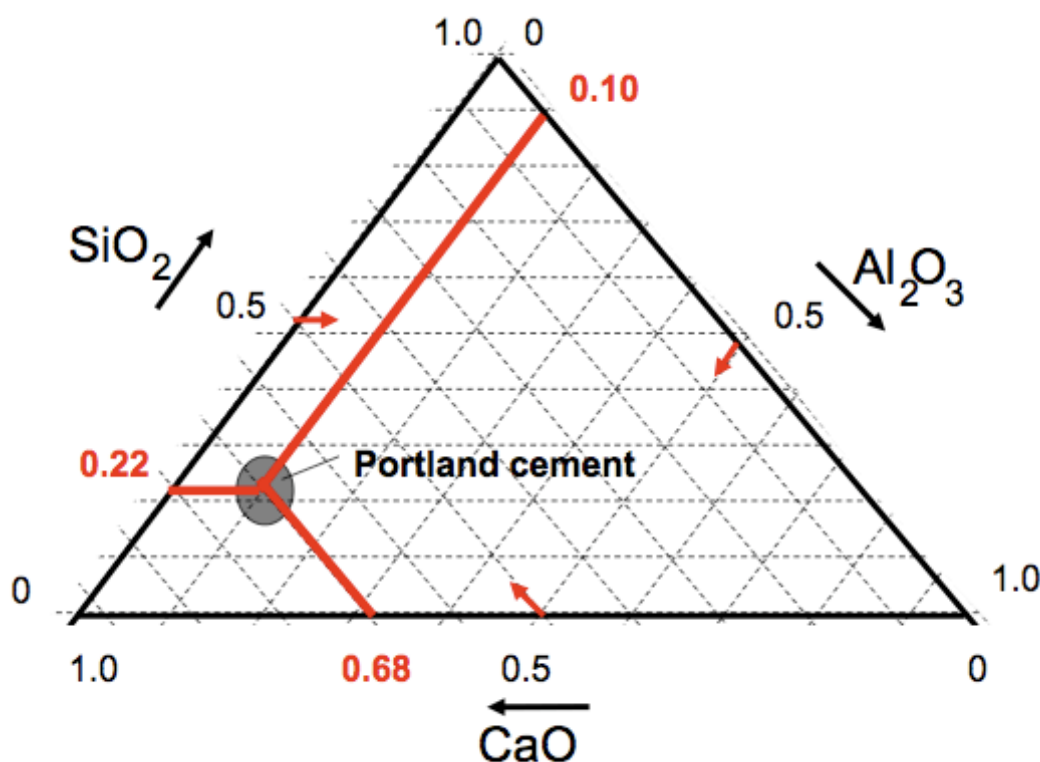
Betons sammensætning

Som nævnt tidligere består beton af cement, vand, tilslag og til tider øvrige bindemidler som flyveaske og mikrosilica. I det følgende vil disse bestanddele blive beskrevet.

Cement

Cement består af oxiderne calciumoxid (CaO), siliciumdioxid (SiO_2) og aluminiumoxid (Al_2O_3), samt jernholdige oxider, som stammer fra henholdsvis kalksten, sand og ler.

Trekanten herunder viser fordelingen af de tre hovedbestanddele i Portland cement.



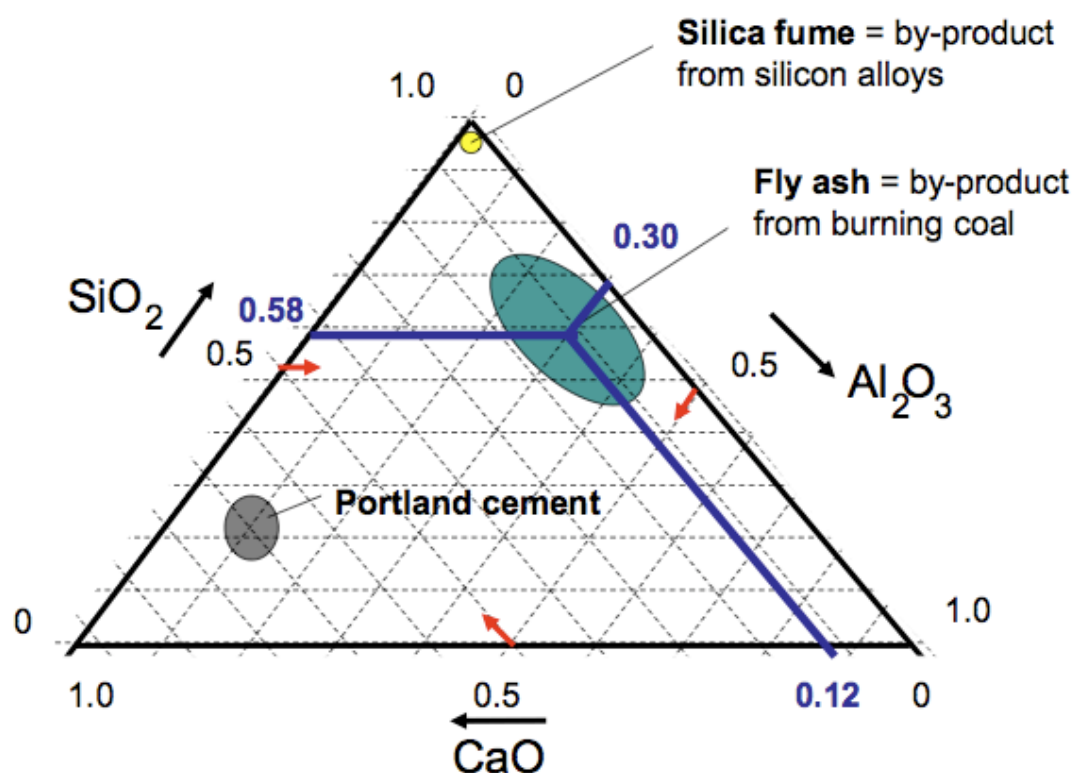
Figur 5 – Oxidtrekant for Portland cement. (Johannesson, (B), 2012)

Heraf fremgår sammensætningen af almindelig portland cement, som består af 68 % calciumoxid, 22% siliciumdioxid og 10% aluminiumoxid.

Råmaterialerne brugt til cement er; 70% kalksten som består af calciumcarbonat, 20% kvarts sand som indeholder silicium oxider og 10% ler som er rig på aluminium og jern oxider. Råmaterialerne blandes og knuses til fint pulver, blandingen kommer dernæst igennem en kalcineringsproces hvor produktet opvarmes til omkring 1000 grader, hvorved kuldioxid fra kalksten frigives og calciumoxid bliver tilbage. Herefter brændes produktet ved høj temperatur, omtrent 1450 grader, hvorved der dannes cementklinker. Cementklinkerne afkøles og der iblandes 5% gips hvorefter cementklinkerne og gipsen knuses til fint pulver. Gips tilsættes for at regulere hærdningsprocessen. Uden gips vil cementen reagere for hurtigt med vand og derved opnå ikke nær så høj styrke. (Johannesson, (A), 2012)

Kulflyveaske og mikrosilica

Af nedenstående figur ses oxidsammensætningen af kulflyveaske som er et biprodukt fra kulfyring, bestående af 58% siliciumdioxid, 30% aluminiumoxid og 12% calciumoxid. Ligeledes er produktet mikrosilica vist i trekanten, som består af siliciumdioxid og kommer fra silicium legeringer.



Figur 6 – Oxidtrekant for kulflyveaske og mikrosilica (Johannesson, (B), 2012)

Kulflyveaske og mikrosilica er tilsætningsstoffer med pozzolan effekter, grundet deres meget små partikelstørrelser. Deres pozzolan effekt, deres måde at reagere

med calciumhydroxid fra cement og derved danne bindemiddel har positiv indvirkning på betons egenskaber og er med til at gøre betonen tættere og stærkere.

Ved at tilsætte flyveaske i en betonblanding kan styrken reguleres, da flyveaske påvirker afbindingstiden og styrkeudviklingen i beton. (www.voscc.dk)

Tilslag

Tilslag, som består af sand og sten, udgør typisk 75% af volumen i beton. Valg af tilslagsmateriale er vigtigt, da tilslaget er afgørende for betonens styrke og holdbarhed. Der tages derfor højde for tilslagets egenskaber i form af blandt andet densitet, styrke, varmeudvidelseskoefficient og elasticitetsmodul. Ligeledes betragtes tilslagets resistens overfor blandt andet frost og kemiske påvirkninger. I armeret beton er det vigtigt at tilslagets maksimale kornstørrelse bestemmes således at de største sten ikke sidder fast imellem armeringsstængerne ved støbning.

Til betonstøbning i Danmark bruges *bakkematerialer* som hentes fra grusgrave, *sømaterialer* som pumpes op fra havets bund og *skærver* som er bjergartsmaterialer der bliver knust. (Geiker, 2008)

Vand

I betonstøbning bruges almindelig vand fra hanen. En tommelfingerregel er; kan det drikkes, kan det bruges i beton.

Karakteristik af røggasaske

Saltindhold

Det er yderst relevant at kende saltindholdet i røggasaske, når ønsket er at kunne anvende asken i armeret beton. Saltindholdet kan skade armeringen i beton, der kan opstå korrosion, som svækker armeringen og derved svækker betonen.

I DS/EN 206-1 er der angivet værdier for maksimalt chloridindhold i beton. Chloridindholdet bestemmes som procent af chloridioner i forhold til vægten af cement i beton.

Betonens anvendelse	Chloridindholdsklasse ^{a)}	Maksimalt Cl-forhold i forhold til cementvægten ^{b)}
Uden armeringsstål eller andet indstøbt metal med undtagelse af korrosionsbestandige løfteanordninger	Cl 1,0	1,0 %
Med armeringsstål eller andet indstøbt metal	Cl 0,20	0,20 %
	Cl 0,40	0,40 %
Med spændarmering af stål	Cl 0,10	0,10 %
	Cl 0,20	0,20 %
^{a)} For et specifikt brug af beton er valg af klasse afhængig af bestemmelser gældende på brugsstedet.		
^{b)} Hvis der anvendes type II-tilsætninger, og de er medregnet i cementindholdet, udtrykkes chloridindholdet som procent af chloridioner i forhold til vægten af cement plus den totale vægt af tilsætninger, der er medregnet.		

Tabel 2 – Maksimalt chloridindhold i beton ifølge DS/EN 206-1 (DS/EN 206-1:2002)

Som det fremgår af tabellen angiver chloridindholdsklasserne den procentdel af cementvægten der må indeholde chloridioner.

Udover at være bestemt af hvorvidt der er armering i beton eller ej, defineres chloridindholdsklasserne også efter de fire miljøklasser; Passiv (P), Moderat (M), Aggressiv (A) og Ekstra aggressiv (E).

	Miljøklasse			
	P	M	A	E
Uden armeringsstål eller andet indstøbt metal med undtagelse af korrosionsbestandige løfteanordninger	Cl 1,0	Cl 1,0	Cl 1,0	Cl 1,0
Med armeringsstål eller andet indstøbt metal	Cl 0,40	Cl 0,20	Cl 0,20 ¹⁾	Cl 0,20 ¹⁾
Med spændarmering af stål	Cl 0,20	Cl 0,20	Cl 0,20 ¹⁾	Cl 0,10

¹⁾ I specielle tilfælde kan det være nødvendigt at skærpe disse krav svarende til chloridindholdsklasse Cl 0,10.

Tabel 3 – Inddeling af chloridindholdsklasser, jf. DS 2426 (DS 2426:2009)

Som det af tabel 3 fremgår, er chloridindholdsklassen for uarmeret beton CL 1,0 uanset miljøklasse. Men så snart der er armering i betonen, har miljøklassen betydning for chloridindholdsklassen. Dog fremgår det af tabellen at de fleste chloridindholdsklasser for armeret beton er Cl 0,20.

Alligevel ønskes chloridindholdet under de 0,10% af bindingsmassen, for således at kunne benytte asken i al slags betonarbejde.

Oplukning af røggasaske

Oplukning er en metode til bestemmelse af syreopløselige metaller i røggasasken. Resultatet heraf svarer næsten til den totale metalkoncentration af undersøgte metaller i asken. Oplukningsmetoden udføres efter DS 259.

Til at måle metalkoncentrationer benyttes et analytisk måleinstrument kaldet Inductively Couple Plasma (ICP), hvor metode ICP OES (Optical Emission Spectroscopy) benyttes. Her måles lysenergi fra forskellige atomer som udsender lys af karakteristiske bølgelængder. Intensiteten af det udsendte lys fra atomerne, er proportional med koncentrationen af det pågældende grundstof i prøven. (Bilag 02 - ICP Teori)

Leaching

Leaching af tungmetaller fra aske, er en udvaskningstest hvor indholdet af mobile tungmetaller i en mørtelprøve bestemmes. Aske fra affaldsforbrænding indeholder mange tungmetaller som er giftige stoffer der er skadelige for miljøet, disse tungmetaller er oftest meget mobile og vil derfor udvaskes ved kontakt med vand og derved forurene miljøet. Da dette ikke er ønskeligt, foretages en batchleachtest til bestemmelse af mobiliteten af tungmetaller i en mørtelprøve tilsat røggasaske fra affaldsforbrænding, som sammenlignes med restproduktbekendtgørelsen nr. 1480 af 12/12/2007. For således at vurdere hvorvidt udvaskningen af tungmetaller fra mørtelprøver med røggasaske, overholder kravene. (Bilag 06 – Leaching af tungmetaller fra aske)

Glødetab

Glødetabet ved 550 grader for et prøvelegeme svarer til prøvens indhold af organisk materiale. I røggasaske, som har et stort indhold af tungmetaller, vil tungmetallerne reagere med det organiske materiale og derved blive bundet heri. Derfor er et stort glødetab uønsket, desuden har størrelsen af glødetabet betydning for effekten af luftindblandingsmidler som bruges til at gøre beton modstandsdygtig mod frost.

Ifølge DS/EN 450-1 må glødetabet for aske brugt i beton ikke overstige;

5% for kategori A

7% for kategori B

9% for kategori C

Kategorierne benyttes i forbindelse med den enkelte anvendelse af betonen hvori asken indgår og hvilken eksponeringsklasse betonen udsættes for. I DS/EN 206-1 er det anført at glødetabet for flyveaske og slamaske skal opfylde kravet til kategori A. Derfor må glødetabet for røggasaske ikke overstige 5%, ved anvendelse i beton.

Vandindhold

Vandindholdet i et materiale er den mængde vand der er fysisk bundet i materialet. I nogle materialer findes også kemisk bundet vand, men det er ikke af interesse for bestemmelse af vandindholdet i røggasaske. Hvordan vandet er bundet til materialet angiver hvor kraftig bindingen af vand er og dermed hvor meget energi der skal til for at fjerne det. Fysisk bundet vand er fordampeligt vand og afgives derfor ved fordampning. Så ved en temperatur på lidt over vands kogepunkt, 105 grader, fordamper den fysiske bundne mængde vand fra materialet.

Vandindholdet i procent som betegnes u [%] beregnes på følgende måde:

$$u \% = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad [2]$$

Hvor m_1 er massen af aske med fysisk bundet vand og m_0 er massen af asken tørret ved 105 grader i et døgn. (Gottfredsen, 2008)

Ledningsevne

Ledningsevnen er et udtryk for hvor elektrisk ledet en væske er, altså hvor nemt elektrisk strøm kan ledes igennem. Ledningsevnen afhænger af antallet af elektrisk ledet ionpartikler i væsken. Ved at måle ledningsevnen i en askeprøve opblandet i destilleret vand, fås et indtryk af ionkoncentrationen og ionernes aktivitetsforhold i den opblandede væske, og derved et udtryk for hvor godt elektrisk strøm kan ledes igennem.

Elektrisk ledningsevne måles i Siemens, måleinstrumenter angiver enheden i milliSiemens per centimeter, mS/cm og SI-enheden er milliSiemens per meter, mS/m. (BMA-vejledning "Måling af ledningsevne i jord")

Bufferkapacitet

Bufferkapacitet er en undersøgelse der foretages for at måle den basiske askes evne til at modstå ændringer i pH. Det undersøges hvorvidt asken i en vandblanding reagerer med syre og derved falder i pH.

For beton, ønskes en høj modstandsevne i forhold til pH ændringer, da der ved syreangreb på beton, ønskes at bevare en høj pH i betonen, for således at beskytte armeringen.

pH

Ved anvendelse af aske i beton ønskes en høj pH værdi, da det er med til at beskytte armeringen og derved også forlænge betonens levetid, som kan blive udsat for salt eller syreangreb. pH værdien for cement typisk ligger mellem 12 og 14.

Porøsitet og densitet

Porøsiteten af beton har indvirkning på betonens styrke. Poremængde og porestørrelse i beton afhænger af vand/cement forholdet. Jo lavere vand/cement forhold, jo lavere porøsitet og derved højere styrke og bedre holdbarhed. Dog ikke ved alt for lavt vand/cement forhold, da betonen herved vil blive tør og derved porøs. Omvendt jo højere vand/cement forhold, jo højere porøsitet og dermed lavere betonstyrke og større mulighed for skader på betonen.

Porøsiteten i et materiale er forholdet mellem porevolumen og materialets ydre volumen.

Poresystemet i de fleste porøse materialer består af åbne porer og derfor betegnes den åbne porøsitet som den totale porøsitet.

$$p = p_a = \frac{V_a}{V} = \frac{\frac{m_{ov}-m_0}{\rho_w}}{\frac{m_{ov}-m_u}{\rho_w}} = \frac{m_{ov}-m_0}{m_{ov}-m_u} \quad [3]$$

V prøvelegemets volumen [m^3]

V_a voluminet af de åbne porer [m^3]

m_{ov} massen af prøvelegemet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand (engelsk: saturated surface dry = m_{ssd}) [kg]

m_0 massen af prøvelegemet efter ovntørring ved 105 °C [kg]

m_u massen af prøvelegemet under vand [kg]

ρ_w densiteten af vand [kg/m^3] ($\rho_w = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ved 20°C)

Når ovenstående elementer kendes, kan også tørdensiteten af prøvelegemet bestemmes

$$\rho_d = \frac{m_0}{V} \text{ [kg}/\text{m}^3] \quad [4]$$

samt densiteten af prøvelegemet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand (Saturated surface dry)

$$\rho_{ssd} = \frac{m_{ov}}{V} \text{ [kg}/\text{m}^3] \quad [5]$$

Densiteten er angivet ved masse per volumen og kan sammenlignes med tabelværdier for mørtelprøver. Densiteten er brugbar ved proportionering af beton.

Et materialets porøsitet kan også bestemmes ved densiteten, ved brug af følgende formel:

$$p = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_f} \quad [6]$$

Hvor ρ_d er tørdensiteten i kg/m^3 og ρ_f er faststofdensiteten som for beton, cementmørtel og tegl er 2650 kg/m^3 . (Gottfredsen, 2008)

Kapillarsugning

Kapillarsugning er betegnelsen for et materiales evne til at transportere vand fra dets overflade og ind i materialet. Det sker ved opsugning af vand gennem kapillarporerne.

Ved nedestående formel bestemmes den opsugede vandmasse per opsugningsareal, Q , som angives i kg/m^2 . (Bilag 04 - Porøsitet, densitet og kapillarsugning)

$$Q = \frac{m_t - m_0}{A} [\text{kg/m}^2] \quad [7]$$

m_t er massen af prøvelegemet til tiden t [kg]

m_0 er tørmassen af prøvelegemet [kg]

A er opsugningsarealet [m^2]

Når Q er bestemt, kan kapillartallet, k , også bestemmes ved følgende formel.

$$k = \frac{Q}{\sqrt{t}} [\text{kg/m}^2/\text{s}^{1/2}] \quad [8]$$

Hvor t er tiden efter det antal minutter prøven har stået til opsugning i vand.

Når kapillartallet er stort foregår opsugningen af vand i materialet hurtigt, mens et lavt kapillartal er udtryk for langsom opsugning i materialet. Kapillartallet har betydning for betons evne til at opsuge vand i regnvejr. (Gottfredsen, 2008)

Kapillartal opnået ved forsøg kan sammenlignes med tabelværdier, som er angivet i Tabel 5, i bogen Bygningsmaterialer – Grundlæggende egenskaber.

Metode

Mørtelstøbning

Der støbes som udgangspunkt fire forskellige typer, med forskreven blanderecept:

A – Referenceprøve: 450 gram cement, 225 gram vand og 1350 gram sand.

B – 10% cement erstattet med aske: 405 gram cement, 45 gram aske, 225 gram vand og 1350 gram sand, samt eventuelt ekstra vand.

C – 20% cement erstattet med aske: 360 gram cement, 90 gram aske, 225 gram vand og 1350 gram sand, samt eventuelt ekstra vand.

D – 10% sand erstattet med aske: 450 gram cement, 135 gram aske, 225 gram vand og 1215 gram sand, samt eventuelt ekstra vand.

Mørtelprøverne støbes efter DS/EN 196-1. Således at der for hver type, støbes tre mørtelprøver per blanderecept. De fire mørteltyper støbes som både 7-, 14-, 28- og 42-døgns prøver.

I løbet af projektet er der eksperimenteret med yderligere mørtelstøbninger. Der er blandt andet støbt mørtelprøver af type B og C, med både tørret og vasket aske.

I skemaet herunder er vist nogle af de mørtelstøbninger der er foretaget, her ses den præcise afvejede mængde af vand, cement, aske og sand, samt vand/cement-forholdet for den pågældende prøve. For information om alle øvrige mørtelprøver der er støbt, henvises til Bilag 07 – Mørtelstøbninger.

Prøver med 10% aske erstatter cement								
Type	Dato	Lufttemp. [°C]	Cement [g]	Aske [g]	Vand [g]	Sand [g]	Ekstra vand [g]	v/c-forhold
B (DS/EN 196-1)		20 ± 2	405 ± 2	45 ± 2	225 ± 1	1350 ± 5		
B 7d	06.09.12	25	405,40	45,10	225,10	1350,00	0,00	0,50
B 14d	17.09.12	24	405,17	44,90	225,01	1350,31	0,00	0,50
B 28d	04.10.12	24	404,96	45,06	225,06	1350,09	0,00	0,50
B 42d	17.09.12	24	405,34	44,95	225,05	1350,02	0,00	0,50
B 7d vasket	22.10.12	23	404,99	44,98	225,01	1350,09	0,00	0,50
B 7d tørret	22.10.12	23	405,01	43,68	224,56	1349,81	0,00	0,50
B 14d tørret	22.11.12	22	405,03	45,02	224,99	1350,04	0,00	0,50
B 14 d vasket	22.11.12	23	404,99	45,09	225,05	1350,05	0,00	0,50
B 28 d vasket	22.11.12	23	405,07	45,10	225,04	1350,00	0,00	0,50
Prøver med 20% aske erstatter cement								
Type	Dato	Lufttemp. [°C]	Cement [g]	Aske [g]	Vand [g]	Sand [g]	Ekstra vand [g]	v/c-forhold
C (DS/EN 196-1)		20 ± 2	360 ± 2	90 ± 2	225 ± 1	1350 ± 5		
C 7d	06.09.12	25	360,00	90,00	224,95	1350,13	76,20	0,67
C 7d ny	27.09.12	24	359,97	90,43	225,07	1350,16	26,61	0,56
C 14d	11.10.12	22	360,05	90,04	225,02	1350,03	13,02	0,53
C 28d	04.10.12	24	360,01	90,35	225,02	1350,38	10,00	0,52
C 42d	04.10.12	24	360,24	89,98	225,11	1350,21	10,00	0,52
C 7d vasket	22.10.12	23	360,10	89,98	225,00	1350,07	10,00	0,52

Tabel 4 – Blanderecepter for forskellige mørtelprøver

Trykprøvning

Trykprøvning udføres i henhold til DS/EN 196-1 og foregår på en tryk maskine kaldet Toni 3000. Prøverne ligges ind mellem to identiske ståklodser med en bredde på 50 millimeter, som det ses på billederne herunder. De øvrige ståklodser placeres over og under prøven for at fylde afstandsrummet ud mellem de to (røde) trykplader.



Figur 7 – Placering af prøver i Toni 3000

Før trykprøvning, måles op til placering af den store ståklods, således at denne ligger præcis på midten af den kvadratiske (røde) bundplade. Ligeledes placeres de to identiske ståklodser og den cylinderformede topklods så centralt som muligt, for således at opnå den mest centrale last på prøven og derved det mest jævne tryk over trykarealet. Desuden vendes alle mørtelprøver 90 grader i forhold til deres placering i støbeformen, for således at sikre at der trykkes på den mest plane overflade og derved fås det mest stabile trykprøvesæt.

Trykprøvning udføres i henhold til DS/EN 196-1. Dog er ståpladerne som er i kontakt med prøven, 50 millimeter brede og ikke de i standarden forskrevne 40 millimeter.

Ultralyd

En ultralydmåling måler gennemgangen af strøm igennem et materiale.

Ultralydmålingen foretages ved at smøre gel på lydhovederne, som derefter holdes på hver ende af mørtelprøven. Gennemgangstiden aflæses på ultralydsmåleren. Før måling af mørtelprøver, skal ultralydmåleren kalibreres på en kalibreringsklods af stål, hvor dennes kendte gennemgangstid kontrolleres. (Bilag 05 – Gipskompositter)

Karakteristik af røggasaske

Gennem et antal laboratorieforsøg analyseres og karakteriseres røggasasken. I det følgende vil hvert forsøg kort blive beskrevet.

Saltindhold

Indholdet af salte i røggasaske bestemmes ved hjælp af ionchromatografi. En prøve til ionchromatografi laves ved at afveje 10,00 gram aske og tilsætte 50 milliliter destilleret vand i en plastikflaske og lade denne stå på rystebord natten over. Herefter filtreres prøven med sprøjtefilter og er nu klar til ionchromatografen. (BMA-vejledning "Vandopløselige anioner")

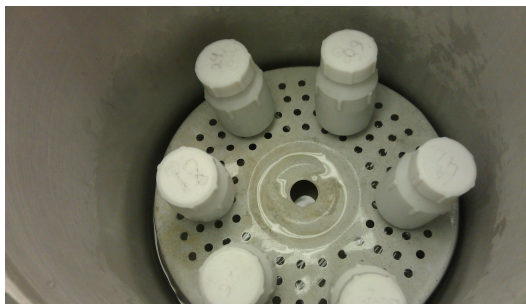
Ved ionchromatografi ledes prøven igennem en stationær fase med en eluent. For at adskille syrer som for eksempel sulfat og chlorid, er det anioner der skal tilbageholdes på den stationære fase og resten af prøven vil passere igennem den stationære fase. Herved kan koncentrationen af de tilbageblivende syrerester måles. For mere udførlig forklaring af ionchromatografi henvises til Bilag 03 – Ionchromatograf teori.

Oplukning af røggasaske

1,00 gram røggasaske afvejes i et autoklaveglas og 20,00 milliliter salpetersyre, HNO_3 , tilsættes. Forsøget udføres i tredobbelt bestemmelse. De tre autoklaveflasker stilles ned i autoklaven og opvarmes ved 200 kPa (120 grader) i 30 minutter. Når flaskerne herefter er afkølet, filtreres indholdet med sug. Filtratet blandes herefter med destilleret vand så der i alt er 100,00 milliliter væske per prøve. Prøverne er herefter klar til måling i ICP. (BMA-vejledning "Oplukning af jordprøve efter DS 259")



Figur 8 - Autoklave



Figur 9 – Autoklaveflasker i autoklave



Figur 10 – Filtrering med sug

Leaching

40,00 gram knust mørtelprøve afvejes og der tilsættes 80,00 milliliter destilleret vand, hvorefter prøven sættes på rystebord i 24 timer. Prøven tages af rystebordet og sedimenteres i 15 minutter. Der måles pH på prøven og herefter filteres prøven og hældes i to vials til henholdsvis IC og ICP måling. (Bilag 06 - Leaching af tungmetaller fra aske)

Glødetab

Det ønskes undersøgt om hvorvidt der er nogle organiske stoffer i røggasasken. Organiske stoffer brænder væk ved 550 grader, så derfor foretages et forsøg hvor asken afvejes, "brændes" i ovn ved 550 grader og afvejes igen. Herved kan mængden

af organisk stof i asken, bestemmes ved massetabet i procent. (BMA-vejledning "Glødetab i jord")

Vandindhold

Vandindholdet i asken bestemmes ved at afveje 100,00 gram aske i tre bægere, hvorefter disse sættes i varmeskab ved 105 grader i et døgn. Herefter vejes de tre bægere med aske igen og vægtforskellen angiver den mængde vand som er fordampet. Vandindhold angives i procent. (BMA-vejledning "Vandindhold i jord")

Ledningsevne

Udover at finde askens evne til at lede elektrisk strøm, fås ved måling af ledningsevne også et indtryk af saltindholdet i asken. Forsøget udføres ved først at afveje 10,00 gram tør aske og herefter tilsætte 25,00 milliliter destilleret vand med fuld pipette. Blandingen stilles på rystebord i cirka 30 minutter, hvorefter den får lov at bundfælde i cirka 20 minutter og så kan ledningsevnen måles ved at dyppe ledningsevne-elektroden i blandingen og aflæse resultatet på displayet. (BMA-vejledning "Måling af ledningsevne i jord")

pH

5,00 gram aske afvejes i en plastflaske og der tilsættes 12,5 milliliter 1 M kaliumchlorid (KCl)-opløsning. Blandingen sættes på rystebord i en time hvorefter den henstilles til bundfældning. Når prøven er bundfældet tilstrækkeligt måles pH værdien med en kombinationselektrode forbundet med et pH-meter. (BMA-vejledning "pH i 1 M KCl opslemning. Jord-væske forhold 1:2,5")

Vandopløselighed

En askes vandopløselighed er et mål for mængden af vandopløselige stoffer i asken. Vandopløseligheden bestemmes ved at vaske og filtrere en afvejet mængde tør aske, vægtdifferencen angiver hvor stor en del af asken der er opløselig.

Der afvejes 100,00 gram tør aske i en plastflaske, hvorefter der tilsættes 500,00 milliliter vand, prøven omrystes og stilles hen til bundfældning. Når prøven er bundfældet tilstrækkeligt hældes væsken der ligger øverst i plastflasken over i en tragt gennem et filter som er blevet vejlet. Dette gentages to gange, hvor hele prøven hældes i tragten efter sidste omrystning.

Herefter stilles tragten med prøven til afdrypning, efter afdrypning stilles filteret med prøven i varmeskabet ved 105 grader natten over. Afslutningsvis vejes filteret med den tørre prøve.

(BMA-vejledning "Vandopløselighed")

Bufferkapacitet

Askens evne til at modstå ændring i pH, undersøges ved at blande 20,00 gram tør aske med 300,00 milliliter destilleret vand og placere blandingen på rystebord i 30 minutter. Så måles pH-værdien, og efterfølgende tilsættes en milliliter saltsyre (HCl) og blandingen sættes på rystebord igen i 30 minutter. Herefter måles pH-værdien igen. Tilsætning af saltsyre og omrystning af prøven fortsættes indtil pH-værdien kommer under 2. (BMA-vejledning "Mehod for measuring Buffer Capacity af Soils and Slugde")

Densitet af røggasaske

Densiteten af røggasaske bestemmes ved et simpelt forsøg hvor et 100 milliliter bægerglas afvejes og fyldes herefter med aske, bægeret vejes igen og densiteten af asken bestemmes ved forholdet mellem masse og volumen.

Porøsitet og densitet

Ved dette forsøg er der udvalgt nogle stykker fra tidligere fremstillede mørtelprøver af forskellige typer, som forinden er blevet trykprøvet. Prøvelegemerne udtørres i varmeovn ved 105 grader for at eventuel vand fra åbne porer fordamper. Prøvelegemerne afvejes før de sættes i ekssikkator til vacuumsugning.

Prøverne vacuumsuges i 3 timer, hvorefter der indsuges destilleret vand, ved hjælp af en slange der tilsluttes ved ekssikkatorens ventil. Når prøverne er fuldstændig tildækket med vand, henstilles ekssikkatoren i 15 minutter. Efterfølgende åbnes ventilen på ekssikkatoren og prøverne henstår i vandet ved atmosfærisk tryk i 15 minutter.

Herefter vejes prøvernes under vand for at bestemme massen af prøven under vand og i luft efter aftørring med en opvredet klud, for således at bestemme massen i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand. (Bilag 04 - Porøsitet, densitet og kapillarsugning)



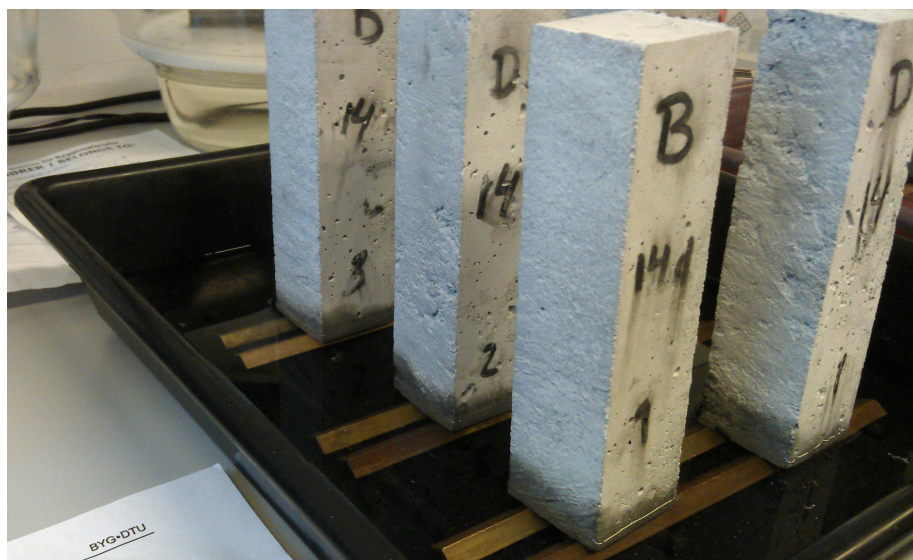
Figur 11 – Indsugning af destilleret vand i eksikkator

Kapillarsugning

Forud for forsøget skal mørtelprøverne ligge i varmeskab ved 105 grader i mindst to døgn, for således at opnå et standardiseret udgangspunkt.

Prøverne tages ud af varmeskab og ligges til afkøling i eksikkator med silicagel. Herefter måles prøvernes højde og sugefladeareal. Prøverne vejes i tør afkølet tilstand, før disse sættes i fotobakke med destilleret vand, der når 5 millimeter over afstandsholdere i fotobakken.

Prøverne tages op af fotobakken og tørres med en opvredet klud og vejes, dette gøres efter 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120 og 240 minutter. (Bilag 04 - Porøsitet, densitet og kapillarsugning)



Figur 12 – Mørtelprøver i fotobakke til kapillarsugning

Resultater og diskussion

I følgende afsnit fremvises og diskuteres de opnåede resultater ved mørtelstøbning og trykprøvning af disse, samt resultater for relevante laboratorieforsøg.

Som beskrevet i metodeafsnittet er der igennem projektet lavet mørtelprøver med fire forskellige blanderecepter, disse fire typer kaldes i det følgende prøve A eller referenceprøven som er støbt udelukkende med cement, prøve B hvor røggasaske erstatter 10% af cementen, prøve C hvor røggasaske erstatter 20% af cement og prøve D hvor 10% af sandet er erstattet af røggasaske.

Trykstyrke

For hver prøvetype er der støbt tre mørtelprøver, som trykprøves i begge ender, det vil sige at hver prøve trykprøves to gange og derfor fås seks tryklast resultater for hver type.

7-døgns prøver	Tryklast 1[kN]	Tryklast 2[kN]
A1	96	77
A2	97	97
A3	99	97
B1	95	101
B2	96	105
B3	93	80
C1	70	62
C2	71	57
C3	69	69
D1	86	84
D2	84	80
D3	83	88

Tabel 5 – Tryklastresultater ved trykprøvning

I tabel 5 vises resultaterne af trykprøvning i Toni 3000. Dette er målinger for de fire forskellige typer mørtelprøver efter hærdning i 7 døgn. Som det fremgår af skemaet måles lasten i kN. Denne last regnes herefter om til en trykstyrke ved at dividere med trykarealet, jf. formel [1] i teoriafsnittet. Prøvens bredde på omtrent 40 mm samt de 50 mm brede metalplader som prøven er i kontakt med, udgør prøvens trykareal.

For resultat af samtlige prøvers trykstyrke henvises til Bilag 08 – Rådata for trykprøvning.

Af nedestående tabel fremgår den gennemsnitlige trykstyrke for alle mørtelprøverne, for hver af deres hærdeperioder. Ligeledes fremgår det tilhørende vand/cement-forhold for hver prøve.

	7 døgns styrke [MPa]	v/c- forhold	14 døgns styrke [MPa]	v/c- forhold	28 døgns styrke [MPa]	v/c- forhold	42 døgns styrke [MPa]	v/c- forhold
Prøve A	48,50	0,50	54,43	0,50	62,16	0,50	60,54	0,5
Prøve B	48,16	0,50	55,40	0,50	62,34	0,50	62,46	0,5
Prøve C	33,12	0,56	53,14	0,53	50,17	0,52	51,93	0,52
Prøve D	42,03	0,47	43,88	0,44	64,78	0,42	64,24	0,45
Prøve B tørret	49,44	0,50	49,51	0,50				
Prøve B vasket	47,62	0,50	44,87	0,50	52,17	0,50		
Prøve C vasket	38,58	0,52						

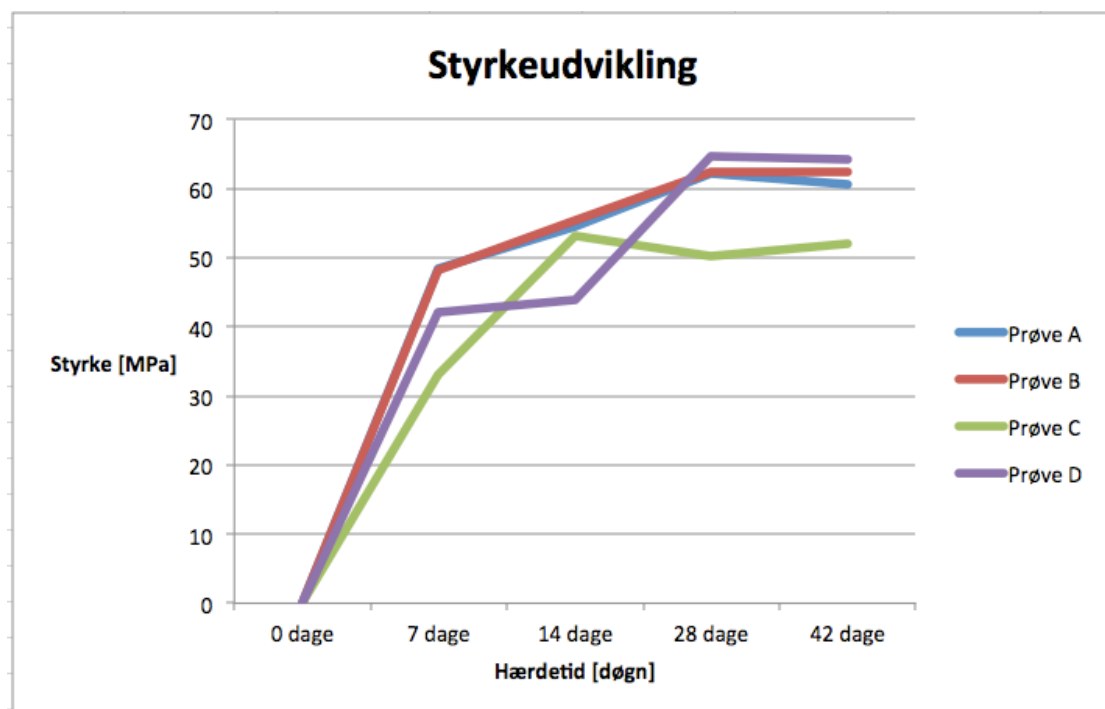
Tabel 6 – Gennemsnitlig trykstyrke og v/c-forhold for samtlige mørtelprøver

For prøverne A7, B7, C7, A28 og C28 er kun fem ud af seks trykprøve resultaterne medtaget, da der for hver af disse prøver var en "udstikker" i trykprøve resultaterne. Disse værdier fremgår også af Bilag 08 – Rådata for trykprøvning.

Trykprøvning af 14-, 28 og 42-døgns mørtelprøver viser at prøverne af type B, har en lidt højere trykstyrke end referencen.

Ved støbning af mørtelprøver med 10 % cement erstattet af aske var bearbejdeligheden og konsistensen af mørtelen tæt på den samme som referencen.

Ud fra skemaet tegnes en graf for at vise trykstyrkeudviklingen for de fire slags mørtelprøver af type A, B, C og D.

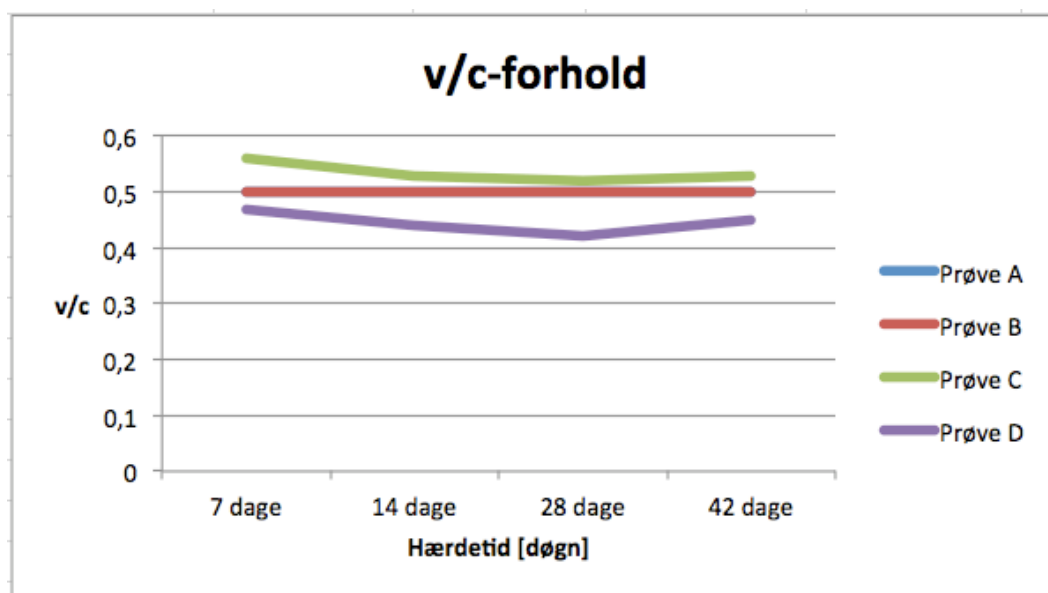


Figur 13 – Trykstyrkeudvikling over tid for de oprindelige mørtelprøvetyper

Grafen viser hvordan prøve B med 10% aske erstatter cement, lægger sig tæt op ad referenceprøven og stiger jævnt. Samtidig ses også at prøve C med 20 % aske erstatter cement, ikke har nær så god trykstyrke som referenceprøven, dette kan dog skyldes det øgede vand/cement-forhold, som fremgår af grafen herunder.

Prøve D, hvor 10% af sandet er erstattet med aske, viser sig at opnå en 28-døgns styrke på næsten 65 megapascal. Dette skyldes sandsynligvis en bedre pakning af mørtelprøven, som består af en større mængde aske og cement, der har væsentlig mindre partikelstørrelse end sandkornene. Da asken medregnes i vand/cement-forholdet som bindemiddel, er dette forhold for prøve D mindre end referenceprøvens vand/cement-forhold, hvilket også påvirker trykstyrken.

På baggrund af resultaterne for trykprøvning hvor prøve B og D gav de bedste resultater sammenlignet med referencen, er det disse to typer af mørtelprøver der går igen i mange af de efterfølgende forsøg.



Figur 14 – Vand/cement-forhold for mørtelprøvetype A, B, C og D

Af figur 14 ses vand/cement-forholdet for de fire forskellige typer mørtelprøver, da vand/cement-forholdet for prøve A og prøve B er identisk, ligger disse oveni hinanden på grafen.

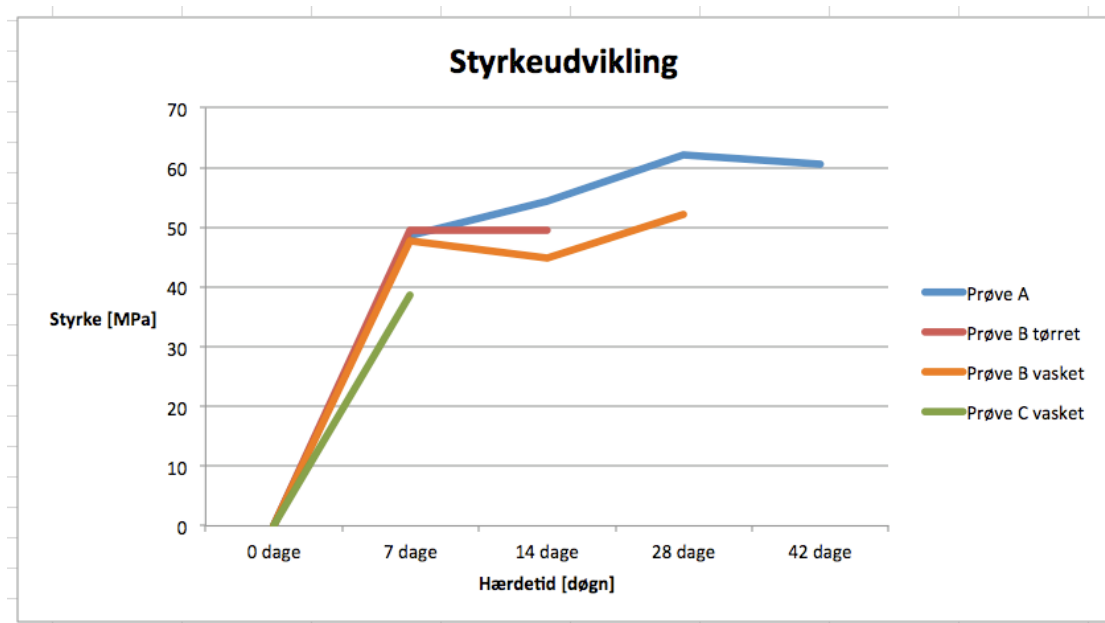
Heraf ses at vand/cement-forholdet for mørtelprøver af type C, generelt er højere end referenceprøvernes, hvilket som bekendt har betydning for styrken. Derfor er der muligvis potentiale for en højere styrke af prøve C end opnået på nuværende tidspunkt, dette vil dog også påvirke bearbejdigheden. Den øgede værdi af vand/cement-forholdet skyldes nemlig at mørtelblandingen med 20 % aske krævede ekstra vand, for at opnå nogenlunde samme konsistens som referencen prøvens.

Af figuren ses også et lavere vand/cement-forhold for mørtelprøverne af type D, hvilket også fremgår af styrkeudviklingen som efter 28 døgn er højere end referenceprøven.

Yderligere trykstyrkeforsøg

Forsøget til bestemmelse af vandindhold i røggasaske viser et vandindhold i asken på gennemsnitlig 7,73%, jf. Bilag 13 – Vandindhold. Grundet størrelsen af vandindholdet i røggasasken, findes det interessant at undersøge hvorvidt dette har indflydelse på vand/cement-forholdet og derved også på styrken. Derfor foretages også trykstyrkeforsøg på mørtelprøver støbt med tørret aske.

Resultater af undersøgelsen for saltindhold i røggasaske viser et chloridindhold der er lidt i overkanten, i forhold til kravet for anvendelse i beton. Derfor er der også foretaget trykprøvninger på mørtelprøver støbt med vasket aske, hvor chloridindholdet er reduceret.



Figur 15 – Trykstyrkeudvikling af mørtelprøver støbt med tørret aske eller vasket aske

Af grafen ses styrkeudviklingen af prøve B med tørret aske efter syv og 14 døgn. Det fremgår at styrken efter 14 døgn ikke overstiger styrken for referenceprøven og derfor heller ikke overstiger styrken opnået ved brug af ikke-tørret røggasaske. Dette indikerer at vandindholdet i asken ikke påvirker vand/cement-forholdet. Det kan dog stadig ikke med sikkerhed siges om vandindholdet i røggasasken har indflydelse på de kemiske reaktioner og dermed måske endda er med til at optimere hærdeprocessen til en bedre styrke.

Ligesådan ses det ved brug af vasket aske, at styrken falder i forhold til de tidligere opnåede styrkeresultater. Dette kan skyldes at flere forskellige elementer udvaskes ved vask af asken. Elementer som højst sandsynlig har en positiv effekt på styrkeudviklingen. Derved opnås ikke ligeså høj styrke ved brug af vasket aske.

Røggasaske har i sin uvaskede form, forinden mørtelstøbning og trykprøvning været igennem elektrodialysebehandling som også er en form for udvaskning, og herefter opnås trykstyrker på 60 megapascal. Det ville derfor være interessant at undersøge trykstyrken af samme type mørtelprøve, efter røggasasken har været i elektrodialyse tilstrækkelige længe til at chloridindholdet er acceptabelt.

Ultralyd

Under projektet gik ultralydsmåleren itu, og der er derfor kun målt ultralyd på de første mørtelprøver.

Prøve	Gennemsnit af ultralyd [μm]
7 døgn - A	37,2
7 døgn - B	38,3
7 døgn - C	41,6
7 døgn - D	41,9
14 døgn - A	37,4
14 døgn - B	37,7
14 døgn - C	39,2

Tabel 7 – Ultralydmåling af mørtelprøver

Tabellen ovenfor angiver gennemsnittet af ultralydmålinger foretaget på de forskellige typer mørtelprøver efter syv og 14 døgns hærkning. Det fremgår heraf at gennemgangstiden igennem prøverne er nogenlunde ens for prøverne, hvad enten der er tilsæt 0%, 10% eller 20% aske eller om disse har hærdet i syv eller 14 dage.

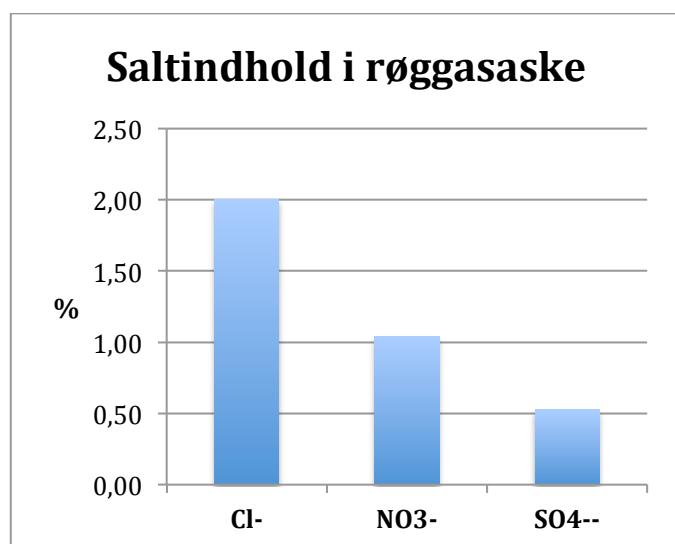
Sammenlignet med styrkeprøver, giver disse ultralydmålinger ingen reel idé om styrkeniveauet for mørtelprøverne. Det skal dog også tilføjes at ultralydmålingerne er foretaget kort efter prøverne er taget op af vand, hvilket har indflydelse på resultatet.

Alle ultralydmålinger findes på Bilag 08 – Rådata for trykprøvning.

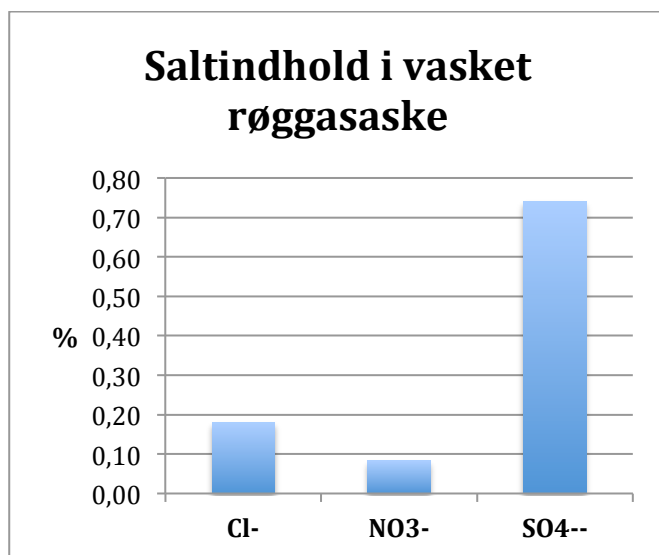
Karakteristik af røggasaske

Saltindhold

Som omtalt tidligere har chloridindholdet i røggasaske ved analyse vist sig at være for højt til at overholde kravene om anvendelse i beton. Derfor er der også foretaget en analyse på vasket røggasaske. I det følgende vil indholdet af chlorid, nitrat og sulfat for begge prøver fremvises og diskuteres.



Figur 16 – Saltindhold i røggasaske



Figur 17 – Saltindhold i vasket røggasaske

Graferne ovenfor viser henholdsvis saltindholdet i røggasaske, før og efter asken er blevet vasket. Som det ses reduceres chlorid- og nitratindholdet ved at vaske asken. Dog ser det ikke ud til at sulfatindholdet reduceres. Dette betyder at den mængde sulfat der er i asken, ikke er nemt opløselig, hvorimod chlorid og nitrat er meget mere mobile og derved let opløselige.

Chloridindhold i røggasaske

Salte i røggasaske	Indhold [g/kg]	Indhold [%]
Cl ⁻	20,03 ± 0,34	2,00
NO ₃ ⁻	10,43 ± 0,19	1,04
SO ₄ ²⁻	5,25 ± 0,04	0,53
I alt		3,57

Tabel 8 – Indhold af chlorid, nitrat og sulfat i røggasaske angivet i g/kg med afvigelse og angivet i %

I DS/EN 206-1 er der opstillet krav til indholdet af chlorid i beton, som er gennemgået i teoriafsnittet.

Ved iblanding af aske erstattende 10% af cementindholdet i en betonblanding, vil chloridindholdet fra asken være 0,2% af bindingsindholdet, som netop er grænsen for de fleste miljøklasser med armering. Det betyder dog at der maksimalt ville kunne erstattes 10% cement med røggasaske, og det er uden at tage højde for afvigelser ved chloridindhold bestemmelse. Desuden vil grænsen for armeret beton i ekstra aggressiv miljøklasse overskrides, hvilket er uønsket, da det bestræbes at røggasaske skal kunne benyttes i beton til al slags brug. Ved disse beregninger er chloridindholdet i cement sat til 0%, som understøttes af en IC-måling på cement der fremgår af Bilag 09 – Rådata fra IC-måling.

Chloridindhold i vasket røggasaske

Salte i vasket røggasaske	Indhold [g/kg]	Indhold [%]
Cl ⁻	1,80 ± 0,09	0,18
NO ₃ ⁻	0,83 ± 0,05	0,08
SO ₄ ²⁻	7,40 ± 0,09	0,74
I alt		1,00

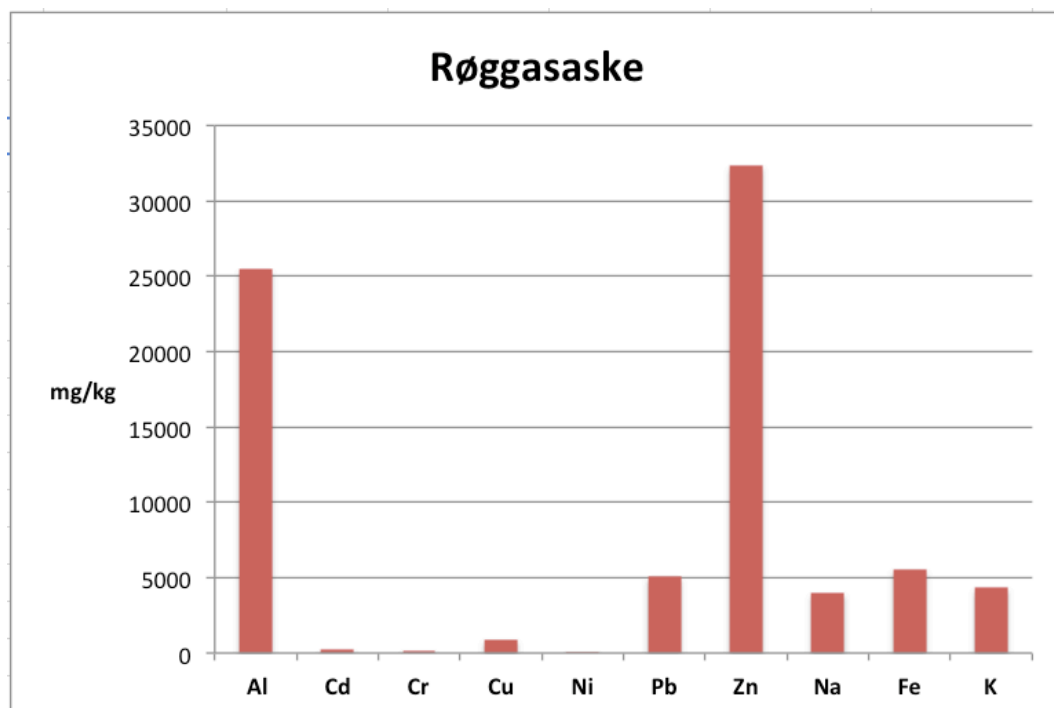
Tabel 9 - Indhold af chlorid, nitrat og sulfat i vasket røggasaske angivet i g/kg med afvigelse og angivet i %

Chloridindholdet i vasket røggasaske er reduceret tilstrækkeligt til at omtrent 50% af cementen ville kunne erstattes af røggasaske, uden af chloridindholdet vil overskride kravet til brug i miljøklassen ekstra aggressiv.

I DS/EN 450-1 er det angivet at sulfatindholdet i flyveaske maksimalt må være 3%, det samme må gælde for røggasaske som ligger langt under.

Oplukning af røggasaske

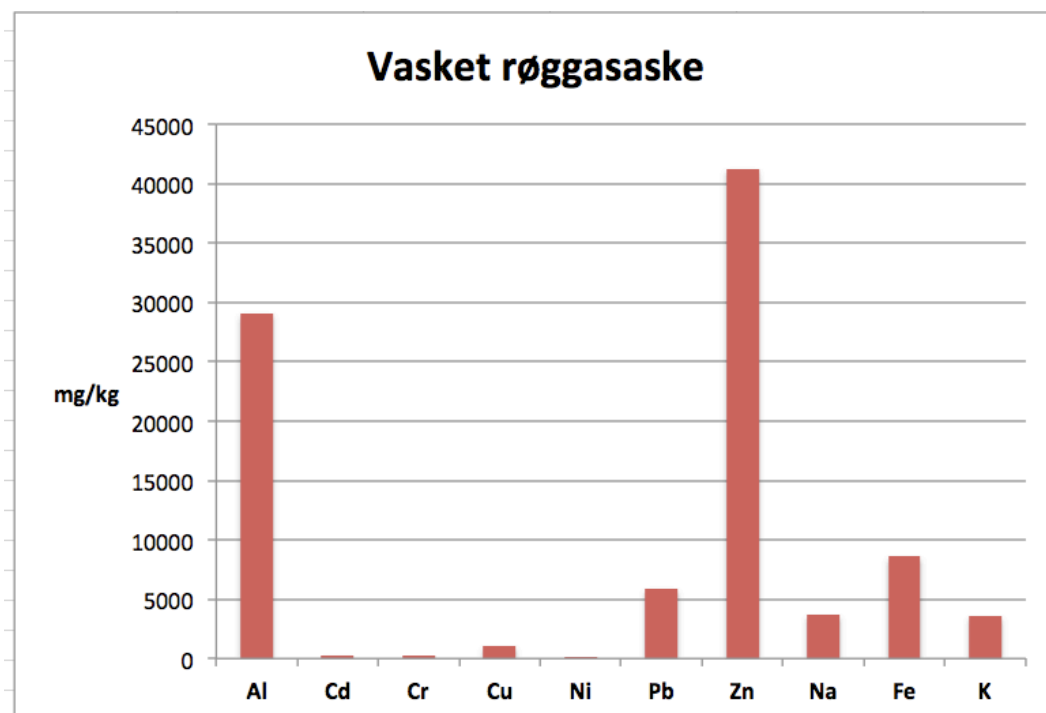
Ved oplukning af røggasaske bestemmes koncentrationen af forskellige grundstoffer i asken.



Figur 18 – Indhold af grundstoffer i røggasaske

På figur 18 ses indholdet af forskellige grundstoffer i røggasaske, REFA 9, der har været igennem elektrodialyse.

For at vurdere mobiliteten af disse koncentrationer, sammenlignes de opnåede resultater som fremgår af figur 18 med værdierne for vasket røggasaske som ses illustreret på figur 19.



Figur 19 – Indhold af grundstoffer i vasket røggasaske

Element	Efter elektrodialyse [mg/kg]	Efter vask [mg/kg]
Al	25467±1574	29084±476
Cd	228±4	300±4
Cr	165±3	211±3
Cu	914±13	1059±7
Ni	49±2	75±1
Pb	5057±320	5900±157
Zn	32351±1772	41247±4214
Na	4003±36	3704±61
Fe	5566±8	8593±114
K	4357±128	3597±48

Tabel 10 – Sammenligning af metalkoncentrationer før og efter vask af røggasaske

I tabel 10 fremgår koncentrationen af de respektive elementer før og efter vask af røggasasken. Det ses at de fleste koncentrationer er stigende efter vask, foruden natrium og kalium. Dette skyldes at ved at vaske asken fjernes de mobile elementer i asken, som her er natrium og kalium, samt chlorid og nitrat der er beskrevet i forrige afsnit. De øvrige mængder af metaller stiger derfor ikke, det er blot koncentrationen der stiger, da den totale masse af asken er reduceret.

Forholdet mellem koncentrationen af tungmetaller før og efter vask af asken, er dog ikke ens for alle elementer, hvilket tyder på at mobiliteten for nogle tungmetaller stadig er til stede. Alligevel bevidner resultaterne om at elektrodialysebehandling af røggasaske udgør en vigtig rolle i bestræbelserne på at ekstrahere farlige

tungmetaller fra røggasaske, da mobiliteten for tungmetaller var væsentlig større, inden elektrodialysebehandling.

For sammenligning kan koncentrationerne for ubehandlet røggasaske studeres i Bilag 19 – Kemisk indhold i ubehandlet røggasaske. Som er koncentrationer af indholdet i restprodukter fra røggasrensning ved affaldsforbrænding angivet i en arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen fra 1997 (Flyvbjerg, 1997). Disse værdier er dog ikke direkte sammenlignelige med værdier opnået her, da de ikke stammer fra samme anlæg og tidsforskellen spiller også en betragtelig rolle på mængde af tungmetalindhold ved affaldsforbrænding. Alligevel giver værdierne et billede, hvilken størrelsesorden udskillelsen af tungmetaller befinder sig i.

Leaching

I nedestående tabel er resultaterne af en batchleachtest foretaget på mørtelprøver af type B, D og en referenceprøve A, fremstillet. Ligeledes er de tilladelige mængder for udvaskning af tungmetaller i restproduktbekendtgørelsens tre kategorier fremstillet. Alle værdier er i tabellen angivet i mikrogram per liter, µg/L. Resultaterne for prøve B og D er gennemsnittet af tre prøver for hver type. Alle resultaterne kan ses i Bilag 11 – Rådata fra leaching.

Prøve	B	D	A	BEK kat. 1	BEK kat. 2	BEK kat. 3
µg/L Al	39	35	1025			
µg/L Cd	0	0	0	0-2	0-2	2-40
µg/L Cr	34	36	27	0-10	0-10	10-500
µg/L Cu	18	17	13	0-45	0-45	45-2000
µg/L Fe	46	58	81			
µg/L K	100095	99787	360414			
µg/L Mg	32	38	374			
µg/L Ni	4	3	0	0-10	0-10	10-70
µg/L Pb	88	247	7	0-10	0-10	10-100
µg/L Zn	26	70	40	0-100	0-100	100-1500
µg/L Na	103797	109451	147040	0-100000	0-100000	100000-1500000
µg/L Ca	744459	770637	689741			
µg/L Cl	121239	176013		0-150000	0-150000	150000-3000000
µg/L NO ₃	22177	52703				
µg/L SO ₄	7812	8617		0-250000	0-250000	250000-4000000

Tabel 11 – Værdier for mobilitet af tungmetaller i mørtelprøver ved udvaskning

I restproduktbekendtgørelsen er mobiliteten for tungmetaller inddelt i tre kategorier, hvor kategori 1 er den mest ønskelige. De tilladelige værdier for hver element i den tilhørende kategori er listet til højre i ovenstående tabel.

Resultaterne for mobilitet af tungmetaller i mørtelprøver fundet ved udvaskningstest, sammenlignes med koncentration af tungmetaller i eluat, som i

restproduktbekendtgørelsen er angivet i mikrogram per liter. Asken kategoriseres efter det eller de elementer der giver anledning til den højeste kategori.

Af tabellen ses at mobiliteten af krom for både prøve B, D og referenceprøven er så høj at alle tre prøver kategoriseres som kategori 3. Desuden ses også at mobiliteten af natrium kategoriserer alle tre prøver i kategori 3. For prøve D, som indeholder den største mængde af røggasaske, er chloridindholdet også højt og mobiliteten af bly er så stor at værdien ligger udenfor de tilladelige grænser i kategorierne.

Mobiliteten af nogle tungmetaller i referenceprøven afviger betydeligt fra de andre prøver. Ovenstående resultater for referencen er kun baseret på én prøve, hvorimod de øvrige prøver er gennemsnittet af tre prøver. Der er derfor en vis usikkerhed omkring resultatet, da afvigelser ved måling kan forekomme.

Glødetab

Glødetabet for røggasasken er gennemsnitlig 8,25% (Bilag 12 – Organisk stof), hvilket indikerer at der er cirka 8,25% organisk stof i røggasasken. Organisk stof er typisk svovl og carbon.

For at finde ud af hvor meget svovl og carbon der findes i vasket røggasaske, er asken blevet målt i LECO, som er et analytisk instrument til blandt andet organisk analyse af materialer. Her blev også foretaget en måling på en mørtelprøve hvor en del af cementen er erstattet af røggasaske.

Prøve	afvejet [g]	% C	% S
Støbt mørtel	0,5012	1,09	0,524
Vasket røggasaske	0,5048	3,98	4,780

Tabel 12 – Måling af organisk stofindhold ved LECO analyse

LECO analysen viser at der er knap 4% carbon og lidt under 5% svovl i vasket røggasaske, som samlet giver et indhold af 8,76% organisk stof i vasket røggasaske. Altså har vask af røggasasken ingen udskillelseeffekt på organisk stof.

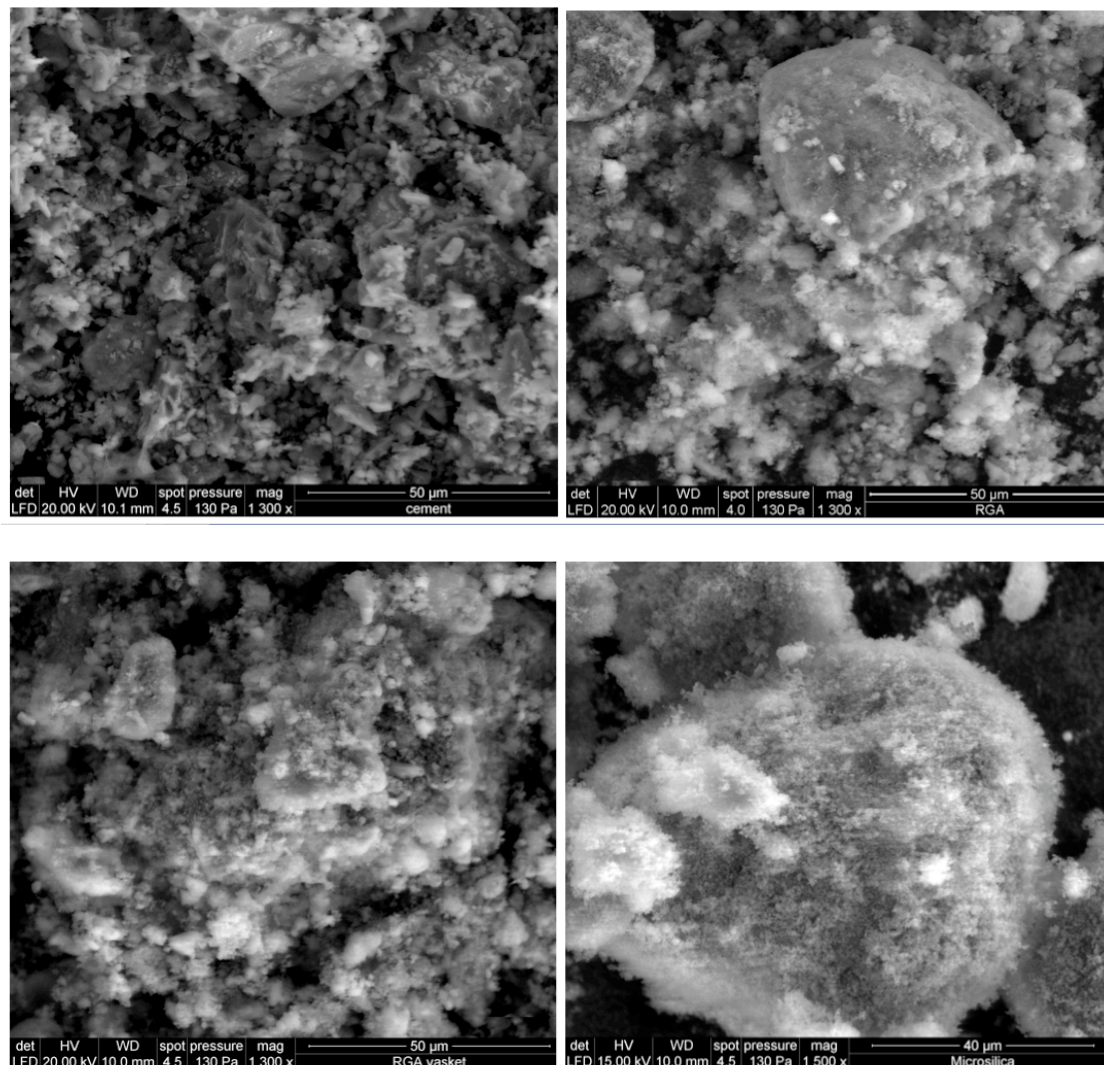
LECO analysen viser også at indholdet af carbon og svovl i en mørtelprøve, som er henholdsvis 1,09% og 0,52%. Som giver et samlet organisk indhold på 1,51%, hvilket vil sige at det meste organiske stof bliver bundet i mørtelen. Hvilket også kan have indflydelse på bindingen af tungmetaller, da disse oftest reagerer med organisk stof.

Da glødetabet ifølge DS/EN 206-1 ikke må overstige 5% for generel anvendelse i beton, er glødetabet for røggasaske for højt til at asken kan anvendes i beton.

Så får at kunne anvende røggasaske i beton på en sådan vis at det lever op til standarden, må der gøres noget for at nedbringe det organiske materiale.

Mikroskopdata (SEM)

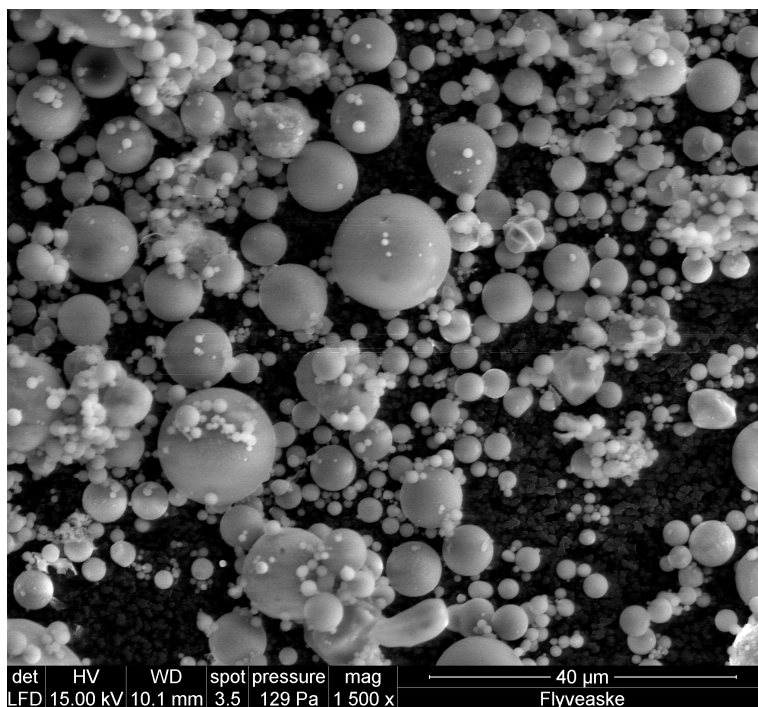
Askens struktur kan studeres under et mikroskop, herunder ses forstørret mikroskopbilleder af henholdsvis cement, røggasaske, vasket røggasaske og mikrosilica.



Figur 20 – SEM billeder af cement (ø. tv.), røggasaske (ø. th.), vasket røggasaske (n. tv.) og mikrosilica (n. th.)

Billedet af cement viser en blanding af kantede partikler og små runde partikler, mens billedet af mikrosilica viser meget luftige vatlignende partikler. Der er ikke stor forskel på partiklerne i røggasaske og vasket røggasaske og disse partikler ligner lidt en blanding af cement som er rig på calciumoxider og mikrosilica som er rig på siliciumoxider.

Herunder ses et forstørret mikroskopbillede af flyveaske.

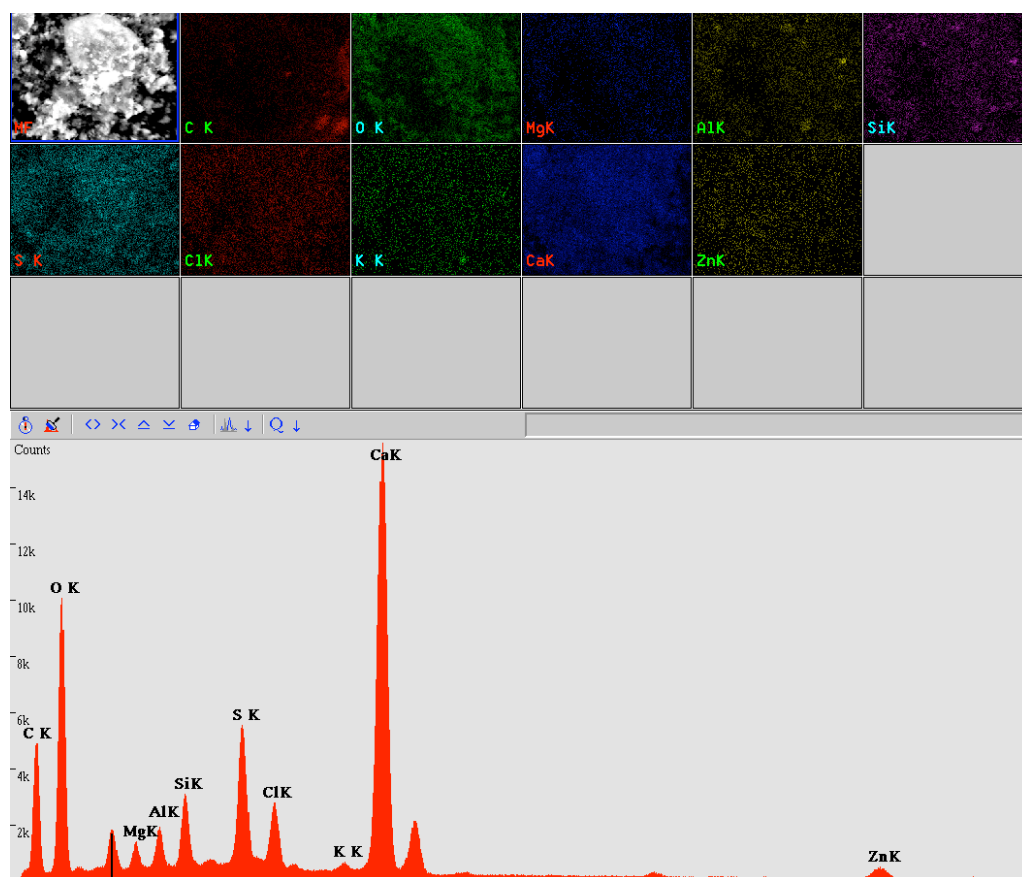


Figur 21 – SEM-billede af kulflyveaske

Partiklerne i flyveaske skiller sig ud fra de andre ved at være kuglerunde. Denne egenskab er med til at give flyveasken sin pozzolan effekt og gode evne til pakning af betonen, da partiklerne er meget små og deres form lader dem passere næsten hvor som helst.

Mapping

Ligesom ved ICP-måling, er mapping en metode hvorved et materiales indhold kan analyseres. Ved mapping vises dog kun indholdet af de forskellige grundstoffer i den viste overflade af askepartiklerne, hvor elektroner frigives som så bliver opfanget af en detektor der registrere grundstofferne. Da metoden ikke er nær så præcis som ICP-måling, vil resultaterne herfra kun benyttes til at understøtte sammenligningen af mikroskop billederne af røggasaske. Af nedenstående figur ses indholdet i røggasasken målt i SEM – Scanning Elektron Microscopy. Indholdet er målt på baggrund af den smule røggasaske der er brugt til at danne mikroskop billederne.



Figur 22 – Elemental mapping af røggasaske

Af figuren ses af der i overfladen af asken findes elementer som silicium og oxygen, hvilket kan have betydning for udseende af partiklerne for røggasaske, sammenlignet med mikrosilica som er rig på siliciumoxider. I overfladen ses også et højt indhold af calcium, som også findes i cement. Det høje carbon indhold vist på figuren, skyldes at den tape som røggasasken er opsamlet på, er af carbon.

pH og ledningsevne

Prøve nr.	pH med vand (22,3°C)	pH med KCl (21°C)	Ledningsevne [mS/cm]	Ledningsevne [mS/m]
1	10,04	10,17	11,58	0,116
2	9,94	10,09	12,00	0,120
3	10,00	10,15	12,12	0,121
Gennemsnit	9,99	10,14	11,9	0,119

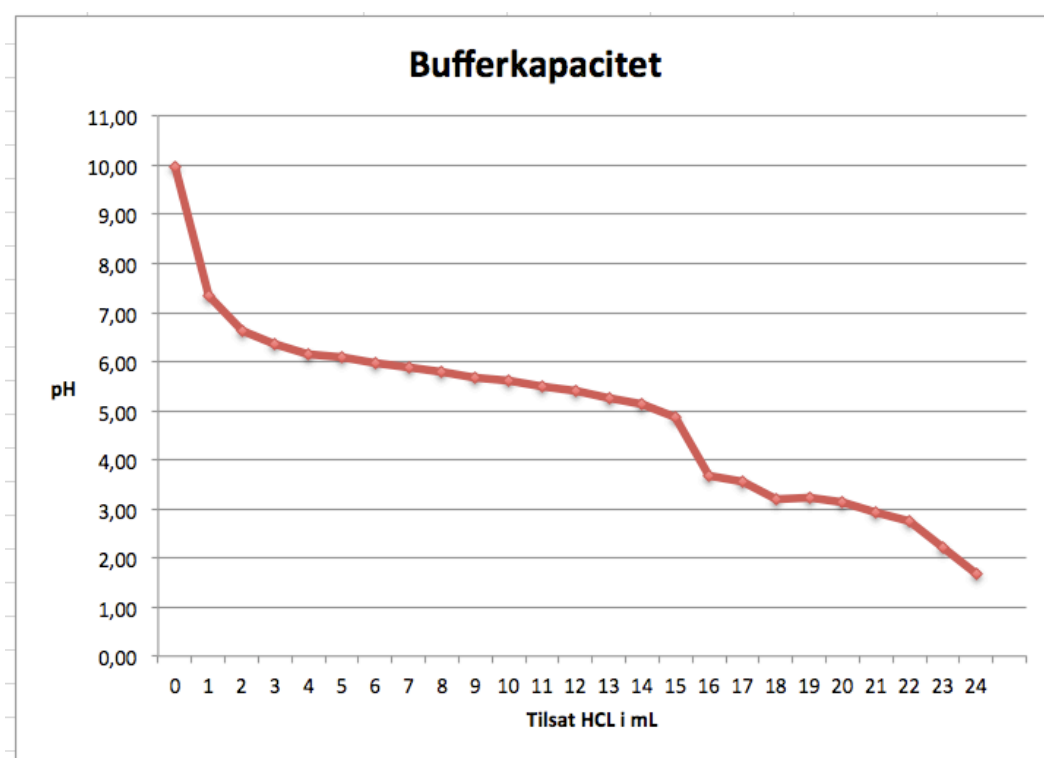
Tabel 13 – Måling af pH for røggasaske opblandet i vand og opblandet i kaliumchlorid, samt måling af ledningsevne

Som det fremgår af tabellen ligger pH værdien for røggasaske på omkring 10, som er en konsekvens af karbonisering før elektrodialysebehandling. Før karbonisering lå pH værdien på 12,2. (Jensen, 2010) Dette pH dyk ved karbonisering ønsket undgået, da pH værdien ved brug i beton ønskes at være så høj som mulig.

Ionaktiviteten målt ved ledningsevnen, bevidner om at der er opløselige ioner i røggasasken. Dette er også bekræftet ved målinger i ionchromatografen af røggasaske før og efter vask. Ledningsevnen er også et udtryk for asken opløselighed. Vandopløseligheden af røggasaske er bestemt 9,88% ved forsøg, jf. Metodeafsnittet. Værdierne for dette forsøg kan ses på Bilag 14 – Vandopløselighed.

Bufferkapacitet

Forsøget er foretaget over to omgange for at nå en pH-værdi under 2, da det er tidskrævende. Ved fortsættelse af forsøget viste det sig, ved tilsætning af den mængde saltsyre, HCl, der forinden var blevet målt pH på, faldt pH værdien yderligere end opnået i første del af forsøget. Dette tyder på at omrystningstiden for blanding, ikke er tilstrækkelig til at syren kan nå at reagere ordentlig med askeopløsningen.



Figur 23 – Bufferkapacitet for røggasaske

Af figuren ses et pH dyk mellem tilsætning af 15 og 16 milliliter saltsyre, som er tidspunktet for opdelingen af forsøget. Foruden dette dyk og det store fald i starten af kurven, ses et jævnt fald i pH, som efter tilsætning af 24 milliliter saltsyre falder til en pH under 2. At bringe pH værdien fra 6 ned til 5 kræver stor tilsætning af saltsyre, hvilket giver et indtryk af en rimelig god bufferkapacitet for røggasaske.

For yderligere information vedrørende forsøget, henvises til Bilag 15 – Bufferkapacitet.

Densitet af aske

Løs aske

Prøve	Aske [g]	Aske [kg]	Volumen [L]	Volumen [m3]	Densitet [kg/m3]
1	70,62	0,0706	0,1	0,0001	706,20
2	69,29	0,0693	0,1	0,0001	692,90
3	70,43	0,0704	0,1	0,0001	704,30
Gennemsnit	70,11	0,0701	0,1	0,0001	701,13

Tabel 14 – Densitet af løs røggasaske

Af tabel 14 fremgår det at densiteten af løs røggasaske er omkring 700 kg/m³. Dette er dog kun vejledende da testen der er udført for at bestemme densiteten, er udført ved øjemål for afmåling af 100 milliliter aske.

Sammenpresset aske

Prøve	Aske [g]	Aske [kg]	Volumen [L]	Volumen [m3]	Densitet [kg/m3]
1	86,80	0,0868	0,1	0,0001	868,00
2	85,89	0,0859	0,1	0,0001	858,90
Gennemsnit	86,35	0,0863	0,1	0,0001	863,45

Tabel 15 – Densitet af sammenpresset røggasaske

Af tabellen ovenfor fremgår det at asken i presset form har en densitet på cirka 860 kg/m³. Her er testen også foretaget ved øjemål og derfor er værdierne kun vejledende.

For at sige noget konkret om densiteten, bør en mere præcis måling foretages. Dette er blot for at danne en idé om densiteten for røggasaske i pulverform.

Densiteten af røggasasken i pulverform, har betydning for densiteten og volumen af mørtelprøver og beton.

Porøsitet og densitet af mørtelprøver

Ved forsøg med vacuumsugning i ekssikkator til bestemmelse af porøsitet og densitet, er der udført to forsøg.

Forsøg 1

I første omgang udføres forsøget efter en vejledning der anviser at prøverne skal stå ved atmosfærisk tryk i 15 minutter (jf. Metodeafsnittet).

Dette forsøg er udført på trykte mørtelprøver og resultaterne heraf fremgår af nedestående skema.

Prøve	m,dry [kg]	m,ssd [kg]	m,u [kg]	V [10 ⁻⁶ m ³]	Vå [10 ⁻⁶ m ³]	Porøsitet	ρ,dry [kg/m ³]	ρ, ssd [kg/m ³]
B28 lille	0,1093	0,11876	0,06701	51,85	9,50	0,1832	2107,47	2290,29
B28 stor	0,1429	0,15768	0,08859	69,23	14,80	0,2138	2064,32	2277,68
B42	0,0727	0,07909	0,04492	34,24	6,39	0,1867	2123,63	2309,97
C28	0,2047	0,22806	0,12716	101,10	23,37	0,2311	2025,08	2255,74
D28	0,2255	0,25034	0,13970	110,86	24,91	0,2247	2033,89	2258,13
D42	0,0688	0,07666	0,04269	34,04	7,93	0,2329	2019,80	2252,18
Reference	0,1355	0,15113	0,08391	67,35	15,68	0,2328	2011,44	2243,79

Tabel 16 – Porøsitet- og densitetsberegninger for trykte mørtelprøver

Der er stor variation i beregningerne for både porøsiteten, tørdensiteten og den vandmættede overfladetørre densitet. Dette kan skyldes at prøverne er blevet trykprøvet hvilket kan have gjort dem mere ustabile i deres partikelopbygning, samt at disse prøver har ujævne og åbne overflader som kan påvirke porøsitet og densitet.

Forsøg 2

Forsøget til bestemmelse af porøsitet og densitet er efterfølgende redigeret således at prøverne henstilles i eksikator med destilleret vand ved atmosfærisk tryk i 24 timer. Det skyldes at vejledning hvori de 15 minutter ved atmosfærisk tryk er angivet, er en vejledning skrevet til et 3-ugers kursus på DTU, hvor tiden er knap. Desuden er vejledningen beregnet til måling på mursten, som er mere porøse end mørtelprøver og derfor opsuger vand hurtigere.

Dette forsøg hvor prøverne henstilles ved atmosfærisk i 24 timer i stedet for 15 minutter, er foretaget på hele mørtelprøver som ikke er blevet udsat for tryk. Derfor forventes mere ensformige resultater for porøsitet og densitet.

Prøve	m,dry [kg]	m,ssd [kg]	m,u [kg]	V [10 ⁻⁶ m ³]	Vå [10 ⁻⁶ m ³]	Porøsitet	ρ,dry [kg/m ³]	ρ, ssd [kg/m ³]
B14,1	0,5328	0,58992	0,33029	260,15	57,23	0,2200	2048,05	2267,61
B14, 2	0,5331	0,59031	0,33015	260,68	57,32	0,2199	2045,03	2264,49
D14, 1	0,5096	0,57291	0,31664	256,78	63,44	0,2470	1984,55	2231,10
D14,2	0,5161	0,57845	0,32112	257,85	62,47	0,2423	2001,58	2243,40
A1	0,25886	0,28367	0,16074	123,18	24,86	0,2018	2101,54	2302,96
A2	0,25698	0,28173	0,15955	122,42	24,80	0,2026	2099,08	2301,25
A3	0,25771	0,28218	0,16008	122,34	24,52	0,2004	2106,43	2306,43

Tabel 17 – Porøsitet og densitet af hele, utrykte mørtelprøver. For yderligere beregninger henvises til bilag 17 – Porøsitet og densitet og teori afsnittet

Af skemaet ses at både porøsitet, tørdensitet og mættet overfladetør densitet er mindre variable ved målinger af samme type mørtelprøve.

Referenceprøverne A sammenlignes med værdierne for porøsitet og tørdensitet i Tabel 1, i Bygningsmaterialer – grundlæggende egenskaber (Gottfredsen, 2008), som for cementmørtel har en tørdensitet på 2100 kg/m³ og en porøsitet på 20%. Resultaterne fra forsøget giver næsten samme værdier, med forholdsvis lav usikkerhed og må derfor betragtes som værende sammenlignelige med standardværdier.

Gennemsnittet beregnes for hver af de tre typer mørtelprøver forsøget er foretaget på.

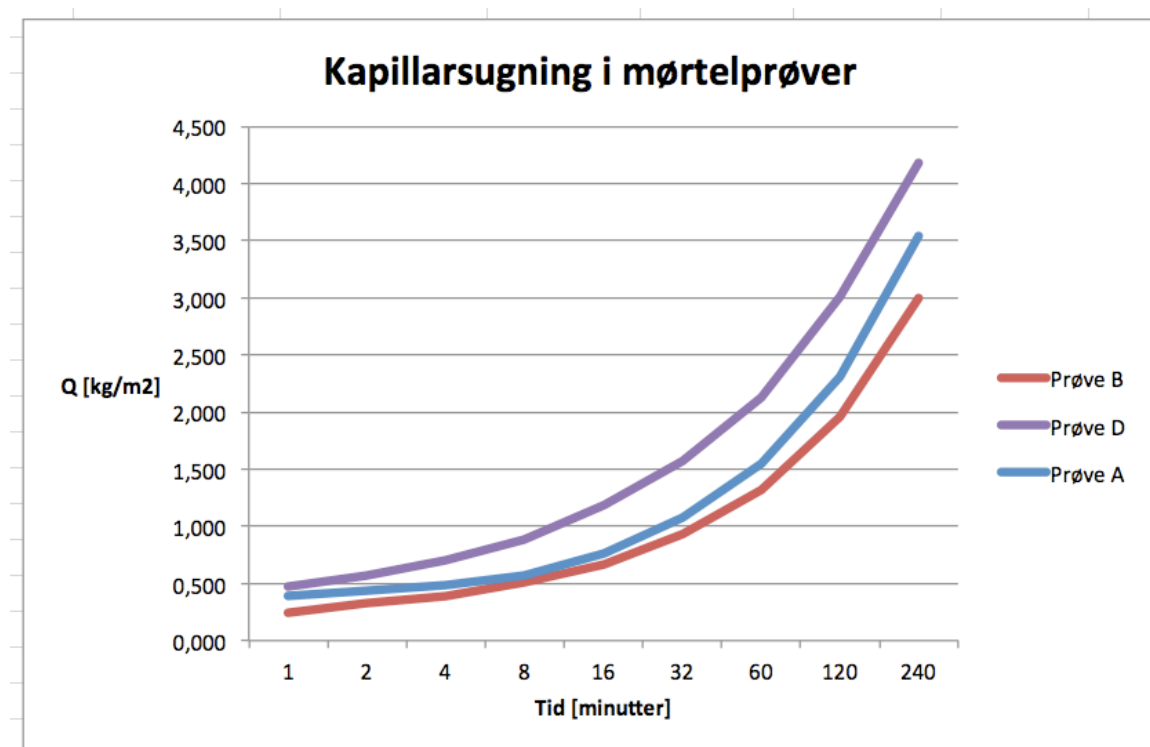
Prøve	Porøsitet	ρ_{dry} [kg/m ³]	ρ_{ssd} [kg/m ³]
A	0,202	2102,35	2303,55
B	0,220	2046,54	2266,05
D	0,245	1993,07	2237,25

Tabel 18 – Gennemsnit af porøsitet og densitet for prøve A, B og D

Densiteten er faldende i forhold til mængde af røggasaske i prøverne, hvilket hænger sammen med at densiteten af røggasaske er lavere end densiteten af cement og sand.

Porøsiteten for prøve D er størst, hvilket var forventeligt da konsistensen af mørtelen under støbning var tør og blev derfor ikke pakket ligeså godt som de øvrige prøver under vibrering. Af skemaet ses også at porøsiteten for prøve B er større end referencens porøsitet, hvilket skyldes den lavere densitet af prøve B, jf. formel [6] i teori afsnittet.

Kapillarsugning



Figur 24 – Mængden af opsugt vand per areal over tid, for mørtelprøve A, B og D

Af grafen ses at den opsugede mængde vand per areal, Q , over tid er størst for prøve D, hvilket betyder at Prøve D har flest eller størst kapillarporer i forhold til prøve B og referenceprøven A. Omvendt kan siges om prøve B at mørtelprøven af denne type har færre eller mindre kapillarporer end referenceprøven. Hvilket må betyde at

prøve B hvor 10% røggasaske erstatter cement, er bedre pakket. Den bedre pakning af prøven, skyldes en mindre densitet for røggasaske, hvorved røggasaske udfylder et større volumen end cementen.

Kapillartal

Kapillartallet for referenceprøven er gennemsnitlig $0,24 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s}^{1/2})$, for prøve B er det gennemsnitlige kapillartal $0,19 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s}^{1/2})$ og for prøve D $0,33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s}^{1/2})$. For alle beregnede kapillartal og øvrige beregninger henvises til bilag 18 – Rådata for kapillarsugning.

Kapillartallet for cementmørtel ligger typisk mellem $0,05 - 0,6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s}^{1/2})$, ifølge Tabel 5 i "Bygningsmaterialer – grundlæggende egenskaber". Derfor ligger alle beregnede kapillartal fra forsøget inden for tabelværdierne.

Konklusion

Styrkeudvikling af mørtelprøver viser at der ved at erstatte 10% af cementen med røggasaske, kan opnås ligeså høj styrke som ved støbning med ren cement. Dette giver anledning til at tro at der muligvis kan opnås endnu højere styrker ved korrekt bearbejdning af røggasaske. Densiteten af røggasaske er lavere end densiteten af cement, hvilket har indflydelse på densiteten og volumen af beton. Ved bestemmelse af porøsitet, ses en øget porøsitet ved øget indhold af røggasaske, hvilket hænger sammen med røggasaskes lavere densitet. Dette spiller en rolle i forhold til styrken og forklarer derfor den lavere styrke ved prøver hvor 20% af cementen er erstattet af røggasaske.

Udvaskningstesten samt analysen af ionkoncentrationer viser stor mobilitet af salte og enkelte metaller, som overskrider kravene for anvendelse af aske i beton. Så for at røggasaske kan anvendes i beton og derved blive et værdifuldt tilsætningsmateriale, skal chloridindholdet reduceres og mobiliteten af tungmetaller, især bly skal reduceres yderligere. Her bør mulighederne for yderligere ekstraktion ved elektrodialysebehandling undersøges.

Af rapporten fremgår det også at glødetabet er for højt i forhold til kravet fra DS/EN 206-1 om et glødetab på maksimalt 5%. Glødetabet for røggasaske overholder dog kravet for kategori C og det bør derfor undersøges hvorvidt røggasaske alligevel kan bruges i beton.

På trods af forhøjede værdier i forhold til chloridindhold, metalmobilitet og glødetab, vurderes det at der er muligheder for at gøre røggasaske til et brugbart materiale i betonstøbning.

Videre forskning

Styrkeudvikling og chloridindhold

Af undersøgelser vedrørende chloridindholdet i røggasaske er det vist at chloridindhold reduceres til et acceptabelt niveau, ved at vaske asken. Dog viser styrkeudviklingen af mørtelprøver støbt med vasket røggasaske, en lavere styrke end prøver støbt med røggasaske der ikke er vasket. Det kunne derfor være interessant at undersøge styrkeudviklingen af røggasaske hvor chloridindholdet reduceres ved længere tid i elektrodialysebehandling, som også er en form for vask af asken.

Tungmetaller

Koncentrationen af tungmetaller i røggasaske er et centralt problem, da flere af disse tungmetaller er mobile og derfor udgør en skadelig risiko for miljøet. Dette ses af udvaskningstesten hvor mobiliteten for bly er meget stor. Det ville derfor være oplagt at foretage en batchleachtest på røggasaske fra affaldsforbrænding, hvor den reelle tid i elektrodialyse er længere end for asken benyttet ved dette projekt.

Knusning af aske

På baggrund af information fra andre studiegrupper som har udført styrketest med renknust slamaske og opnået bedre resultater i styrkeudvikling, kunne det være interessant at udføre lignende forsøg på røggasaske. Med ønsket om at opnå højere styrker end allerede opnået. Desuden vil en måling af askens densitet efter knusning være oplagt.

Armering

Efter at have reduceret chloridindholdet i røggasaske til et acceptabelt niveau, vil det være interessant at undersøge hvordan og om armeringen i beton bliver påvirket af tilsætning af røggasaske i en betonblanding.

Hærdetid

I løbet af projektet er det to gange forsøgt at udføre et hærdeforsøg på mørtelprøver indeholdende røggasaske. Dog uden held, da maskinen til måling af hærdetid (VICAT) ikke ville samarbejde og forsøget måtte derfor undlades. Det er dog stadig af interesse at undersøge hærdetiden for mørtelprøver med røggasaske, da dette siger noget om bindingstiden og hærdeprocessen.

Glødetabet

Da glødetabet for røggasaske overskrider kravet for anvendelse i beton, bør det undersøges om det er muligt at reducere glødetabet.

Litteraturliste

Litteratur

- DS 2426:2009. 2. udgave. Dansk Standard.
- DS/EN 196-1:2005. 2. udgave. Dansk Standard.
- DS/EN 206-1:2002. 2. udgave. Dansk Standard.
- DS/EN 450-1:2012. 3. udgave. Dansk Standard.
- Flyvbjerg, John og Hjelmar, Ole. Restprodukter fra røggasrensning ved affaldsforbrænding 3. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 92. 1997. VKI institut for vandmiljø.
- Geiker, M. og Nielsen, A. Kapitel D5 i Materialebogen. 2008. Nyt Teknisk Forlag.
- Gottfredsen, F. R., Nielsen, A. Bygningsmaterialer – Grundlæggende egenskaber. 2008. Polyteknisk Forlag.
- <http://www.voscc.dk> – Viden om SCC. Teknologisk Institut. 2012. Senest besøgt 04.01.2013.
- Johannesson, Björn. (A). Introduction to concrete technology. 2012. Department of Civil Engineering, DTU.
- Johannesson, Björn. (B). Lecture notes course 11563 Concrete Technology. 2012. Lecture 1, slide 25+31.
- Jensen, P.E., Kirkelund, G.M., Ottosen, L.M., Christensen, I.V. og Pedersen, A.J. Opgradering af farligt røggasaffald. 2010. Dansk kemi, 91, nr. 4.
- Restproduktbekendtgørelsen: BEK nr. 1480 af 12.12.2007 - <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=113963>. Senest besøgt 27.12.12.
- Aalborg Portland. Cement og beton. 2010.

Bilag

- Bilag 01 – E-mail korrespondance med Pernille E. Jensen
- Bilag 02 – ICP Teori
- Bilag 03 – Ionchromatograf teori
- Bilag 04 - Porøsitet, densitet og kapillarsugning.
- Bilag 05 - Gipskompositter.
- Bilag 06 – Leaching af tungmetaller fra aske
- Bilag 07 - Mørtelstøbninger
- Bilag 08 – Rådata fra trykprøvning
- Bilag 09 – Rådata fra IC måling
- Bilag 10 – Rådata fra ICP måling for oplukning
- Bilag 11 – Rådata fra leaching
- Bilag 12 – Organisk stof
- Bilag 13 - Vandindhold
- Bilag 14 - Vandopløselighed
- Bilag 15 – Bufferkapacitet
- Bilag 16 – Densitet af røggasaske
- Bilag 17 – Porøsitet og densitet
- Bilag 18 – Rådata for kapillarsugning
- Bilag 19 – Kemisk indhold i ubehandlet røggasaske

Appendix: BMA-vejledninger

- A: pH i M KCl opslemning. Jord-væske forhold 1:2,5. Metode 4. Electrochemistry in Civil Engineering. 2010.
- B: Vandindhold i jord. Metode 9. Electrochemistry in Civil Engineering. 2010.
- C: Oplukning af jordprøve efter DS 259. Metode 11A. Electrochemistry in Civil Engineering. 2010.
- D: Glødetab i jord. Metode 16. Electrochemistry in Civil Engineering. 2010.
- E: Måling af ledningsevne i jord. Metode 17. Electrochemistry in Civil Engineering. 2010.
- F: Vandopløselighed. CampusNet. September, 2012.
- G: Vandopløselige anioner. CampusNet. September, 2012.
- H: Method for measuring Buffer Capacity of Soils and Sludge. Reddy, K.R., Donahue, M., Saichek, R. E., Sasoaka, R., 1999. Journal of the Air & Waste Management Association, 49:7, 823-830.

Bilag 01 – E-mail korrespondance med Pernille E. Jensen, forsker ved DTU.

REFA 9

> From: pej@byg.dtu.dk
> To: s090016@student.dtu.dk
> Subject: RE: referencer til RGA
> Date: Tue, 13 Nov 2012 19:50:54 +0000
>
> Ok, jeg kan så oplyse at REFA 9 er kørt ved 3 Ampere i 10 timer. Opholdstiden i stakken har været 1,9 timer (dvs. det er den reelle tid asken har været udsat for elektrodialyse) og asken har været udsat for carbonisering (opbevaret under fugtige forhold) inden rensningen.
>
> VH Pernille
>
> -----Original Message-----
> From: s090016@student.dtu.dk
> Sent: 13 November 2012 19:38
> To: Pernille Erland Jensen
> Subject: RE: referencer til RGA
>
> Hej igen.
>
> Ja det må være REFA 9.
> Jeg siger tak. :)
>
> Jeg mente egentlig røggasrensningsanlægget, men elektrodialyse anlægget er vel mere relevant.
>
> Mvh.
> Katharina
>

REFA 5

> From: pej@byg.dtu.dk
> To: s090016@student.dtu.dk
> Subject: RE: REFA 5
> Date: Fri, 30 Nov 2012 14:11:13 +0000
>
> Hej Katarina
>
> Ja, ligesom REFA 9 er asken fra REFA 5 karboniseret inden elektrodialysebehandling. I REFA 5 er der kørt med 5A, men ved forsøgets afslutning var strømstyrken faldet til 4A, fordi ledningsevnen var faldet. Dvs modstanden steg og derfor steg også spændingen var mere end strømforsyningen kunne klare ($U=RxI$). Og forsøget varede 14,5 timer, dvs. en reel opholdstid for asken på 2.7 timer.
>
> VH Pernille
>
>
> -----Original Message-----
> From: s090016@student.dtu.dk
> Sent: 29 November 2012 15:29
> To: Pernille Erland Jensen
> Subject: REFA 5
>
> Hej Pernille.
>
> Du informerede mig på et tidspunkt om elektrodialyse processen for Refa 9, altså om hvor længe teste havde kørt ved 3 ampere og den reelle tid asken havde været udsat for elektrdialyse.
>
> Kender du til denne process for REFA 5 ??
>
> Hilsen
> Katharina

Bilag 02 - ICP teori

Udleveret af Sabrina J. Madsen, laborant på DTU. 2012.

13 ICP-OES og ICP-MS

Massespektrometri er en metode til bestemmelse af molekylmasser og molekylstruktur ved analytisk arbejde. MS teknikken er meget fleksibel, den kræver kun minimale prøvemængder, og det er en særdeles følsom teknik. Til mange analytiske formål kan MS med fordel kombineres med gaskromatografi GC-MS eller væsekromatografi LC-MS.

Nøglebegreber

ICP	Forkortelse for Ion Coupled Plasma. En metode til at danne plasma.
Plasma	En tilstandsform på linje med de tre traditionelle tilstandsformer gas, væske og fastfase.
Plasmaegenskab	En elektrisk ladet gas ved så høj temperatur, at gasatomerne danner ioner og elektroner. Kan lede strøm og påvirkes af magnetfelt.
Plasmagas	Til plasmadannelse bruges normalt den inaktive luftart argon.
OES	Forkortelse for Optical Emission Spectroscopy. Det vil sige måling af lysintensiteter ved hjælp af et spektrometer.
MS	Forkortelse for massespektroskopi.
Torch	Indretning, der kan tilføre argon-gas så meget energi, at det danner plasma. Funktionen er at excitere analyt-atomer.
Exciteret atom	Atom, der er bragt på ustabil form, ved ekstraordinær energitilførsel, f.eks. fra en plasma.
Lysudsendelse	Når exciterede atomer forlader plasmaen, afgiver de deres ekstra energi igen. Det sker i form af lys (fotoner).
Forstøver	Indretning, der kan bringe en prøve på homogen aerosolform, således at prøven kan føres op i torchen til forgasning.

13.1 ICP-OES

Ved ICP-OES måles udsendt lysenergi fra exciterede atomer efter samme princip som i flammefotometrien (OES = Optical Emission Spectroscopy). De forskellige atomer udsender lys af karakteristiske bølgelængder, når de exciteret.

Dette forhold, kombineret med at intensiteten af det udsendte lys er proportional med koncentrationen af det pågældende grundstof i prøven, benyttes til kvantitative bestemmelser.

13.1.1 Plasma og ICP-torch

ICP er en forkortelse for Inductively Coupled Plasma.

En plasma er en tilstandsform, den betragtes ofte som den fjerde tilstandsform sammen med de tre traditionelle: fastform, flydende form og gasform.

Plasmaformen er til stede, når en elektrisk ledende gas indeholder positive og negativt ladede partikler (ioner og elektroner) i et koncentrationsniveau over 1-2 %.

En plasma kan dannes af en gas, hvis der er tilstrækkelig energi til stede til, at atomer på gasform spaltes i ladede ioner og elektroner.

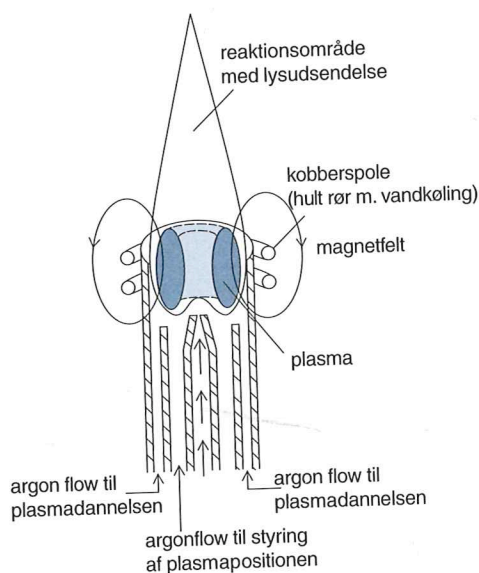
I forbindelse med ICP anvendes normalt gassen argon som plasmadanner.

Torchen

Plasmaen dannes i toppen af en særlig indrettet brænderenhed, på engelsk en torch.

I denne fremstilling er valgt at bibeholde det engelske udtryk torch i stedet for at oversætte det som 'brænder'. Det begrundes med, at ordet brænder giver associationer til flamme, men her drejer det sig ikke om en flamme, men om plasma.

Torchen er opbygget af tre koncentriske kvartsrør som vist på figur 13.1.



Figur 13.1. Torchens opbygning.

I figuren ses, at i inderrøret sendes den forstøvede prøve op i plasmaen, flowet er typisk på omkring 1 liter argon i minuttet.

I mellemrummet mellem yderrøret og midterrøret passerer den argon, der danner plasmaen, i toppen. Flowet ligger typisk omkring 15 liter pr. minut, men kan variere en del afhængigt af fabrikat og opgave.

Imellem inderrør og midterrør passerer endnu en gasstrøm med argon. Denne gas kan bruges til at regulere plasmadannelsens position i toppen af torchen. Her ligger flowet typisk omkring 1 liter argon pr. minut.

Plasmadannelsen startes med en elektrisk gnistudladning.

Omkring torchens top er viklet en kobberspole, der danner et magnetfelt, som tilfører energi.

Energien bruges til at udvikle plasmadannelsen, efter den er startet op via gnistdannelsen. Ved passende regulering opnås et energi i plasmaen, der svarer til temperaturer på 5000-9000 °C.

Energiførslen er så kraftig, at spolen må være opbygget af hule kobberør, således at den kan køles indefra med vand.

Selve lysudsendelsen finder sted der, hvor atomerne forlader plasmaen, dvs. i torchens top som vist på figur 13.1.

13.1.2 ICP-OES apparatur

Apparatur til ICP-OES målinger er opbygget af tre hovedsektioner:

- Forstøver
- ICP-torch
- Spektrometer

En principskitse af et ICP-optisk emissionsspektrometer er vist i figur 13.2.

I figuren genkendes principperne for opsugning og forstøvning af prøve fra flammefotometret og AAS.

Den mest principielle forskel i forhold til flammefotometret og AAS er, at en ICP-torch erstatter brænderhoved.

En plasma kan dannes af en gas, hvis der er tilstrækkelig energi til stede til, at atomer på gasform spaltes i ladede ioner og elektroner.

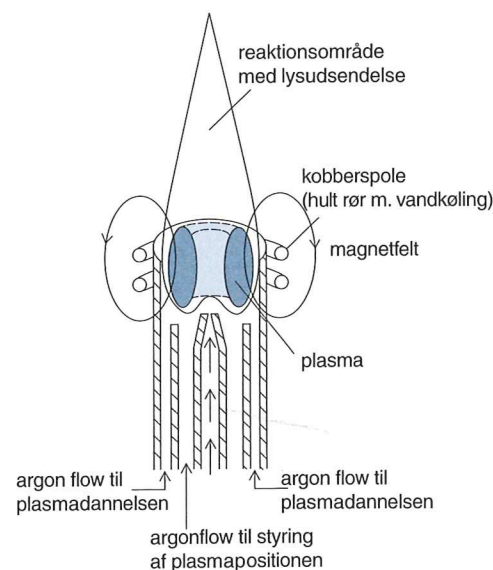
I forbindelse med ICP anvendes normalt gassen argon som plasmadanner.

Torchen

Plasmaen dannes i toppen af en særlig indrettet brænderenhed, på engelsk en torch.

I denne fremstilling er valgt at bibeholde det engelske udtryk torch i stedet for at oversætte det som 'brænder'. Det begrundes med, at ordet brænder giver associationer til flamme, men her drejer det sig ikke om en flamme, men om plasma.

Torchen er opbygget af tre koncentriske kvartsrør som vist på figur 13.1.



Figur 13.1. Torchens opbygning.

I figuren ses, at i inderrøret sendes den forstøvede prøve op i plasmaen, flowet er typisk på omkring 1 liter argon i minuttet.

I mellemrummet mellem yderrøret og midterrøret passerer den argon, der danner plasmaen, i toppen. Flowet ligger typisk omkring 15 liter pr. minut, men kan variere en del afhængigt af fabrikat og opgave.

Imellem inderrør og midterrør passerer endnu en gasstrøm med argon. Denne gas kan bruges til at regulere plasmadannelsens position i toppen af torchen. Her ligger flowet typisk omkring 1 liter argon pr. minut.

Plasmadannelsen startes med en elektrisk gnistudladning.

Omkring torchens top er viklet en kobberspøle, der danner et magnetfelt, som tilfører energi.

Energien bruges til at udvikle plasmadannelsen, efter den er startet op via gnistdannelsen. Ved passende regulering opnås et energi i plasmaen, der svarer til temperaturer på 5000-9000 °C.

Energitilførslen er så kraftig, at spolen må være opbygget af hule kobber rør, således at den kan køles indefra med vand.

Selve lysudsendelsen finder sted der, hvor atomerne forlader plasmaen, dvs. i torchens top som vist på figur 13.1.

13.1.2 ICP-OES apparatur

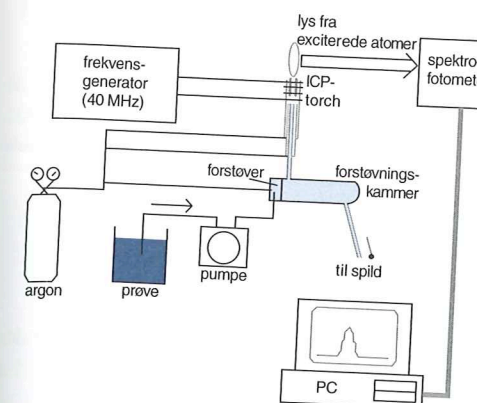
Apparatur til ICP-OES målinger er opbygget af tre hovedsektioner:

- Forstøver
- ICP-torch
- Spektrometer

En principskitse af et ICP-optisk emissionsspektrometer er vist i figur 13.2.

I figuren genkendes principperne for opsugning og forstøvning af prøve fra flammefotometret og AAS.

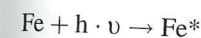
Den mest principielle forskel i forhold til flammefotometret og AAS er, at en ICP-torch erstatter brænderhoved.



Figur 13.2. Principskitse af ICP-OES.

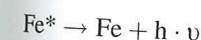
Prøveopsugningen foregår ved, at en pumpe aktiveres en kort periode, hvor den suger prøve op i forstøveren. Herfra føres prøven videre til plasmaen, hvor atomerne exciteres, de optager energikvanter i form af fotoner.

Med jernatomer som eksempel:



Hvor * ved Fe^* symboliserer, at atomet har modtaget et energikvante, det er exciteret (anslået).

Når Fe^* forlader plasmaet, afgiver det straks energikvantet igen, da den exciterede tilstand er ustabil:



Styrken af det udsendte lys er proportionalt med den stofmængde, der tilføres, hvilket betyder, at man på spektrofotometret registrerer et signal, der stiger mod maksimum midt i pumpens aktiveringsperiode og falder til nul igen.

Hvis signalet fra spektrofotometret behandles på en pc, således at signalets størrelse afbildes som funktion af tiden, fås derfor en top som vist på figur 13.2.

13.1.3 Analyseprincip

På den pc, der er tilsluttet spektrofotometret, opsamles data med lysintensitet som funktion af ti-

den. Disse rådata behandles i pc'en, hvor man får registreret en top, og arealet af den dannede top beregnes.

Toppens areal er et udtryk for koncentrationen i den prøve, der blev opsøgt. Dette benyttes til kvantitativ bestemmelse ved at fremstille en standardrække i et passende koncentrationsområde. Når standardrækken måles på ICP-OES-instrumentet fås en lineær sammenhæng mellem toparealet A og koncentration c:

$$A = a \cdot c + b$$

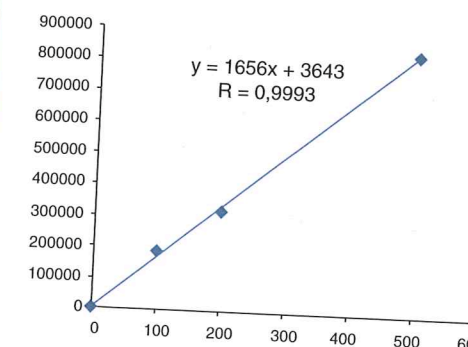
Ved bestemmelse af en prøve med ukendt koncentration kan denne sammenhæng efterfølgende benyttes til at bestemme prøvens indhold af det pågældende metal.

Eksempel 13.1

En vandig opløsnings indhold af Al skal bestemmes. Derfor fremstilles en standardrække, som måles med ICP-OES ved 308 nm:

µg/L	0	100	200	500
Topareal	0	185768	319094	835021

Ved en grafisk afbildning vurderes kurven til at være lineær:



Ved efterfølgende lineær regression på måledata bekræftes lineariteten, da R beregnes til 0,9993. Der fås følgende sammenhæng mellem topareal og koncentration:

$$A = 1656 \cdot c + 3643$$

En prøve måles. Den giver toparealet 555726, og koncentrationen beregnes:

$$c = (A - 3643)/1656$$

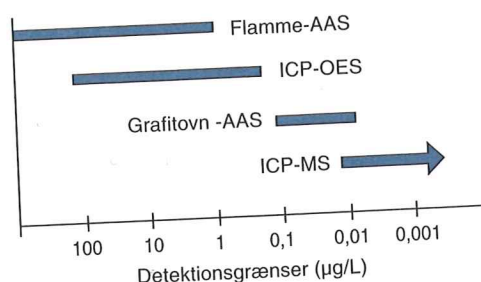
$$c = (555726 - 3643)/1656$$

$$c = 333 \text{ µg/L}$$

ICP-OES metoden

Hvis man har et diodearray-spektrofotometer, kan man måle mange elementer samtidig ved ICP-OES.

Analysen giver et pålideligt resultat, selv ved lave koncentrationer helt ned til omkring 1 milligram pr. liter, jf. figur 13.3.



Figur 13.3. Detektionsgrænser.

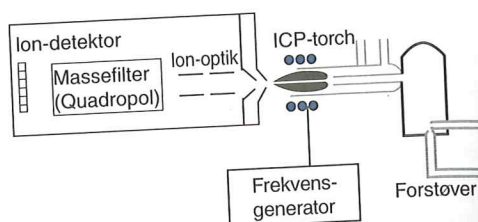
Af figur 13.3 fremgår, at ICP-OES er fuldt på højde med flamme-AAS med hensyn til at måle lave koncentrationer. Desuden måler ICP-OES-instrumenterne normalt mere præcist end de tilsvarende flamme-AAS-metoder. Da det samtidigt er betydeligt mere fleksibelt, fordi det kan måle flere metaller samtidig, så har metoden mange fortrin frem for AAS.

Til gengæld er AAS billigere i anskaffelse og drift, og desuden er det nemmere at betjene for rutinerede.

13.2 ICP-MS

I stedet for at koble ICP sammen med et spektrometer til ICP-OES, kan ICP også kobles direkte i forbindelse med massespektrometer, og så kaldes metoden for ICP-MS.

Opbygningen af instrumentet er vist på en principskitse figur 13.4.



Figur 13.4. ICP-MS instrumentprincip.

ICP-enheden er den samme som gennemgået under ICP-OES. Med hensyn til funktion og anvendelse af MS henvises til MS kapitel 15.

ICP-MS metoden

Med ICP-MS kan metaller påvises og bestemmes kvantitativt i betydelig lavere koncentrationer end ved AAS-flamme og grafitovnsteknikkerne. Som det fremgår af figur 13.03, helt ned til under 1 mikrogram pr. liter.

Dette lave niveau er en fordel ved måling af metaller i grundvand, hvor koncentrationerne af tungmetaller er lave, og ved målinger på spildevand, hvor der stilles krav om lave udledningsværdier.

Ionchromatograf

Teori

Ionchromatografi er en form for væskechromatografi, hvor retentionstiden hovedsageligt styres af ionudvekslingen mellem ionerne fra sin analyt og de modsat ladede ioner som befinder sig i eller på den stationære fase. Den stationære fase tilbageholder analytten. Dens egenskaber har stor betydning for hvor hurtigt de enkelte prøvekomponenter kan transporteres gennem systemet, og dermed for den differentiering af komponenternes vandringshastighed, der har ansvaret for at de enkelte komponenter i prøven kan adskilles. Den chromatografiske adskillelse af prøvens komponenter bygger altså på det princip at komponenterne hænger mere eller mindre godt fast på den stationære fase, og derfor kan passere gennem denne med forskellig hastighed. Ved ionchromatografi er den stationære fase en ionbytter der kan holde ladede partikler tilbage på søjlen. Komponenternes forskellige form og ladning påvirker deres affinitet til den stationære ionbytterfase og dermed sker der en adskillelse. Jo større ladning, des større retentionstid.

Affinitet: analyttens tilbøjelighed til at blive "hængende" i den stationære fase. Hvis en komponent f.eks. har en høj affinitet til den stationære fase, kommer den langsomt igennem systemet.

Prøven ledes igennem systemet med en eluent. Hvis eluenten er kraftig, vil analytten passere hurtigt igennem den stationære fase, og omvendt hvis den er svag. f.eks. for at adskille syrerester (eks. SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Cl^-) er det anioner (negative ioner) der skal tilbageholdes på den stationære fase. Her vil Cl^- komme ud som den første, derefter SO_4^{2-} og til sidst PO_4^{3-} .

Den stationære fase skal derfor indeholde immobiliserede kationer (positive ioner) for at tilbageholde analytten. Det modsatte gælder naturligvis for en analyt hvor der måles for kationer.

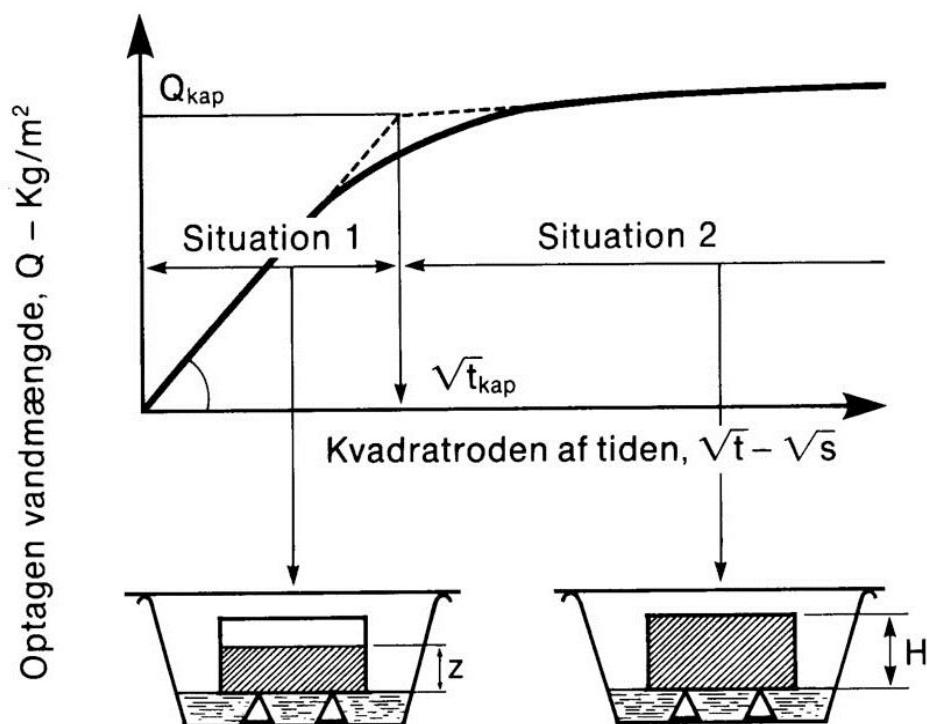
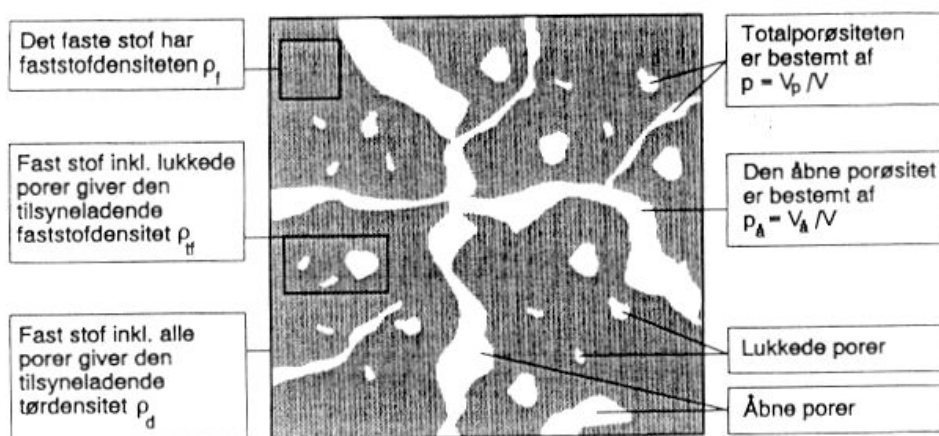
Eluent

Eluenten skal fremstilles efter den valgte kolonne, se under kolonne med den valgte eluent i den grønne mappe.

Standarder

Standarder: Se siden for fremstilling af standarder. Kemikalier til fremstilling af standarder skal alle være vandfrit, derfor tørres de inden brug i varmeskabet. På fremstillingsskemaet er beskrevet hvordan.

BILAG 04 - PORØSITET, DENSITET OG KAPILLARSUGNING



Indholdsfortegnelse

1. FORMÅL	3
2. OMFANG	3
3. BAGGRUND	4
3.1. GENERELT	4
3.2. PORØSITET OG DENSITET	4
3.3. KAPILLARSUGNING	5
4. EKSPERIMENTER	8
4.1. PORØSITET OG DENSITET	8
4.2. KAPILLARSUGNING I MURSTEN	8
5. RAPPORTERING	9
6. LITTERATUR	9
BILAG 1: SKEMA 1 – PORØSITET OG DENSITET	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
BILAG 2: SKEMA 2 – KAPILLARSUGNING I	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
BILAG 3: SKEMA 3 – KAPILLARSUGNING II	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Forside:

Øverst: Skitse af et porøst materiale med forskellige materialeparametre defineret.

Nederst: Illustration af opsugningsforsøg.

1. Formål

Øvelsens formål er dels at måle porøsitet og densitet for et eller flere byggematerialer, dels at måle et eller flere byggematerialers kapillarsugningsevne. De anvendte byggematerialer oplyses på forsøgsdagen.

2. Omfang

Indledning: Øvelsen indledes med en fælles orientering om det apparatur, der skal anvendes.

Gruppearbejde: Herefter arbejder grupperne med hver deres prøvelegemer.

Afslutning: Øvelsen sluttes med, at

alle grupper indtaster måleresultater på Campusnet til brug ved rapporteringen.
Manglende resultater fra en gruppe medfører nedsat karakter i den endelige bedømmelse!

3. Baggrund

3.1. Generelt

En bygningskonstruktions egenskaber afhænger af hvilket materiale den bygges af. Disse egenskaber kan fx være bæreevnen eller isolansen. Mange af byggematerialernes egenskaber påvirkes af hvor våde de er. Det gælder fx træ som vil angribes af svamp hvis der er et højt fugtindhold i det. Anbringes træet tæt sammen med våd beton vil svamp således angribe træet, ligesom styrken af træet vil mindskes med et øget fugtindhold.

3.2. Porøsitet og densitet

Et materials densitet er afgørende for mange af dets egenskaber. En generel regel er at jo tungere et materiale er, jo stærkere er det, og jo lettere det er, jo bedre isolerer det. *Densiteten kan bestemmes som massen delt med rumfanget.* Dog kan materialet indeholde en ukendt mængde vand, og den bestemte densitet er derfor en dårligt anvendelig størrelse, hvis masseandelen som vand udgør er ukendt. Derfor arbejdes ofte med følgende fire densitetsbegreber:

<i>faststofdensitet</i>	ρ_f
<i>tilsyneladende faststofdensitet</i>	ρ_{tf}
<i>tørdensitet</i>	ρ_d
<i>densitet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand</i>	ρ_{ssd}

og de dermed sammenhørende parametre til karakterisering af porøsitetsforholdene

<i>total porøsitet</i>	p
<i>åben porøsitet</i>	p_a
<i>absorption</i>	w_a

Størrelserne ρ_f og ρ_{tf} anvendes dog temmelig sjældent. Fig. 1 illustrerer de tre rumfangsdefinitioner.

I det følgende gives en mere udførlig forklaring på anvendte begreber til karakterisering af porøse eller kornede materialer.

Faststofdensiteten defineres som materialets masse i tør tilstand divideret med faststofrumfanget, der er vist på figur 1. Faststofrumfanget er selve det faste materiale uden nogen form for porer. Faststofdensiteten kan bestemmes ved pulverisering af prøven.

Den tilsyneladende faststofdensitet defineres som materialets masse i tør tilstand divideret

med det tilsyneladende faststofrumfang. Det tilsyneladende faststofrumfang betegner rumfanget af det der set udefra fremtræder som faststof, dvs. faststof inklusiv lukkede porer.

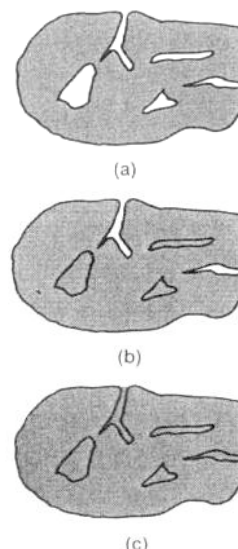


Fig. 1. Rumfangsdefinitioner. (a) absolut faststofrumfang (faststof), (b) tilsyneladende faststofrumfang (faststof + lukkede porer), (c) kornrumfang (faststof + lukkede porer + åbne porer).

Tørdensiteten defineres som materialets masse i tør tilstand delt med prøvelegemets rumfang. Prøvelegemets rumfang betegner det rumfang, faststoffet beslaglægger hvor alle typer porer medtages. Det er altså det ydre rumfang.

Densiteten i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand (saturated surface dry, s.s.d.) defineres som prøvelegemets masse i s.s.d.-tilstanden divideret med prøvelegemets ydre rumfang.

Lukkede porer betegner porer der ikke er tilgængelige for vand fra materialets overflade.

Åbne porer betegner porer der er tilgængelige for vand fra materialets overflade.

Totalporøsiteten er forholdet mellem porerumfang (lukkede + åbne porer) og prøvelegemets ydre rumfang. Udtrykt ved de tidligere definerede densiteter haves porøsiteten som

$$p = p_a = \frac{\rho_f - \rho_d}{\rho_f} \quad (1)$$

I de fleste porøse materialer er poresystemet åbent, og derfor vil den åbne porøsitet være lig med totalporøsiteten.

Absorptionen er betegnelsen for massen af det vand der kan optages i de åbne porer via kapillarsugning divideret med massen af det tørre materiale. Den hænger sammen med de to tidligere omtalte densiteter ved følgende ligning.

$$w_a = \frac{\rho_{ssd} - \rho_d}{\rho_d} \quad (2)$$

Vandindholdet er vand-tørstofforholdet defineres som massetabet af en prøve der tørres ved 105 °C, udtrykt i % af prøvens masse efter tørringen.

Fugtoptagelsen der foregår i de åbne porer, vil være afhængig af porøsiteten. Hvis der ingen hulrum er, dvs. porøsiteten er nul, vil der ikke kunne optages vand. Hvis der derimod haves en stor porøsitet i et materiale, samtidig med poreradius er mellem $10^{-7}\text{m} < r < 10^{-4}\text{m}$, er der mulighed for at optage meget vand i det givne materiale. Dette er fx tilfældet med teglsten.

3.2.1. Bestemmelse af porøsitet og densitet

Ved den såkaldte veje-dyppe-veje metode kan densiteten og porøsiteten for et materiale findes. Metoden udnytter Archimedes lov der siger at opdriften på et legeme i en væske er lig tyngdekraften på det fortrængte væskevolumen. Dette betyder altså at vægten af prøvelegemet under vand m_u har en opdrift som gør, at prøvelegemet ikke vejer lige så meget under vand, som det gør over vand. Forskellen på vægten under vand og vægten over vand er lig vægten af den væske som prøvelegemet fortrænger.

Volumen af prøvelegemet nedsænket i vand kan bestemmes ud fra nedenstående formel.

$$V = \frac{m_{ov} - m_u}{\rho_w} \quad (3)$$

hvor

V er prøvelegemets volumen [m^3]

m_{ov} er massen i luft af prøvelegemet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand [kg]

m_u er det målte masse af prøvelegemet neddyppet i vand [kg]

ρ_w er vands densitet [kg/m^3]

Massen m_{ov} angiver hvor meget prøvelegemet vejer, når det er fyldt med vand i de åbne porer. Massen af prøvelegemet under vand, m_u er mindre end m_{ov} som følge af opdriften beskrevet ved Archimedes Lov.

Voluminet af de åbne porer i prøvelegemet findes efter formlen:

$$V_a = \frac{m_{ov} - m_0}{\rho_w} \quad (4)$$

hvor

V_a er voluminet af de åbne porer [m^3]

m_0 er tørmassen af prøvelegemet [kg]

Tørmassen er den målte masse efter ovntørring ved 105 °C, hvorved alt vand i det åbne poresystem fordampes. Ud fra det åbne porevolumen kan den åbne porøsitet beregnes ved (5).

$$\rho_a = \frac{V_a}{V} = \frac{m_{ov} - m_0}{m_{ov} - m_u} \quad (5)$$

hvor

ρ_a er den åbne porøsitet [-]

Endvidere kan tørdensiteten af materialet bestemmes ved (6) ud fra den fundne tørmasse og det totale volumen.

$$\rho_d = \frac{m_0}{V} \quad (6)$$

hvor

ρ_d er materialets tørdensitet [kg/m^3]

Densiteten af prøvelegemet i vandmættet, overfladetør tilstand bestemmes ved (7).

$$\rho_{ssd} = \frac{m_{ov}}{V} \quad (7)$$

hvor

ρ_{ssd} er materialets densitet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand [kg/m^3]

3.3. Kapillarsugning

En vandoverflade i en vandfyldt pore – en menisk – vil altid være krum. I små porer med lille diameter kan denne krumning være betydelig, hvorimod den for meget store diametre – fx i en kop – er uden praktisk relevans. Det hydrostatiske undertryk i vandet umiddelbart under menisken er afgørende for et af de vigtigste transportfænomener i mange porøse materialer – kapillarsugning.

Figur 2 viser stighøjden i et kapillarrør, der ækvivalerer en vandfyldt pore. Som det ses

danner meniskens kontakt til kapillarrørets inderside en vinkel med overfladen af kapillarrøret, kaldet kontaktvinklen. Desuden virker en overfladespænding i vandet som vist. I tilfældet med små diametre, er overfladespændingen afgørende for vandtransporten idet den resulterer i en opadrettet kraft der overstiger tyngdekraften og friktionen med rørvæggen og trækker vandet op i røret.

Hastigheden hvormed vandet bevæger sig op i røret vil aftage med tiden, idet friktionen mellem væg og vand vil stige når vandet dækker et større indre areal i røret. Endvidere øges tyngdekraften med vægten af vandet i røret.

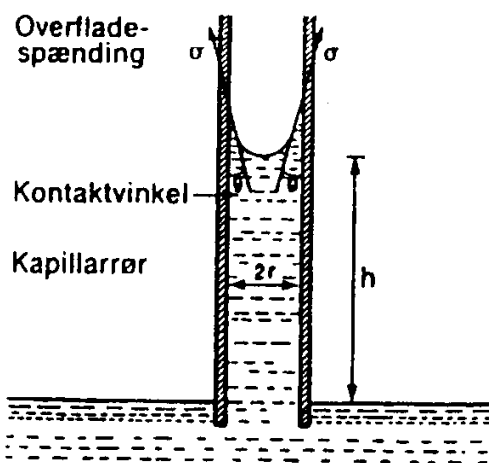


Fig. 2. Stighøjde i et kapillarrør.

Hvis porerne er meget små, vil der være en betydelig modstand mod vandtransporten, der derfor vil foregå meget langsomt. Samtidig vil der være en meget stor kraft idet krumningen på menisken er stor. En væskesøjle kan således i teorien blive flere kilometer høj i meget tynde rør. Dette vil dog tage lang tid at opbygge, samtidig med at det kræver at der ikke er nogen luftbobler i væskesøjlen, idet disse vil bryde kapillarvirkningen. Det er fx ved kapillartransport at et træ får transporteret vand fra rødderne og op til bladene.

Af nedenstående formel ses hvor stort det hydrostatiske undertryk under menisken bliver.

$$p_h = -\frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (8)$$

hvor

p_h er det hydrostatiske undertryk [Pa]
 σ er overfladespændingen [N/m]
 θ er kontaktvinklen [°]
 r er radius i menisken [m]

Som det fremgår af (8) bliver undertrykket stort når radius mindskes. I porer over en vis størrelse vil der ikke forekomme kapillartransport, idet det hydrostatiske undertryk ikke vil resultere i en tilstrækkelig stor kraft til at flytte vandet. Derfor er det ikke alle åbne hulrum som kan fyldes ved kapillartransport af vand.

Når et materiale anbringes i kontakt med vand, vil der ved kapillarsugning transporteres vand op igennem materialet. Dette vil foregå ved aftagende hastighed når vandoverfladen har nået toppen af prøvelegemet, eller der er ligevægt mellem kapillarkræfterne på vandet og de modsatrettede kræfter hidrørende fra friktion og tyngdekraft. Ved et kapillarsugningsforsøg anbringes et materiale med kendt overfladeareal i kontakt med en fri vandoverflade, og der foretages en vejning af prøven til forskellige tidspunkter. Resultaterne fra et sådan forsøg ses i figur 3.

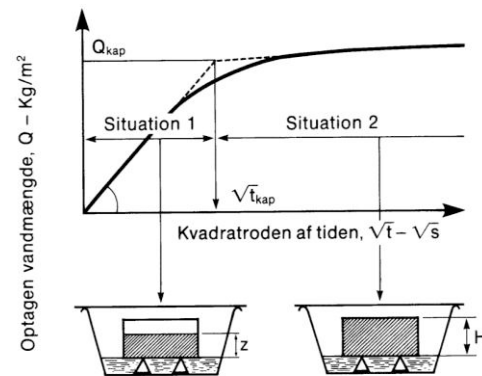


Fig. 3. Illustration af kapillarsugningsforsøg.

Den stiplede linje viser det ideelle forhold, hvor den optagne vandmængde pr. areal, Q som funktion af $t^{1/2}$ afbilder en ret linje, indtil vandmængden svarende til Q_{kap} er opsuget jf. situation 1 i figur 3. Herefter optages ikke mere vand, og hældningen af kurven er derfor nul, jf. situation 2 i figur 3. I virkeligheden vil en kurve se ud som vist ved den fuldt optrukne linje, fordi alle porerne ikke fyldes lige hurtigt. Ligeledes vil der for nogle materialer være en svagt stigende tendens efter vandoverfladen har nået toppen af prøvelegemet; dette skyldes at fyldningen af de mindste porer i materialet tager lang tid.

På figur 3 ses skæringspunktet mellem de to stiplede linjer. Dette skæringspunkt ($t_{kap}^{1/2}$, Q_{kap}) findes ud fra tangenter til den krumme kurve. Ud fra koordinaterne til punktet kan kapillaritetstallet, k ($kg/(m^2 \cdot s^{1/2})$) udregnes. Denne parameter angiver hældningen af den første kurve som vist i (9).

$$k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}} \quad (9)$$

Et stort kapillaritetstal betyder at opsugningen foregår hurtigt, mens et lavt omvendt angiver at opsugningen foregår langsomt. Dette har fx betydning for hvor meget vand en mursten når at opsuge i regnvejr.

3.3.1. Bestemmelse af opsugningsparametre

Ved et opsugningsforsøg kan en række materialeegenskaber bestemmes. I første omgang skal den opsugede masse pr. areal bestemmes ud fra (10).

$$Q = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (10)$$

hvor

Q er den opsugede masse pr. opsugningsareal [kg/m^2]
 m_t er massen af prøvelegemet til tiden t [kg]
 m_0 er tørmassen af prøvelegemet [kg]
 A er opsugningsarealet [m^2]

Massen af det forkonditionerede prøvelegeme, m_0 henviser til en vedtagen standardtilstand som prøvelegemet skal være i ved forsøgets start. Prøvelegemet har ved denne øvelse været udsat for en temperatur på 105 °C i to døgn inden forsøgets start.

Når t_{kap} er bestemt som tidligere beskrevet kan modstandstallet M beregnes af (11). Dette siger noget om den indre modstand i materialet der påvirker opsugningshastigheden.

$$M = \frac{t_{kap}}{h^2} \quad (11)$$

hvor

M er modstandstallet [s/m^2]
 h er højden på prøvelegemet [m]

Som tidligere beskrevet kunne den åbne porøsitet bestemmes ud fra veje-dyppe-veje metoden, der benytter sig af Archimedes lov. Ved opsugningsforsøg kan denne porøsitet ligeledes bestemmes ved (12).

$$\rho_a = \frac{(m_{slut} - m_0)}{h \cdot A \cdot \rho_w} \quad (12)$$

hvor

ρ_a er den åbne porøsitet [-]
 m_{slut} er massen af prøvelegemet til tiden t_{slut} [kg]

4. Eksperimenter

4.1. Porøsitet og densitet

4.1.1. Apparatur og materialer

- 1 halv mursten
- Ekssikkator til opbevaring af prøvelegeme under vakuumsugning
- Vægt med nøjagtighed på 0,1 %
- Kontrollod
- Udstyr til vejning af prøvelegeme under vand
- Destilleret vand
- Termometer med inddeling på 0,1 °C
- Vakuumpumpe
- Klude til aftørring af prøvelegeme
- Varmeskab til forkonditionering af prøvelegeme

4.1.2. Fremgangsmåde

Først foretages en kontrolvejning vha. et kontrollod, og den målte masse noteres. Prøvelegemerne skal i udgangssituationen være udtørret i en ovn ved 105 °C. Pga. tidsnød er dette gjort i forvejen, og den målte masse udleveres af vejlederen og noteres i skema 1, bilag 1. Det udtørrede prøvelegeme evakueres tørt i ekssikkator i mindst 3 timer. Pga. tidsnød befinder prøverne sig allerede i ekssikkator, hvor de har været evakueret i ovennævnte tidsrum.

Hanen på ekssikkatoren lukkes, og pumpen tages af. Herefter sættes en slange på hanen, hvor den anden ende af slangen er neddykket i en spand med destilleret vand. Når hanen åbnes vil undertrykket i ekssikkatoren suge vandet ind i ekssikkatoren. Temperaturen af vandet samt af rumluften måles og noteres. Når vandet når ca. 50 mm op over det øverste prøvelegeme lukkes hanen på ekssikkatoren og vandslangen tages af. Der pumpes ned til vands damptryk.

Prøvelegemerne med vand henstår i 15 min. med undertryk i ekssikkatoren. Hanen på ekssikkatoren åbnes, og der ledes luft ind i ekssikkatoren. Prøverne henstår i vandet ved atmosfæretryk i 15 min. De vakuumvandmættede prøver vejes (m_u) under vandet, og værdien noteres. Hvorledes der vejes under vand vises af vejlederen. Prøvelegemerne aftørres med en hårdt opvredet klud, og vejes (m_{ov}) i luft. Til sidst foretages en kontrolvejning med kontrollod på vægten. Alle omtalte værdier noteres i skema 1, se bilag 1.

4.2. Kapillarsugning i mursten

4.2.1. Apparatur og materialer

- 1 halv mursten
- Ekssikkator med silicagel til opbevaring af prøvelegeme under afkøling.
- Vægt med nøjagtighed på 0,1 %
- Kontrollod
- Fotobakke med afstandsholdere
- Destilleret vand
- Termometer med inddeling på 0,1 °C
- Stopur
- Klude til aftørring af prøvelegeme

4.2.2. Fremgangsmåde

Principielt set skal prøvelegemet være i ligevægt med det klima, hvor det skal bruges. Til sammenligningsgrundlag bør en standardiseret udgangssituation dog benyttes. Den standardiserede udgangssituation opnås i denne øvelse ved at prøvelegemet forkonditioneres i en ovn ved 105 °C i mindst to døgn.

Ekssikkatoren er en lufttæt plast- eller glasbeholder. Silicagelen er et tørremiddel som sørger for, at der ikke er fugt i luften inde i ekssikkatoren. Der benyttes kontrollod til sikring af at vægten vejer korrekt både før og efter forsøget. Prøvelegemet vejes i modtagelsessituationen (m_0), mens dets sugeflade og højdes opmåles.

Fotobakken fyldes med destilleret vand indtil vandet når ca. 5 mm op over afstandsholderne. Herefter anbringes prøvelegemets sugeflade på afstandsholderne, således at vandet går op på siden af materialet. Stopuret startes i det øjeblik der er kontakt med vandet.

Temperaturen i lokalet måles (T_{rum}) og noteres, mens temperaturen af vandet i fotobakken skal være $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, hvilket måles (T_{vand}). Ved forsøg over længere tid bør fotobakken overdækkes for at udgå fordampning. Med passende tidsintervaller regnet fra starttidspunktet tages prøvelegemet op, aftørres med en hårdt opvredet klud og vejes (m_t). Stopuret stoppes når prøvelegemet ikke er i kontakt med vandet i fotobakken. Der foretages målinger efter 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120, evt. 240 minutter fra starttidspunktet. Til sidst kontrolles vægten ved en kontrolvejning og værdien noteres.

Når målearbejdet er færdigt, indtastes måleresultater i et resultatskema der ligger under fildeling på Campusnet. Husk at gemme det indtastede regneark på egen PC og 'uploade' det indtastede regneark på Campusnet.

5. Rapportering

På artikelform (altså ikke en teknisk rapport!) sammenfattes fremgangsmåde, forsøgsresultater, diskussion og konklusion i et omfang af max. 4 sider. Dersom sideantallet overskrides, trækker det ned i bedømmelsen!

Da modtageren regnes bekendt med teorien, opstilles kun de vigtigste formler anvendt i beregningen af forsøgsresultater, og der refereres til øvelsesvejledningen. Fremgangsmåden ved forsøgene beskrives særdeles kortfattet (se det udleverede eksempel på artikel), og de vigtigste forsøgsresultater trækkes frem!

Hvad skal artiklen indeholde af resultater?

Porøsitet og densitet

- Søjlediagram over porøsiteter for samtlige grupper materialeprøver. Angiv materialet ud for hver enkelt søjle.
- Søjlediagram indeholdende tørdensitet og densitet i s.s.d.-tilstand for samtlige grupper materialeprøver. Inddel diagrammet således at de to densiteter for hver materialeprøve sammenstilles.

Kapillarsugning

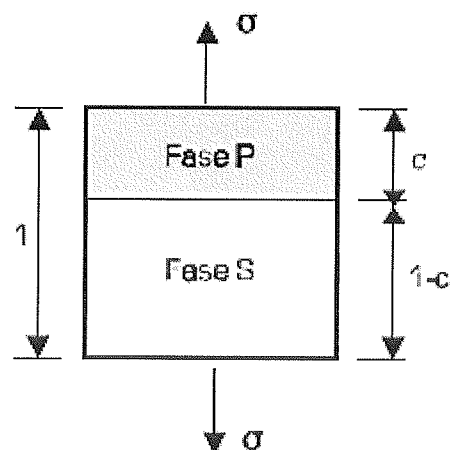
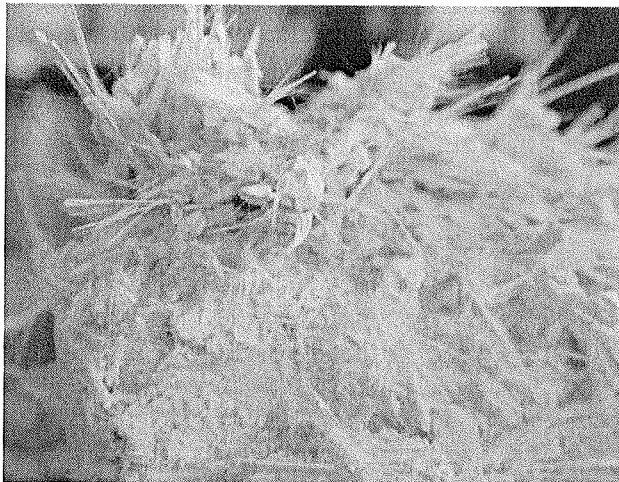
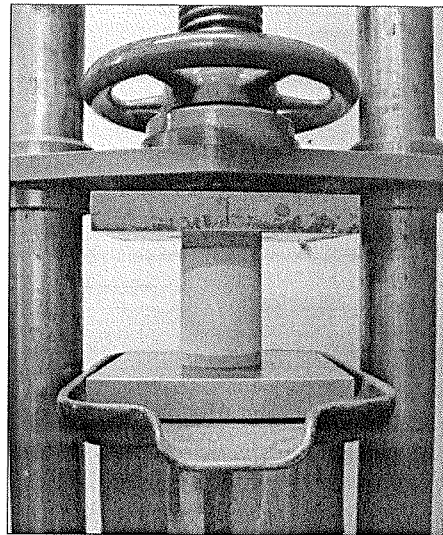
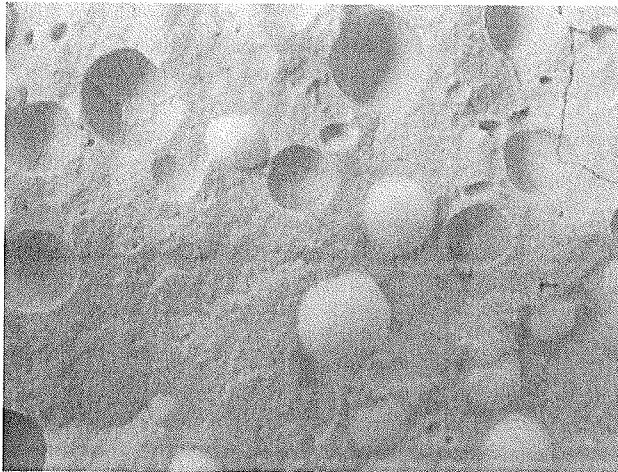
- Tabel over Q_{kap} og t_{kap} for alle grupper resultater. Anfør endvidere porøsiteten for hver enkelt prøvelegeme.
- Tabel over kapillaritetstal og modstandstal for alle grupper resultater.
- Er der sammenhæng mellem målte porøsiteter og tilhørende kapillaritetstal?

Alle disse resultater diskuteres i videst muligt omfang inden for det anførte maksimale sideantal.

6. Litteratur

- [1] Gottfredsen, F.R.; Nielsen, A.: Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber. Polyteknisk Forlag, 1997.

GIPSKOMPOSITTER



11561 Bygningsmaterialer – anvendelse og forsøg
11704 Laboratorieøvelser i materialelære

Indholdsfortegnelse

1. FORMÅL	3
2. OMFANG	3
3. BAGGRUND	4
3.1. GENERELT OM GIPS	4
3.2. ARBEJDSLINJER	4
3.3. TRYKSTYRKE- OG ULTRALYDMÅLING	4
3.4. KOMPOSITMATERIALERS STIVHED	6
3.5. LAMELMODELLEN	6
3.6. KOMPOSITKUGLEMODELLEN	7
3.7. FORMLER FOR GIPSKOMPOSITTER	8
3.8. VÆRDIER FOR STYRKER OG STIVHEDER	8
4. EKSPERIMENTER	9
4.1. STØBNING	9
4.2. GEOMETRI	9
4.3. ULTRALYDMÅLING	10
4.4. TRYKPRØVNING	10
4.5. SPALTETRÆKPRØVNING	10
5. RAPPORTERING	12
6. LITTERATUR	12
BILAG 1 – ULTRALYDMÅLEAPPARAT "PUNDIT"	13
BILAG 2 – SKEMA 1: FORSØGSGENNEMGANG OG RESULTATER	14
BILAG 3 – SKEMA 2: TILSLAGSMATERIALER	15
BILAG 4 – SKEMA 3: Udstøbninger	17
BILAG 5 – SKEMA 4: AFPRØVNINGER UD OVER LYDMÅLING	18

Forside:

<i>Øverst tv.:</i>	<i>Gips iblandet kugler af polystyren.</i>
<i>Øverst th.:</i>	<i>Trykprøvning af gipscylinder.</i>
<i>Nederst tv.:</i>	<i>Gips iblandet glasfibre.</i>
<i>Nederst th.:</i>	<i>Teoretisk lamelmodel for et materiales stivhed.</i>

1. Formål

Det er øvelsens formål at undersøge partikellarmerede materials opførsel. Som matrixmateriale anvendes gips. Partiklerne (tilslaget) er glasperler, skumkugler, glasfibre og stålfibre.

Hovedformålet med øvelsen er ikke at demonstrere ”imponerende” resultater; men at finde tendenser, studere brudflader, at erfare hvor svært det er med håndkraft at iblande fibre; at se de negative konsekvenser af en inhomogen indblanding. Og som et meget væsentligt punkt: under spalteprøvningen at se, hvordan et næsten glasskørt materiale som gips kan ændres til et ”sikkert”, sejt bygningsmateriale (med varslet brud) ved hjælp af en meget lille tilsætning af fibre.

2. Omfang

Arbejdet er fordelt således at der støbes og prøves fire cylindre før en forelæsning om kompositmaterialers stivhed, styrke og sejhed. Fremgangsmåden ses beskrevet i ’4. eksperimenter’.

Indledning: Øvelsen indledes med en fælles orientering om det apparatur der skal anvendes.

Gruppearbejde: Herefter arbejder grupperne med hver deres blandinger – fire cylindre støbes – 1 per kvarter.

Forelæsning: Kort gennemgang af teorier om kompositmaterialers stivhed, styrke og sejhed.

Afslutning: Øvelsen sluttes med resultatbearbejdning og efterfølgende

**indtaster alle grupper måleresultater på Campusnet til brug ved rapporteringen.
Manglende resultater fra en gruppe medfører nedsat karakter i den endelige bedømmelse!**

3. Baggrund

3.1 Generelt om gips

Anvendelsen af gips som bygningsmateriale har mange fordele. Det er let og har særdeles gode egenskaber mht. fugt og varme. Varmeledningsevnen er stort set den samme som for tegl men varmekapaciteten og brandmodstanden er væsentligt større end for en række andre bygningsmaterialer. Dette skyldes den kemiske struktur af gips med krystallinsk bundet vand som frigøres ved ekstremer varmepåvirkning. Denne proces er meget energikrævende og medfører en øget brandbestandighed. Yderligere beskrivelser af den kemiske struktur og opførsel kan ses i [1] og [2].

3.2 Arbejdslinjer

Et materiales deformations- og styrkeforhold kan beskrives med en arbejdslinje.

En *arbejdslinje* er en kurve som viser sammenhængen mellem kraft- eller momentpåvirkning og den tilsvarende deformation. Navnet "arbejdslinje" henviser til at arealet mellem kurven og deformationsaksen repræsenterer det indre arbejde der er udført ved deformationen. Den oftest anvendte afbildning er normalspændingen σ som funktion af tøjningen ϵ , jævnfør fig. 1. Her repræsenterer arealet under kurven det indre deformationsarbejde pr. volumenenhed. (Dimensionsbetragtning: $(\text{N/m}^2) \cdot \text{m/m} = \text{J/m}^3$).

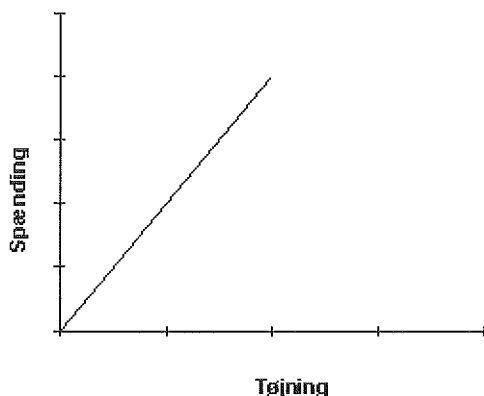


Fig. 1. Arbejdslinje for gips.

Spænding, σ , er kraft pr. arealenhed. Tøjning, ϵ , også kaldet relativ længdeforøgelse, er længdeændring pr. længdeenhed.

Arbejdslinjer karakteriseres efter den spændingsform som anvendes ved forsøg som enten træk-, tryk-, forskydnings-, bøjnings- eller

vidringsarbejdslinjer. Fig. 1 viser en typisk arbejdslinje for gips.

Trykarbejdslinjen beskrives med *elasticitetsmodul* E_0 , *trykstyrken* f_c og *brudtøjningen* ϵ_u . E_0 , der også benævnes *Young's modul*, er principielt tangenthældningen i origo men af praktiske grunde måles ofte en nærmere defineret sekanthældning. Arbejdslinjen i fig. 1 gælder for jævnt voksende belastning.

Påføres belastningen meget hurtigt, dynamisk, som det f.eks. er tilfældet ved eksplosionsbelastning eller ved ultralydmåling, vil arbejdslinjen blive en ret linie. Denne linies hældning kaldes det dynamiske elasticitetsmodul.

3.3 Trykstyrke- og ultralydmåling

Gips trykstyrke, f_c er defineret som den numerisk største værdi af normalspændingen i et prøvelegeme påvirket med enakset tryk indtil knusning. Styrken måles som den nominelle tryknormalspænding i det anvendte prøvelegeme i brudøjeblikket. Prøvelegemets tværsnitsareal A , vinkelret på belastningsretningen, måles inden belastningen, brudlasten N_u måles, og brudspændingen, *trykstyrken*, beregnes som

$$f_c = \frac{N_u}{A} \quad (1)$$

Spaltetrækstyrken, f_s bestemmes ved trykprøvning af en cylinder på følgende måde: Cylindrens længde h og diameter d måles inden prøvningen. Cylinderen placeres vandret i prøvemaskinen og belastes langs de to frembringere, som rører maskinens trykflader, indtil brud opstår ved lasten N_u . Spaltetrækstyrken er da defineret som

$$f_s = \frac{2 \cdot N_u}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (2)$$

Baggrunden for denne metode er at der opstår trækspændinger i det lodrette midtersnit vinkelret på trykretningen, se fig. 2. Det er normalt kun for materialer med en trykstyrke der er fem gange større end trækstyrken at metoden anvendes.

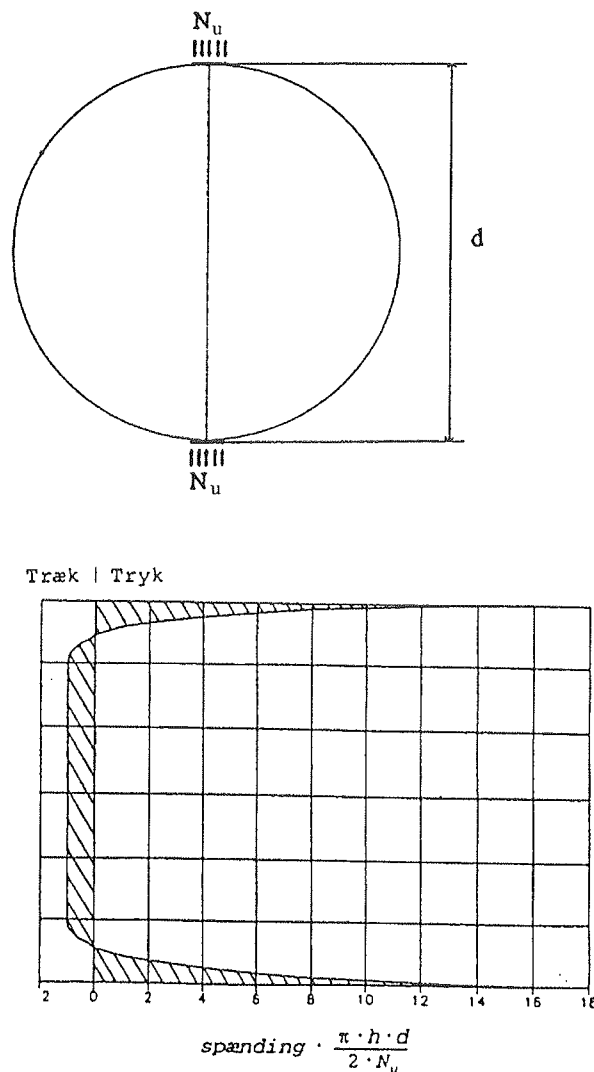


Fig. 2. Spændingsfordeling ved spaltetrækprøvning.

Ultralydmåling er baseret på at der sendes kortvarige, højfrekvente lydimpulser gennem gipsen fra en sender til en modtager. Et elektronisk apparatur måler hvor lang tid, t , lyden er om at passere fra sender til modtager. Kaldes afstanden mellem sender og modtager for ℓ , bliver lydhastigheden

$$v = \ell / t \quad (3)$$

Der eksisterer følgende sammenhæng mellem lydhastigheden v , bølgelængden λ og frekvensen f

$$v = \lambda \cdot f \quad (4)$$

Bølgelængden λ bestemmer den omtrentlige størrelsesorden af de uregelmæssigheder som kan afsløres med metoden.

En meget vigtig detalje ved ultralydmålingen er at skabe kontakt mellem lydhoveder og

gipsoverflade. De lydhoveder som almindeligvis anvendes har en diameter på 40-50 mm på den flade som vender mod gipsen. For at få lyden energien overført, er det nødvendigt at smøre et kontaktstof på lydhovederne inden de presses mod gipsen. Som kontaktstof kan anvendes ultralydsgel der er vand iblandet fortykningsmiddel.

Med ultralydmåling kan man udnytte følgende sammenhæng for gips mellem lydhastighed v , gennemgangstid t , tykkelse ℓ , dynamisk elasticitetsmodul E_{dyn} og densitet ρ :

$$v = \frac{\ell}{t} = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{0.9 \cdot \rho}} \Rightarrow E_{dyn} = 0.9 \cdot v^2 \cdot \rho \quad (5)$$

I bilag 1 findes en brugsanvisning for "Pundit" ultralydmåleapparat.

Ultralydprøvning kan give en vis opfattelse om gipsens styrkeniveau. Resultatet er dog noget afhængigt af fugtindholdet, mindst ved de høje styrkeniveauer.

3.4. Kompositmaterialers stivhed

For to-fase kompositmaterialer kan stivheden, *elasticitetsmodulet*, bestemmes ved kendskab til stivheden af de indgående faser og til geometrien i faserne. Da geometrierne som oftest er særdeles komplicerede, er det kun muligt at bestemme grænser for et kompositmateriales stivhed. Dette kan gøres ved at betragte simplificerede geometrier.

3.5. Lamelmodellen

Lamelmodellen er den simpleste model hvor de to faser indgår som vist på figur 3.

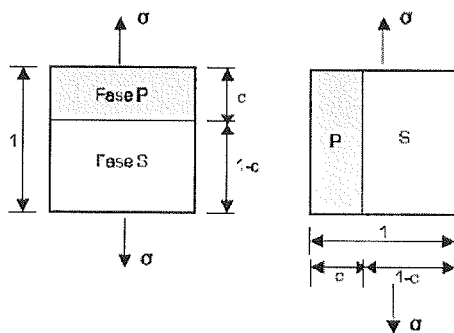


Fig. 3. Lamelmodel af to-fase kompositmateriale. Vandret og lodret lagkage-geometri. *c* angiver koncentrationen af fase P. De to indgående faser kan beskrives ved følgende to parametre.

Fase P:

$$\text{Koncentration } c = \frac{V_P}{V_P + V_S}$$

Young's modul E_P

Fase S:

$$\text{Koncentration } (1-c) = \frac{V_S}{V_P + V_S}$$

Young's modul E_S

Her angiver V_P og V_S voluminet af hhv. fase P og fase S, mens *c* angiver koncentrationen af fase P. Den samlede stivhed af materialet kan findes ved at se på de to følgende betragtninger.

3.5.1. Vandret lagkage-geometri

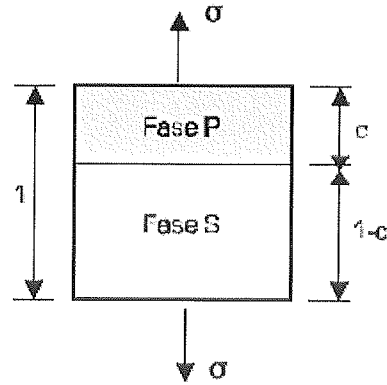


Fig. 4. Vandret lagkage-geometri.

Ligevægtsbetingelse

$$\sigma = \sigma_P = \sigma_S$$

Geometrisk betingelse

$$\varepsilon = c\varepsilon_P + (1-c)\varepsilon_S$$

Fysiske betingelser

$$\sigma_S = E_S \varepsilon_S$$

$$\sigma_P = E_P \varepsilon_P$$

$$\sigma = E \varepsilon$$

Komposit-stivhed

$$\frac{1}{E} = \frac{c}{E_P} + \frac{1-c}{E_S} \quad (6)$$

3.5.2. Lodret lagkage-geometri

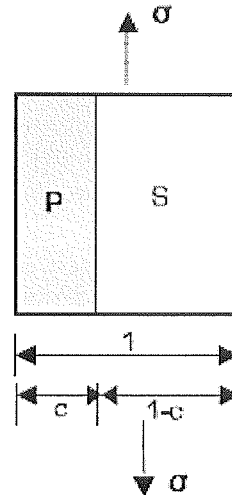


Fig. 5. Lodret lagkage-geometri.

Geometrisk betingelse

$$\varepsilon = \varepsilon_P = \varepsilon_S$$

Ligevægtsbetingelse

$$\sigma = c\sigma_P + (1-c)\sigma_S$$

Fysiske betingelser

$$\sigma_S = E_S \varepsilon_S$$

$$\sigma_P = E_P \varepsilon_P$$

$$\sigma = E \varepsilon$$

Komposit-stivhed

$$E = cE_P + (1-c)E_S \quad (7)$$

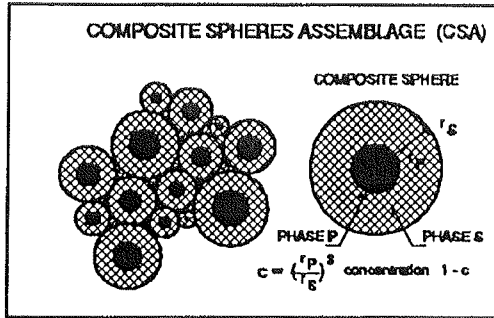


Fig. 6. Kuglemodel med fase P partikel, CSA_P .
kel, CSA_S .

3.6. Kompositkuglemodellen

Kompositkuglemodellen er en lidt mere kompliceret model der ses angivet i [3]. Den beskriver kompositmaterialet på to måder.

Hvis det antages at fase P har et større elasticitetsmodul end fase S, så kan kompositmaterialet f.eks. beskrives ved små hårde kugler af fase P omgivet af en ring af det relativt blødere fase S, se figur 6. Denne model benævnes CSA_P (Composite Spheres Assemblage). CSA_P har en mindre stivhed end hvis kompositmaterialet blev modelleret som kugleskaller af det relativt hårde fase P med det bløde fase S inde. Denne model, kaldet CSA_S , ses på figur 7, og den har en større stivhed end CSA_P .

Stivhederne for hhv. CSA_P og CSA_S er grænseværdier for et *isotropt* to-fase kompositmateriale. Isotropi angiver at et materiale har ret-

Et materiale opbygget på denne måde kaldes *anisotropt* da materialeegenskaberne er forskellige i forskellige retninger; f.eks. er elasticitetsmodulet forskelligt ved belastning på tværs eller på langs af lamellerne.

Materialet til venstre på figur 3 vil have en mindre stivhed end det til højre, og teorien giver at materialet til venstre har den lavest mulige stivhed for et to-fase kompositmateriale, mens materialet til højre har den højest mulige for et sådant materiale. Derfor vil de to fundne stivheder være hhv. nedre- og øvregrænser for et to-fase kompositmateriale.

Grænserne for dette materiale kan opskrives som vist herunder.

$$\left(\frac{1-c}{E_S} + \frac{c}{E_P} \right)^{-1} \leq E \leq (1-c)E_S + cE_P \quad (8)$$

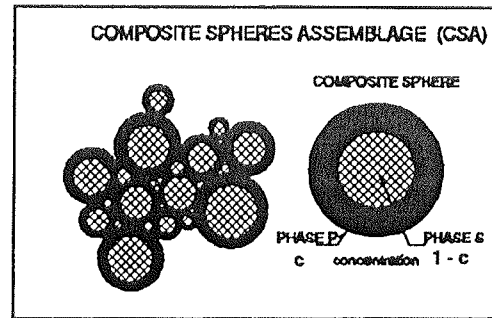


Fig. 7. Kuglemodel med fase S parti-

ningsuafhængige egenskaber, dvs. samme opførsel i alle retninger. De isotrope stivhedsgrænserne for et to-fase kompositmateriale er udledt ud fra relativt kompliceret matematik, og derfor angives kun det endelige udtryk (9):

$$E_P \frac{2E_S + c(E_P - E_S)}{2E_P - c(E_P - E_S)} \leq E \leq E_S \frac{E_P + E_S + c(E_P - E_S)}{E_P + E_S - c(E_P - E_S)}$$

for $E_P \geq E_S$. Ulighedstegnene skal vendes hvis $E_P < E_S$.

På nedenstående figur 8 er indtegnet de anisotrope og isotrope grænser for et to-fase kompositmateriale bestående af en fase P og en fase S, og hvor c angiver partikkelkoncentrationen af fase P.

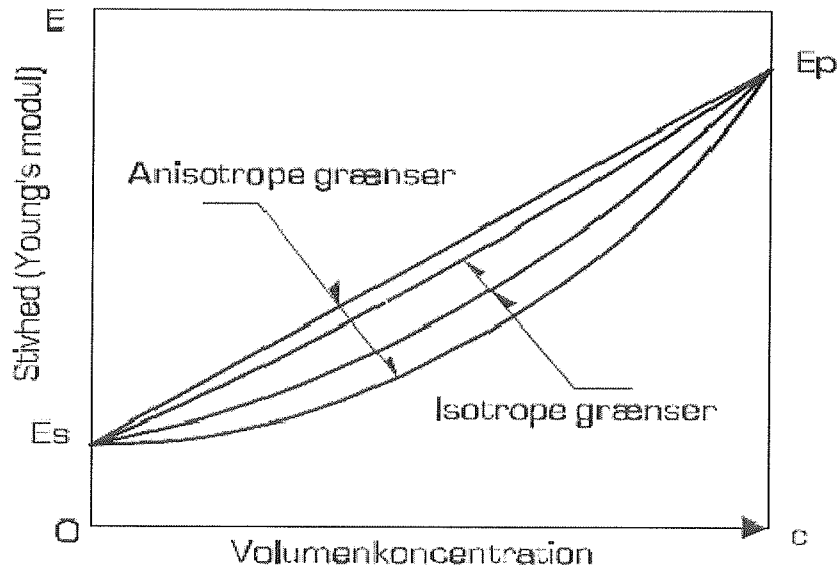


Fig. 8. Grænser for et to-fase kompositmateriale.

3.7. Formler for gipskompositter

Ud fra den ovenstående teori kan opstilles tilnærmelser for gips iblandet forskellige tilslagsmaterialer. Partikelkoncentrationen c bliver dermed udtrykt ved:

$$c = \frac{V_{\text{partikler}}}{V_{\text{total}}} \quad (10)$$

mens stivhedsforholdet n angiver forholdet mellem elasticitetsmodulerne for hhv. tilslagsmateriale og gips.

$$n = \frac{E_{\text{partikel}}}{E_{\text{gips}}} \quad (11)$$

3.7.1. Kuglekompositter

Kompositter med kugleformet tilslag i gips har stivheder og styrker der kan tilnærmes ved følgende udtryk:

$$\frac{E_{\text{komposit}}}{E_{\text{gips}}} \approx \frac{1 - c + n(1 + c)}{1 + c + n(1 - c)} \quad (12)$$

$$\frac{f_{c,\text{komposit}}}{f_{c,\text{gips}}} \approx \begin{cases} 1 - 1.5c & \text{for } n \leq 1 \\ 1 & \text{for } n > 1 \end{cases} \quad (13)$$

3.7.2. Fiberkompositter

Kompositter med fibre som tilslag i gips hvor mængden af fibre er relativt lille, har egenska-

ber som kan tilnærmes ved følgende udtryk (14):

$$\frac{E_{\text{komposit}}}{E_{\text{gips}}} \approx \frac{f_{s,\text{komposit}}}{f_{s,\text{gips}}} \approx 1 + c(n - 1)$$

3.8. Værdier for styrker og stivheder

Nedenstående tabeller angiver styrke og stivheder for gips samt en række tilslagsmaterialer.

Tabel 1. Stivheder for gips og tilslagsmaterialer.

Materiale	Gi ps	Gl as	Stål	Polysty- renskum
Elasticitets- modul [GPa]	10	80	210	0

Tabel 2. Trykstyrker for gips og glastilslag.

Materiale	Gips	Glas
Trykstyrke [MPa]	10	400

Tabel 3. Spaltestyrker for gips og tilslagsmaterialer.

Materiale	Gips	Glasfibre	Stålfibre
Spaltestyrke [MPa]	1	1500	1500

4. Eksperimenter

4.1. Støbning

4.1.1. Apparatur og materialer

- Digitalvægt med automatisk tarering. Max. 4 kg
- 4 stopure
- 4 støbeforme med vandfast krydsfinér-bund
- 4 glasplader
- Dobbeltklæbende tape
- Litermål
- Plastfad, skovl og dejomrører
- 2 plastkrus
- 800 g gips
- Tilslagsmateriale: glasperler, skumkugler, stålfibre eller glasfibre

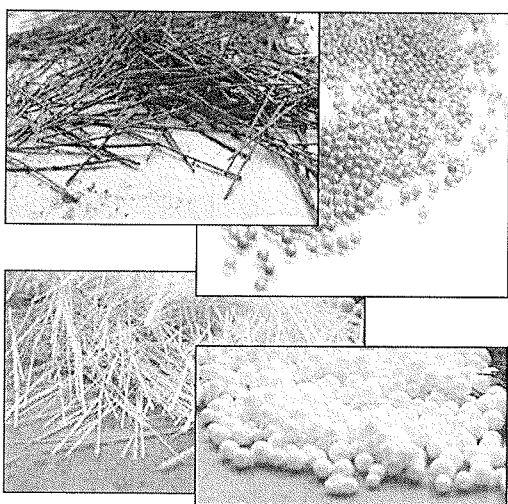


Fig. 9. De forskellige tilslagsmaterialer. Stålfibre (ø.tv.), glasperler (ø.th.), glasfibre (n.tv.) og skumkugler (n.th.).

4.1.2. Fremgangsmåde

De foreskrevne materialer afvejes med undtagelse af gipsen der udleveres i afvejet tilstand. Der skal benyttes 350 g vand, og dette skal udmåles præcist vha. vægten.

Tilslagsmaterialet afvejes i henhold til Bilag 3. Før udstøbningen skal støbeformene gøres klar ved anbringelse af krydsfinérbunden og lukning af revnen vha. tapen – det er vigtigt at bunden sidder korrekt.

Først blandes materialet til referenceprøven. Dette gøres ved forsigtigt at hælde den tørre

gips ned i plastfadet og derefter hælde vandet i. Lad blanding stå urørt (tæl til 15) og omrør derpå med dej-omrøreren til der haves en lind grød uden klumper.

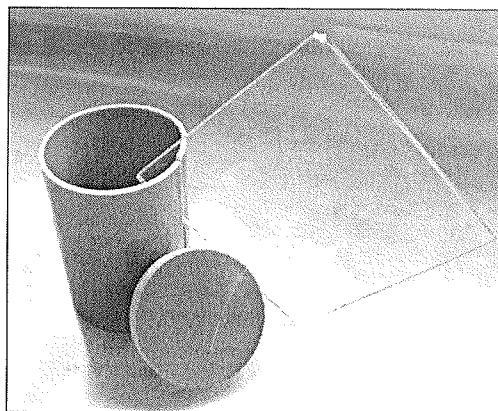


Fig. 10. Støbeform med bund og glasplade.

Udstøb 1/3 af formen og vibrer formen ved små slag mod hårdt underlag (bordpladen) – 25 slag i alt. Dernæst udstøbes den næste 1/3 af formen efter samme procedure før resten af formen udstøbes med lidt top. Efter sidste vibrering skubbes og drejes toppen væk med glaspladen således pladen ligger i plan med forskallingens ende. Der må ikke efterlades luftblærer i overfladen. Stopuret startes og prøven skal henstå i 1 time før afforskalling og prøvning. Der skal i alt laves to referenceprøver.

Kompositprøverne udføres ved iblanding af tilslagsmaterialet. For glas- og stålfibre gælder, at de skal blandes med gipsen før vandet hældes over, mens glasperlerne og skumkuglerne lettest iblandes efter vandet er tilsat.

Det er vigtigt at den færdige blanding er nogenlunde homogen, og at der ikke anvendes for megen tid til blandingsprocessen. Hvis gipsen er på vej til at hærde når den hældes i formen, må den kasseres og støbningen startes forfra.

4.2. Geometri

4.2.1. Apparatur

- Skydelære og tommestok

4.2.2. Fremgangsmåde

Prøveemnets højde og diameter opmåles. Der måles to højder og to diametre, og gennemsnittet anvendes i de videre beregninger.

4.3. Ultralydmåling

4.3.1. Apparatur

- Ultralydmåleapparat, fabrikat "Pundit", med to lydhoveder og kalibreringsklods. Betjeningen fremgår af Bilag 1.
- Ultralydsgel

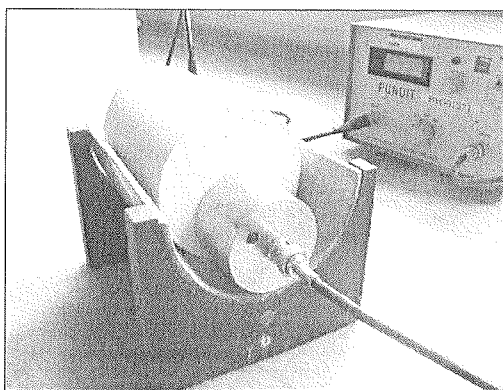


Fig. 9. Lydhoved fra ultralydmåleapparat på cylinderendeflade.

4.3.2. Fremgangsmåde

Inden målingen kontrolleres det om cylindrens endeflader er helt plane. Ujævnheder hugges af.

En måling foretages ved at der smøres ultralydsgel (kontaktstof) på lydhovederne som derefter presses mod det legeme hvorpå der skal måles.

Hver måleserie starter med en kalibrering på kalibreringsklodsen hvorefter gennemgangstiden i længderetningen måles. Mindste gennemgangstid noteres. Prøv at lade to personer måle på samme prisme – til illustration af person-afhængigheden (skema 1, Bilag 2).

4.4. Trykprøvning

4.4.1. Apparatur

- Prøvemaskine fabrikat Amsler 60 tons
- 2 runde bløde masonitplader for hvert prøvelegeme
- Referenceprøve
- Kompositprøver med glasperler eller skumkugler
- Plastposer

4.4.2. Fremgangsmåde

Der måles på en referenceprøve og kompositprøver med runde tilslagsmaterialer. Først monteres prøvelegemet i maskinen ved at centrere det på trykhovedet. De to masonitplader er inden montering placeret i hver ende af prøvelegemet for at sikre en ensartet spændingsfordeling under trykprøvningen.

Oplastningen sker ved at sætte gearstangen i fremskudt position og dreje nænsomt mod uret på finindstillingen til venstre på maskinen. Lasthastigheden skal være ca. 0,1 ton pr. sekund, og når bruddet er indtruffet sættes gearstangen straks i lodretstående position. Maksimallasten noteres i skema 1, Bilag 2, og forsøget sluttes ved at føre gearstangen helt tilbage mod væggen og derved sænke trykhovedet til begyndelsespositionen. Plastposerne anvendes til opbevaring af interessante brudstykker.

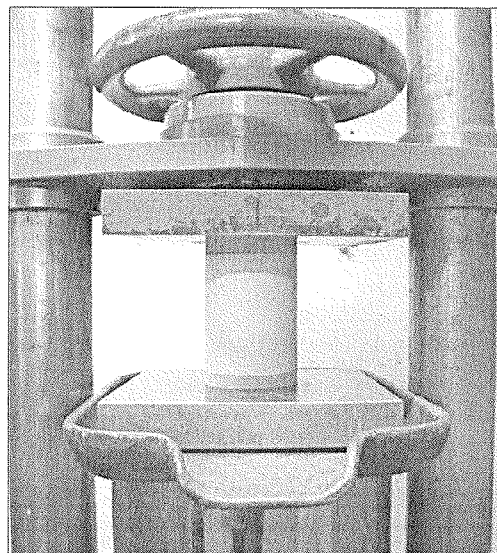


Fig. 10. Prøvelegeme anbragt i trykprøvemaskine.

4.5. Spaltetrækprøvning

4.5.1. Apparatur

- Prøvemaskine fabrikat Amsler 60 tons
- Referenceprøvelegeme
- Kompositprøver med glasfibre eller stål-fibre
- Frembringerklods med blyant
- U-profil til fastholdelse ved tegning af frembringere
- 2 trekantlister til fiksering af prøvelegeme under montage
- 2 trykfordelingslister af hård masonitplade

4.5.2. Fremgangsmåde

Frembringerklodsen afvendes til at tegne en streg på hver side af cylinderen. Lige ovenover disse streger fikseres de hårde masonitplader med en nøjagtighed på ± 1 mm.

Cylinderen anbringes derefter centralt mellem trykprøvemaskinens to trykplader. Oplastningen sker ved at sætte gearstangen i fremskudt position og dreje nænsomt mod uret på finindstillingen til venstre på maskinen. Lasthastigheden skal være ca. 0,1 ton pr. sekund, og når bruddet er indtruffet sættes gearstangen straks i lodretstående position. Maksimallasten noteres i skema 1, Bilag 2, og forsøget slutes ved at føre gearstangen helt tilbage mod væggen og derved sænke trykhovedet til begyndelsespositionen. Plastposerne anvendes til opbevaring af interessante brudstykker.

Når målearbejdet er færdigt, indtastes måleresultater i et resultatskema der ligger under fildeling på Campusnet. Husk at gemme det indtastede regneark på egen PC og 'uploade' det indtastede regneark på Campusnet.

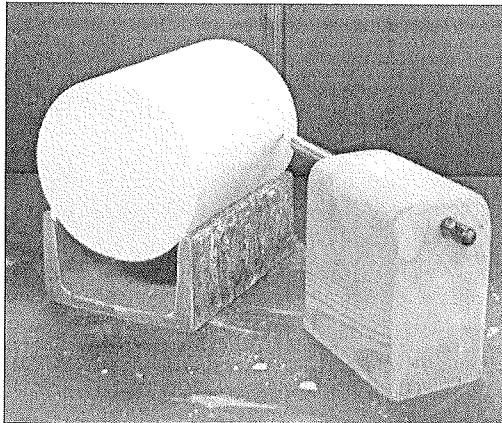


Fig. 11. Optegning på prøvelegeme.

5. Rapportering

På artikelform (altså ikke en teknisk rapport!) sammenfattes fremgangsmåde, forsøgsresultater, diskussion og konklusion i et omfang af **max. 8 sider**. Dersom sideantallet overskrides, trækker det ned i bedømmelsen!

Da modtageren regnes bekendt med teorien, opstilles kun de vigtigste formler anvendt i beregningen af forsøgsresultater, og der refereres til øvelsesvejledningen. Fremgangsmåden ved forsøgene beskrives særdeles kortfattet (se udleverede eksempler på artikler), og de vigtigste forsøgsresultater trækkes op - alle resultater skal angives ved en middelværdi og en spredning!

Hvad skal artiklen indeholde af resultater?

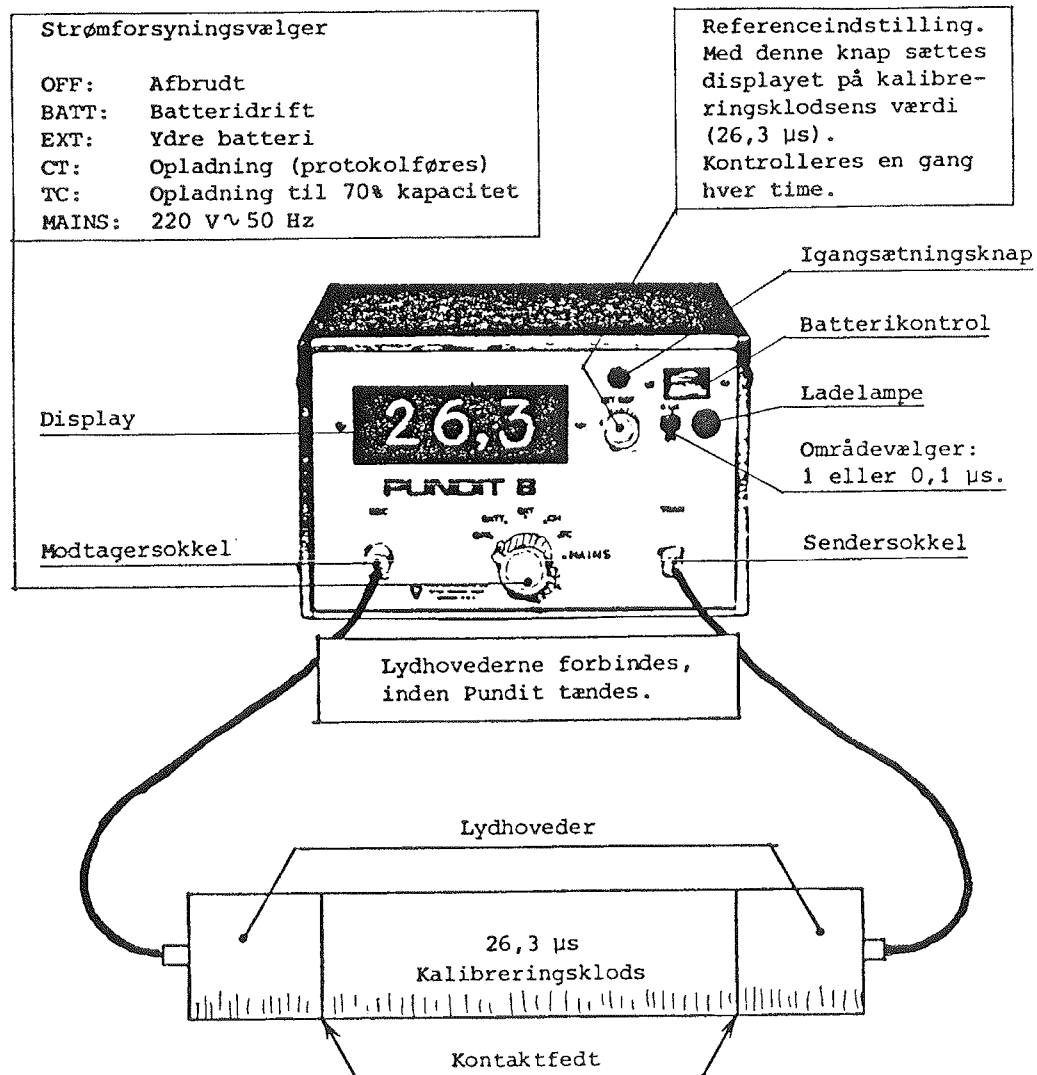
- Tabel over densiteter, trykstyrke- og spaltetrækresultater.
- Observationer angående evt. problemer under iblanding af de forskellige tilslagsmaterialer.
- Søjlediagram over de målte dynamiske Young's moduli for alle grupper, idet den højeste koncentration anvendes for kugle- eller fibertilslag. Som reference anvendes værdien målt for den rene gips.
- Diagram over anisotrope grænsekurver for Young's modul for et af de fire tilslagsmaterialer samt indtegnede målte og teoretiske værdier for stivheden, benyt formel (8). For ren gips anvendes det målte Young's modul, mens tilslagsmaterialets stivhed kan aflæses i tabel 1.
- Søjlediagram for trykstyrken af kompositterne med de to kugletilslag for begge koncentrationer af disse. Både målte og teoretiske værdier indtegnes, benyt formel (13). Som reference indtegnes endvidere trykstyrken for den rene gips.
- Søjlediagram for spaltetrækstyrken af kompositterne med de to fibertilslag for begge koncentrationer af disse. Både målte og teoretiske værdier indtegnes, benyt formel (14). Som reference indtegnes endvidere spaltetrækstyrken for den rene gips.
- Vurdering af brudformer for den rene gips og de forskellige tilslagsmaterialer.

Ved bedømmelsen vil der blive lagt vægt på artiklens diskussion af de fundne resultater herunder sammenligninger med de øvrige gruppers resultater. Alle resultater diskuteres i videst muligt omfang inden for det anførte maksimale sideantal.

6. Litteratur

- [1] Gottfredsen, F.R.; Nielsen, A.: Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber. Polyteknisk Forlag, 1997.
- [2] Nielsen, A.: Silikatbygningsmaterialer. LBM, DTH, TR 275/93, 1993.
- [3] Nielsen, L.F.: Materiale-Mekanik. En introduktion til analyser af materials mekanisk/fysiske adfærd. BYG.DTU R-059, 2003.
- [4] Nielsen, L.F.: MATERIALEMEKANIK. Teknisk Rapport 286, 1993.
- [5] Nielsen, L.F.: LABORATORIEØVELSE – gips-kompositter.

Bilag 1 – Ultralydmåleapparat "Pundit"



Opstilling til kalibrering som vist ovenfor: Displayet indstilles til 26,3 μ s

Måling. Lydhovederne anbringes på det legeme, der skal måles på. Gennemgangstiden noteres, t. Afstanden mellem lydhovederne måles, l. Lydhastigheden er da $v = l/t$ (m/s)

Yderligere information findes i den engelske brugsanvisning.

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. HNO_3 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 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 stinksab. 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 Restproduktbepæring

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.

Bilag 07 – Mørtelstøbninger

I dette bilag fremvises hvilke typer mørtelprøver der er støbt gennem projektet. Det reelt afvejede indhold af henholdsvis cement, aske, vand, sand og eventuelt ekstra vand der er brugt for hver prøve er opgivet, sammen med den aktuelle temperatur i lokalet for tidspunktet for hver støbning.. Ligeledes er antallet af Hertz (Hz) brugt ved vibration af mørtelprøver angivet, samt tiden for vibration i sekunder.

Til sidst i nedenstående skemaer er v/c-forholdet beregnet. For mørtelprøver tilsat aske, er asken medtaget som en del af cementen i beregningen og for mørtelprøver hvor ekstra vand er tilsat er denne mængde vand også medregnet i vand/cement-forholdet.

Øverst i hvert skema er der i kursiv skrevet de forskrevne krav til temperatur, maksimal afvigelse fra blanderecept og vibrationsniveau som er angivet i DS/EN 196-1.

Type A - Referenceprøver med blanderecept: 225 gram vand, 450 g cement og 1350 gram sand.

Type	Dato	Lufttemp. [°C]	Cement [g]	Aske [g]	Vand [g]	Sand [g]	Ekstra vand [g]	Zero time	Vibration 1 [Hz]	Vibration 1 [s]	Vibration 2 [Hz]	Vibration 2 [s]	v/c-forhold
A (DS/EN 196-1)		<i>20 ± 2</i>	<i>450±2</i>		<i>225± 1</i>	<i>1350± 5</i>			<i>60 bump</i>		<i>60 bump</i>		
A 7d	06.09.12	25	450,25	0,00	225,07	1350,15	0,00	09.56	43	34	46	33	0,50
A 14d	17.09.12	24	450,14	0,00	225,00	1350,23	0,00	09.39	45	90	45	90	0,50
A 28d	27.09.12	24	449,99	0,00	225,00	1350,10	0,00	09.24	46	75	45	75	0,50
A 42 d	17.09.12	24	450,30	0,00	225,05	1349,91	0,00	09.32	45	90	45	90	0,50

Type B med blanderecept: 225 gram, 405 gram cement, 45 gram aske og 1350 gram sand.

Type	Dato	Lufttemp. [°C]	Cement [g]	Aske [g]	Vand [g]	Sand [g]	Ekstra vand [g]	Zero time	Vibration 1 [Hz]	Vibration 1 [s]	Vibration 2 [Hz]	Vibration 2 [s]	v/c-forhold
B (DS/EN 196-1)		<i>20 ± 2</i>	<i>405±2</i>	<i>45±2</i>	<i>225± 1</i>	<i>1350± 5</i>			<i>60 bump</i>		<i>60 bump</i>		
B 7d	06.09.12	25	405,40	45,10	225,10	1350,00	0,00	10.24	45	36	46	35	0,50
B 14d	17.09.12	24	405,17	44,90	225,01	1350,31	0,00	11.00	45	87	45	90	0,50
B 28d	04.10.12	24	404,96	45,06	225,06	1350,09	0,00	08.57	44	60	45	60	0,50
B 42d	17.09.12	24	405,34	44,95	225,05	1350,02	0,00	10.19	46	88	46	90	0,50
B 7d vasket	22.10.12	23	404,99	44,98	225,01	1350,09	0,00	10.34	56	50	56	50	0,50
B 7d tørret	22.10.12	23	405,01	43,68	224,56	1349,81	0,00	11.19	53	50	52	50	0,50
B 14d tørret	22.11.12	22	405,03	45,02	224,99	1350,04	0,00	11.53	70	60	69	60	0,50
B 14 d vasket	22.11.12	23	404,99	45,09	225,05	1350,05	0,00	12.19	68	60	67	60	0,50
B 28 d vasket	22.11.12	23	405,07	45,10	225,04	1350,00	0,00	12.46	65	60	67	60	0,50

Type C med blanderecept: 225 gram vand, 360 gram cement, 90 gram aske, 1350 gram sand.

Type	Dato	Lufttemp. [°C]	Cement [g]	Aske [g]	Vand [g]	Sand [g]	Ekstra vand [g]	Zero time	Vibration 1 [Hz]	Vibration 1 [s]	Vibration 2 [Hz]	Vibration 2 [s]	v/c-forhol
C (DS/EN 196-1)		20 ± 2	360 ± 2	90 ± 2	225 ± 1	1350 ± 5			60 bump		60 bump		
C 7d	06.09.12	25	360,00	90,00	224,95	1350,13	76,20	10.59	44	35	47	35	0,67
C 7d ny	27.09.12	24	359,97	90,43	225,07	1350,16	26,61	09.50	45	60	45	60	0,56
C 14d	11.10.12	22	360,05	90,04	225,02	1350,03	13,02	08.30	57	60	57	60	0,53
C 28d	04.10.12	24	360,01	90,35	225,02	1350,38	10,00	09.35	45	60	45	60	0,52
C 42d	04.10.12	24	360,24	89,98	225,11	1350,21	10,00	11.35	80	60	80	60	0,52
C 7d vasket	22.10.12	23	360,10	89,98	225,00	1350,07	10,00	10.59	54	50	53	50	0,52

Type D med blanderecept: 225 gram, 450 gram cement, 135 gram aske, 1215 gram sand.

Type	Dato	Lufttemp. [°C]	Cement [g]	Aske [g]	Vand [g]	Sand [g]	Ekstra vand [g]	Zero time	Vibration 1 [Hz]	Vibration 1 [s]	Vibration 2 [Hz]	Vibration 2 [s]	v/c-forhol
D (DS/EN 196-1)		20 ± 2	450 ± 2	135 ± 2	225 ± 1	1215 ± 5			60 bump		60 bump		
D 7d	06.09.12	25	450,40	134,99	225,00	1215	104,45	11.29	47	35	45	36	0,56
D 7d ny	27.09.12	24	449,99	135,02	225,03	1215	51,95	10.37	45	60	46	60	0,47
D 14d	17.09.12	24	450,33	135,06	225,15	1215,1	33,22	11.52	45	90	45	90	0,44
D 28d	04.10.12	24	450,20	135,10	225,10	1215	20,01	11.11	80	60	80	60	0,42
D 42d	17.09.12	24	449,96	134,97	224,97	1215	39,42	11.26	45	90	45	90	0,45
D 14d ny	22.11.12	22	450,00	135,09	224,98	1215,01	20,00	11.25	77	57	77	63	0,42

Bilag 08 - Rådata for trykprøvning

7 døgns mørtelprøver

Prøve	Dato	Højde [mm]	Bredde [mm]	Længde [mm]	Vægt [g]	Ultralyd [μm]	Tryklast 1 [kN]	Flytning 1 [mm]	Tryklast 2 [kN]	Flytning 2 [mm]	Trykstyrke 1 [Mpa]	Trykstyrke 2 [Mpa]	Taget op kl.
A1	13.09.12	40,02	40,28	160,6	586	37,4	96	0,5	77	0,8	47,67	38,23	09.00
A2	13.09.12	40,00	39,90	160,8	588	37	97	0,6	97	0,6	48,62	48,62	09.00
A3	13.09.12	39,42	40,17	161,0	578	37,1	99	0,6	97	0,7	49,29	48,29	09.00
B1	13.09.12	40,17	40,93	161,6	593	38,3	95	0,4	101	0,4	46,42	49,36	09.30
B2	13.09.12	40,15	40,73	161,9	591	38,4	96	0,4	105	0,4	47,14	51,55	09.30
B3	13.09.12	40,55	40,15	161,9	590	38,3	93	0,4	80	0,6	46,33	39,85	09.30
C1	13.09.12	40,08	41,13	160,9	557	45,5	35	0,6	43	0,3	17,02	20,91	09.30
C2	13.09.12	40,06	40,55	161,0	553	44,8	43	0,3	45	0,3	21,21	22,19	09.30
C3	13.09.12	39,98	40,16	161,1	558	45,2	30	0,6	-	-	14,94	-	09.30
D1	13.09.12	41,33	40,25	160,8	569	44,6	45	0,5	41	0,6	22,36	20,37	09.30
D2	13.09.12	40,35	40,64	160,5	562	44,2	58	0,3	56	0,4	28,55	27,56	09.30
D3	13.09.12	41,25	40,13	160,5	563	44,4	49	0,5	45	0,4	24,42	22,43	09.30
C1, ny	04.10.12	40,27	40,03	162,1	580	41,6	70	0,3	62	0,5	34,97	30,98	08.00
C2, ny	04.10.12	40,02	40,11	161,7	577	41,9	71	0,3	57	0,6	35,40	28,42	08.00
C3, ny	04.10.12	39,94	40,03	161,4	573	41,4	69	0,3	69	0,3	34,47	34,47	08.00
D1, ny	04.10.12	40,00	40,02	161,2	564	41,6	86	0,3	84	0,3	42,98	41,98	09.15
D2, ny	04.10.12	40,03	40,07	161,2	564	42,3	84	0,3	80	0,3	41,93	39,93	09.15
D3, ny	04.10.12	40,03	40,07	160,8	564	41,8	83	0,3	88	0,3	41,42	43,92	09.15

Bilag 08 - Rådata for trykprøvning

B1, vasket	29.10.12	40,15	40,43	161,4	583		98	0,3	97	0,3	48,48	47,98	10.15
B2, vasket	29.10.12	39,99	40,54	161,6	586		96	0,3	99	0,3	47,36	48,84	10.15
B3, vasket	29.10.12	40,17	40,61	161,6	589		99	0,3	90	0,5	48,75	44,32	10.15
C1, vasket	29.10.12	40,08	40,74	161,2	581		79	0,3	80	0,3	38,78	39,27	10.15
C2, vasket	29.10.12	40,08	40,83	161,3	578		77	0,3	76	0,3	37,71	37,22	10.15
C3, vasket	29.10.12	39,95	40,77	161,2	578		80	0,3	80	0,3	39,25	39,25	10.15
B1, tørret	29.10.12	40,04	40,81	161,1	587		101	0,3	105	0,3	49,50	51,46	10.15
B2, tørret	29.10.12	40,03	40,89	160,9	587		100	0,3	99	0,3	48,92	48,43	10.15
B3, tørret	29.10.12	40,05	40,88	160,9	587		100	0,3	101	0,3	48,92	49,41	10.15

14 døgns mørtelprøver

Prøve	Dato	Højde [mm]	Bredde [mm]	Længde [mm]	Vægt [g]	Ultralyd [μm]	Tryklast 1[kN]	flytning 1[mm]	Tryklast 2[kN]	Flytning 2[mm]	Trykstyrke 1 [Mpa]	Trykstyrke 2 [Mpa]	Taget op kl.
A1	01.10.12	40,38	41,03	162,0	606	37,9	113	0,6	116	0,5	55,08	56,54	10.00
A2	01.10.12	40,24	40,50	162,0	591	36,8	107	0,6	104	0,4	52,84	51,35	10.00
A3	01.10.12	40,14	40,64	161,1	597	37,4	110	0,4	115	0,4	54,14	56,60	10.00
B1	01.10.12	40,02	40,31	161,3	584	37,6	114	0,5	109	0,4	56,56	54,08	10.00
B2	01.10.12	40,30	40,49	161,0	584	37,6	74	1,1	110	0,4	36,55	54,33	10.00
B3	01.10.12	39,99	40,34	160,8	585	38	114	0,4	112	0,4	56,52	55,53	10.00
C1	25.10.12	40,01	40,39	160,6	571	39,4	108	0,4	112	0,4	53,47	55,45	10.30
C2	25.10.12	40,09	40,32	160,0	569	38,8	108	0,4	106	0,4	53,57	52,58	10.30
C3	25.10.12	39,95	40,10	159,9	566	39,3	104	0,4	104	0,3	51,87	51,87	10.30

Bilag 08 - Rådata for trykprøvning

D1	01.10.12	40,03	40,85	160,9	577	-	89	0,3	89	0,3	43,58	43,58	10.15
D2	01.10.12	40,04	40,88	161,1	577	-	87	0,3	89	0,3	42,56	43,54	10.15
D3	01.10.12	40,08	40,88	161,1	578	-	93	0,3	91	0,3	45,50	44,52	10.15
D1, ny	06.12.12	40,05	40,77	161,5	582	-	104	0,6	88	0,9	51,02	43,17	12.35
D2, ny	06.12.12	40,15	40,74	161,8	582	-	95	0,5	99	0,6	46,63	48,60	12.35
D3, ny	06.12.12	40,19	40,93	161,9	584	-	97	0,6	88	0,7	47,40	43,00	12.35
B1, tørret	06.12.12	40,08	40,40	159,2	576	-	105	0,4	102	0,5	51,98	50,50	12.45
B2, tørret	06.12.12	40,02	40,57	159,3	574	-	96	0,5	100	0,4	47,33	49,30	12.45
B3, tørret	06.12.12	40,03	40,63	159,8	574	-	96	0,4	103	0,4	47,25	50,70	12.45
B1, vasket	06.12.12	40,06	40,75	161,2	584	-	86	0,6	92	0,5	42,21	45,15	12.52
B2, vasket	06.12.12	40,12	40,89	161,4	584	-	92	0,4	89	0,4	45,00	43,53	12.52
B3, vasket	06.12.12	40,06	40,92	162,0	585	-	95	0,5	96	0,4	46,43	46,92	12.52

28 døgns mørtelprøver

Prøve	Dato	Højde [mm]	Bredde [mm]	Længde [mm]	Vægt [g]	Ultralyd [μm]	Tryklast 1[kN]	flytning 1[mm]	Tryklast 2[kN]	Flytning 2[mm]	Trykstyrke 1 [Mpa]	Trykstyrke 2 [Mpa]	Taget op kl.
A1	25.10.12	40,00	40,19	161,0	591	-	125	0,4	124	0,4	62,20	61,71	10.30
A2	25.10.12	40,06	40,26	161,1	589	-	123	0,4	126	0,4	61,10	62,59	10.30
A3	25.10.12	39,98	40,20	161,0	591	-	127	0,4	107	0,8	63,18	53,23	10.30
B1	01.11.12	40,15	40,33	160,9	583	-	125	0,4	127	0,3	61,99	62,99	07.55
B2	01.11.12	40,05	40,52	160,8	585	-	125	0,4	126	0,4	61,70	62,20	07.55
B3	01.11.12	40,00	40,11	161,1	581	-	124	0,4	127	0,4	61,82	63,32	07.55

Bilag 08 - Rådata for trykprøvning

C1	01.11.12	40,11	40,16	162,0	570	-	100	0,3	102	0,4	49,80	50,79	07.55
C2	01.11.12	40,10	40,57	161,0	576	-	98	0,4	102	0,4	48,32	50,29	07.55
C3	01.11.12	40,08	40,26	160,9	576	-	104	0,3	84	0,6	51,66	41,73	07.55
D1	01.11.12	40,00	40,95	160,3	581	-	140	0,4	130	0,5	68,37	63,49	07.55
D2	01.11.12	40,10	40,92	160,0	580	-	120	0,5	134	0,4	58,65	65,49	07.55
D3	01.11.12	40,02	40,86	160	582	-	140	0,4	131	0,4	68,53	64,12	07.55
B1, vasket	20.12.12	39,69	40,87	159,9	581		99	0,4	109	0,4	48,44	53,34	13.20
B2, vasket	20.12.12	40,05	41,13	160,0	585		106	0,4	108	0,3	51,55	52,52	13.20
B3, vasket	20.12.12	39,96	41,13	160,1	586		116	0,4	104	0,4	56,41	50,58	13.20

42 døgns mørtelprøver

Prøve	Dato	Højde [mm]	Bredde [mm]	Længde [mm]	Vægt [g]	Ultralyd [μm]	Tryklast 1[kN]	flytning 1[mm]	Tryklast 2[kN]	Flytning 2[mm]	Trykstyrke 1 [Mpa]	Trykstyrke 2 [Mpa]	Taget op kl.
A1	29.10.12	40,15	40,61	161,0	597		125	0,5	107	0,9	61,57	52,70	08.30
A2	29.10.12	40,21	40,70	161,1	596		122	0,5	119	0,5	59,96	58,48	08.30
A3	29.10.12	40,15	40,10	161,5	589		128	0,4	118	0,5	63,84	58,85	08.30
B1	29.10.12	40,19	40,66	163,2	597		128	0,6	122	0,5	62,96	60,01	08.30
B2	29.10.12	40,33	40,71	164,0	599		98	0,9	104	0,8	48,15	51,09	08.30
B3	29.10.12	40,33	40,36	163,0	595		130	0,6	126	0,6	64,43	62,44	08.30
C1	15.11.12	39,98	40,81	160,0	576		107	0,4	105	0,3	52,44	51,46	11.30
C2	15.11.12	40,00	40,89	159,9	576		105	0,4	105	0,3	51,36	51,36	11.30
C3	15.11.12	40,07	40,96	160,1	581		109	0,4	106	0,3	53,22	51,75	11.30

Bilag 08 - Rådata for trykprøvning

D1	29.10.12	40,21	40,20	161,5	575		131	0,4	126	0,4	65,17	62,68	08.30
D2	29.10.12	40,26	40,01	161,7	569		125	0,4	128	0,4	62,48	63,98	08.30
D3	29.10.12	40,19	39,97	161,3	570		131	0,4	131	0,4	65,55	65,55	08.30

14 døgns mørtelprøver brugt til porøsitet og kapillarsugning - ovntørret over flere omgange.

Prøve nr.	Dato	Højde [mm]	Bredde [mm]	Længde [mm]	Vægt [g]	Vægt efter ovn	Tryklast 1[kN]	Flytning 1[mm]	Tryklast 2[kN]	Flytning 2[mm]	Trykstyrke 1 [Mpa]	Trykstyrke 2 [Mpa]	Taget op kl.
B1, ovn	20.12.12	40,12	40,93	160,2	585	534	107	0,5	115	0,4	52,29	56,20	
B2, ovn	20.12.12	40,13	41,19	160,2	586	534	116	0,4	113	0,4	56,32	54,86	
B3, ovn	20.12.12	40,16	41,01	160,4	586	533	112	0,4	115	0,4	54,62	56,08	
D1, ovn	20.12.12	40,05	40,81	160,5	567	511	97	0,4	102	0,4	47,54	49,99	
D2, ovn	20.12.12	40,13	40,74	160,5	574	518	109	0,4	104	0,4	53,51	51,05	
D3, ovn	20.12.12	40,10	40,25	160,5	560	502	104	0,4	105	0,5	51,67	52,17	

Bilag 09 – Rådata fra IC måling

Røggasaske

Prøve	Aske [g]	Vand [mL]	mg/L Cl	mg/kg Cl	mg/l NO3	mg/kg NO3	mg/L SO4	mg/kg SO4
Aske grup C 1	10,0000	50,00	3948,0810	19740,4050	2047,2083	10236,0415	1056,5319	5282,6595
Aske grup C 2	10,0000	50,00	3996,2222	19981,1110	2088,3055	10441,5275	1050,5273	5252,6365
Aske grup C 3	10,0400	50,00	4089,8787	20367,9218	2128,2811	10599,0095	1046,7060	5212,6793
Gennemsnit			4011,394	20029,813	2087,9316	10425,526	1051,25507	5249,3251
g/kg	Cl-	NO3-	SO4--					
Prøve 1	19,74041	10,23604	5,2826595					
Prøve 2	19,98111	10,44153	5,2526365					
Prøve 3	20,36792	10,59901	5,2126793					
Diff min	0,29	0,19	0,04					
Diff max	0,34	0,17	0,03					
g/kg	Cl-	NO3-	SO4--					
Gennemsnit	20,03	10,43	5,25					
%	2,00	1,04	0,52					
Diff (+/-)	0,34	0,19	0,04					

Vasket røggasaske

Prøve	Aske [g]	Vand [mL]	mg/L Cl	mg/kg Cl	mg/l NO3	mg/kg NO3	mg/L SO4	mg/kg SO4
C1	10,0200	50,00	377,3564593	1883,0163	176,1052558	878,7687	1472,019056	7345,4045
C2	10,0200	50,00	352,0063358	1756,5186	161,9050192	807,9093	1500,70053	7488,5256
C3	10,0100	50,00	349,9020646	1747,7626	161,9445857	808,9140	1474,489939	7365,0846
Gennemsnit	10,0167	50,00	359,7549532	1795,7658	166,6516	831,8640	1482,4032	7399,6716
			diff min	48,0033	diff min	23,9547	diff min	54,2671
			diff max	87,2504	diff max	46,9047	diff max	88,8540
g/kg	Cl-	NO3-	SO4--					
Gennemsnit	1,80	0,83	7,40					
%	0,18	0,08	0,74					
Diff (+/-)	0,087	0,047	0,089					

Cement

Prøve	Cement [g]	Vand [mL]	mg/L Cl	mg/kg Cl	mg/l NO3	mg/kg NO3	mg/L SO4	mg/kg SO4
Cement 1	9,34	50	2,877	15,404	0,231	1,239	0,8648	4,630
Cement 2	10,02	50	2,673	13,337	-0,048	-0,238	0,8076	4,030
Cement 3	10,03	50	2,487	12,396	-0,084	-0,421	0,8697	4,335
Gennemsnit	9,80	50	2,679	13,712	0,033	0,194	0,847	4,332
Prøve	g/kg Cl	g/kg NO3	g/kg SO4					
Gennemsnit	0,0137	0,0000	0,0043					
%	0,0014	0,0000	0,0004					

Bilag 10 – Rådata fra ICP måling for oplukning

Røggasaske

Prøve	RGA 1	RGA 2	RGA 3	Gennemsnit
Aske [g]	1,0080	1,0089	1,0115	1,0095
Vand [mL]	100,00	100,00	100,00	100,00
mg/L Al	246,879	250,899	273,522	257,100
mg/kg Al	24491,9643	24868,5697	27041,2259	25467,2533
mg/L Cd	2,3385	2,2702	2,3075	2,3054
mg/kg Cd	231,9970	225,0183	228,1265	228,3806
mg/L Cr	1,6876	1,6412	1,6618	1,6635
mg/kg Cr	167,4206	162,6762	164,2877	164,7948
mg/L Cu	9,3418	9,0830	9,2405	9,2218
mg/kg Cu	926,7698	900,2884	913,5413	913,5332
mg/L Ni	0,4924	0,4734	0,5136	0,4931
mg/kg Ni	48,8466	46,9225	50,7729	48,8473
mg/L Pb	49,4659	49,2895	54,3858	51,0471
mg/kg Pb	4907,3313	4885,4693	5376,7474	5056,5160
mg/L Zn	315,8550	318,7630	345,1560	326,5913
mg/kg Zn	31334,8214	31595,1036	34123,1834	32351,0361
mg/L Na	40,4057	40,0284	40,8070	40,4137
mg/kg Na	4008,5020	3967,5290	4034,3055	4003,4455
mg/L Fe	56,1592	56,0800	56,3256	56,1883
mg/kg Fe	5571,3492	5558,5291	5568,5220	5566,1334
mg/L K	44,6515	42,6682	44,6385	43,9861
mg/kg K	4429,7123	4229,1803	4413,0994	4357,3307

Vasket røggasaske

Prøve	RGA vasket 1	RGA vasket 2	RGA vasket 3	Gennemsnit
Aske [g]	1,0014	1,0065	1,0040	1,0040
Vand [mL]	100,00	100,00	100,00	100,00
mg/L Al	287,586	297,514	290,890	291,997
mg/kg Al	28718,3942	29559,2648	28973,1076	29083,5889
mg/L Cd	3,0011	3,0508	2,9720	3,0080
mg/kg Cd	299,6924	303,1058	296,0159	299,6047
mg/L Cr	2,1163	2,1408	2,0856	2,1143
mg/kg Cr	211,3351	212,6995	207,7331	210,5892
mg/L Cu	10,5595	10,7337	10,6047	10,6326
mg/kg Cu	1054,4737	1066,4382	1056,2450	1059,0523
mg/L Ni	0,7566	0,7586	0,7420	0,7524
mg/kg Ni	75,5576	75,3655	73,9052	74,9428
mg/L Pb	57,8431	60,9570	58,9036	59,2346
mg/kg Pb	5776,2233	6056,3338	5866,8924	5899,8165
mg/L Zn	445,7530	372,7350	423,6330	414,0403
mg/kg Zn	44512,9818	37032,7869	42194,5219	41246,7635
mg/L Na	37,7048	37,2389	36,6245	37,1894
mg/kg Na	3765,2087	3699,8410	3647,8586	3704,3028
mg/L Fe	85,0474	87,6446	86,1379	86,2766
mg/kg Fe	8492,8500	8707,8589	8579,4721	8593,3937
mg/L K	36,4318	36,2606	35,6315	36,1080
mg/kg K	3638,0867	3602,6428	3548,9542	3596,5612
mg/L Ca	4462,3800	3540,6600	4052,5000	4018,5133

Bilag 11 – Rådata fra leaching

Rådata fra bacthleachtest på prøve B, D og en reference

Prøve	Prøve B1	Prøve B2	Prøve B3	Prøve D1	Prøve D2	Prøve D3	Reference
Aske [g]	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0100	20,0000
Vand [mL]	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	40,00
mg/L Al	0,046617	0,028089	0,042659	0,039163	0,031458	0,035763	1,02465
mg/kg Al	0,0932	0,0562	0,0853	0,0783	0,0629	0,0715	2,0493
mg/L Ca	740,265	749,324	743,788	753,482	766,235	792,194	689,741
mg/kg Ca	1480,5300	1498,6480	1487,5760	1506,9640	1532,4700	1583,9920	1379,4820
mg/L Cd	0	0	0	0	0	0	0
mg/kg Cd	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
mg/L Cr	0,032011	0,035106	0,03588	0,034995	0,03547	0,038165	0,027479
mg/kg Cr	0,0640	0,0702	0,0718	0,0700	0,0709	0,0763	0,0550
mg/L Cu	0,017056	0,017692	0,01999	0,013103	0,019172	0,018149	0,012727
mg/kg Cu	0,0341	0,0354	0,0400	0,0262	0,0383	0,0363	0,0255
mg/L Fe	0,047577	0,045125	0,046654	0,056039	0,060389	0,058969	0,080857
mg/kg Fe	0,0952	0,0903	0,0933	0,1121	0,1208	0,1179	0,1617
mg/L K	99,7781	97,9081	102,6	100,364	100,475	98,5231	360,414
mg/kg K	199,5562	195,8162	205,2000	200,7280	200,9500	196,9970	720,8280
mg/L Mg	0,033048	0,030339	0,033954	0,033496	0,03122	0,048323	0,374077
mg/kg Mg	0,0661	0,0607	0,0679	0,0670	0,0624	0,0966	0,7482
mg/L Ni	0,003754	0,0091	0	0	0	0,008866	0
mg/kg Ni	0,0075	0,0182	0,0000	0,0000	0,0000	0,0177	0,0000
mg/L Pb	0,089784	0,087169	0,087601	0,248607	0,246719	0,246111	0,006617
mg/kg Pb	0,1796	0,1743	0,1752	0,4972	0,4934	0,4921	0,0132
mg/L Zn	0,026555	0,025554	0,026148	0,071299	0,069561	0,067915	0,039576
mg/kg Zn	0,0531	0,0511	0,0523	0,1426	0,1391	0,1358	0,0792
mg/L Na	101,434	105,03	104,926	109,827	111,606	106,921	147,04
mg/kg Na	202,8680	210,0600	209,8520	219,6540	223,2120	213,7886	294,0800

Omregning til mikrogram per liter

I tabellen herunder er værdier for batchleachtesten som ovenfor angivet i milligram per liter, omregnet til mikrogram per liter, for derved at kunne sammenligne med værdier i restproduktbekendtgørelsen.

Prøve	B1	B2	B3	D1	D2	D3	REF
µg/L Al	46,6	28,1	42,7	39,2	31,5	35,8	1024,7
µg/L Cd	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
µg/L Cr	32,0	35,1	35,9	35,0	35,5	38,2	27,5
µg/L Cu	17,1	17,7	20,0	13,1	19,2	18,1	12,7
µg/L Fe	47,6	45,1	46,7	56,0	60,4	59,0	80,9
µg/L K	99778,1	97908,1	102600,0	100364,0	100475,0	98523,1	360414,0
µg/L Mg	33,0	30,3	34,0	33,5	31,2	48,3	374,1
µg/L Ni	3,8	9,1	0,0	0,0	0,0	8,9	0,0
µg/L Pb	89,8	87,2	87,6	248,6	246,7	246,1	6,6
µg/L Zn	26,6	25,6	26,1	71,3	69,6	67,9	39,6
µg/L Na	101434,0	105030,0	104926,0	109827,0	111606,0	106921,0	147040,0
µg/L Ca	740265,0	749324,0	743788,0	753482,0	766235,0	792194,0	689741,0

Gennemsnit

Herunder er gennemsnit for prøve B og D beregnet

Prøve	B	D	A
µg/L Al	39	35	1025
µg/L Cd	0	0	0
µg/L Cr	34	36	27
µg/L Cu	18	17	13
µg/L Fe	46	58	81
µg/L K	100095	99787	360414
µg/L Mg	32	38	374
µg/L Ni	4	3	0
µg/L Pb	88	247	7
µg/L Zn	26	70	40
µg/L Na	103797	109451	147040
µg/L Ca	744459	770637	689741

Restproduktbekendtgørelsen

I nedestående tabel er værdier for udsivning i de tre kategorier restprodukter kategoriseres i, ifølge restproduktbekendtgørelsen.

BEK kat. 1	BEK kat. 2	BEK kat. 3
0-2	0-2	2-40
0-10	0-10	10-500
0-45	0-45	45-2000
0-10	0-10	10-70
0-10	0-10	10-100
0-100	0-100	100-1500
0-100000	0-100000	100000-1500000

Bilag 12 - Organisk stof

Glødetab

Digle nr.	Digle efter 30 min i ovn (tom) [g]	2,5 g afvejet aske(før)	Digle efter 60 min i ovn (med aske) [g]	Aske [g] (efter)	Difference [g]	Difference [%]
1	15,5289	2,5004	17,8155	2,2866	0,2138	8,55
2	16,1216	2,5073	18,4191	2,2975	0,2098	8,37
3	15,5339	2,5038	17,8416	2,3077	0,1961	7,83
Gennemsnit						8,25

LECO

Prøve	afvejet [g]	% C	% S
Støbt mørtel	0,5012	1,09	0,524
Vasket røggasaske	0,5048	3,98	4,780

Bilag 13 – Vandindhold

Vandindhold i røggasaske

Prøve nr.	Bæger [g]	Bæger inkl. våd prøve [g]	Bæger inkl. tør prøve [g]	Våd prøve [g]	Tør prøve [g]	Difference [g]	Difference [%]
1	103,38	203,37	195,74	99,99	92,36	7,63	7,63
2	107,77	207,78	200,02	100,01	92,25	7,76	7,76
3	108,48	208,48	200,71	100,00	92,23	7,77	7,77
4	98,49	198,51	190,73	100,02	92,24	7,78	7,78
Gennemsnit	104,53	204,54	196,80	100,01	92,27	7,735	7,73

Med våd prøve menes aske der før opbevaring i plastbøtte er blevet tørret ved 40 grader og med tør prøves menes aske der har stået i varmeskab ved 105 grader i 24 timer.

Vandindhold i cement

Prøve nr.	Bæger [g]	Cement [g]	Bæger+cement [g]	Bæger+tør cement [g]	Tør cement [g]	Difference [g]	Difference [%]
1	110,89	100,01	210,90	210,66	99,77	0,24	0,24
2	93,54	100,02	193,56	193,34	99,80	0,22	0,22
3	98,60	100,01	198,61	198,36	99,76	0,25	0,25
Gennemsnit	101,01	100,01	201,02	200,79	99,78	0,24	0,24

Forsøget er foretaget på Basis Aalborg Portland cement, som også har stået i varmeskab ved 105 grader i 24 timer.

Bilag 14 – Vandopløselighed

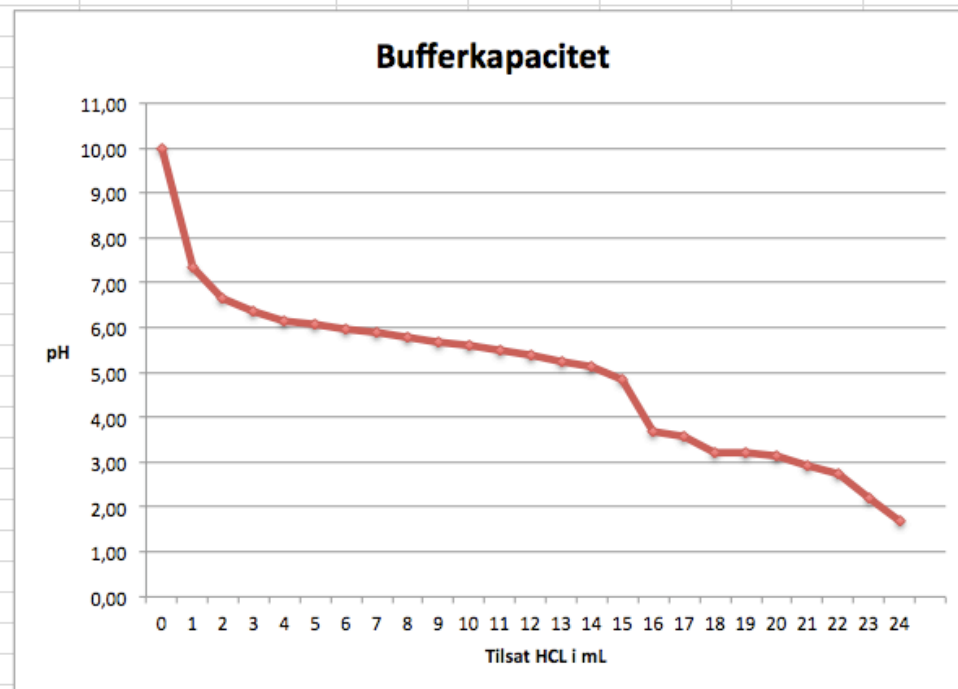
I nedenstående skema ses de afvejede mængder af aske og vand der er brugt til bestemme askens vandopløselighed. Desuden ses den beregnede difference på asken før og efter vask, og dermed opløseligheden af asken.

Prøve nr.	Aske [g]	Vand 1 [mL]	Vand 2 [mL]	Vand 3 [mL]	Filter [g]	Skål [g]	Skål+filter+vasket aske [g]	Vasket aske [g]	Difference [g]	Difference [%]
1	100,01	500	500	500	4,05	102,8	196,96	90,14	9,87	9,88
2	100,02	500	500	500	4,09	108,9	203,17	90,16	9,86	9,88

Bilag 15 – Bufferkapacitet

	Tilsat HCL [mL]	pH	Temperatur	Tid [min]	
Aske i destilleret vand	0	9,98	21,2	0	Dag 1
med 1 mL HCL	1	7,35	-	30	
2 mL HCL	2	6,64	21,8	60	
3 mL HCL	3	6,35	22,7	90	
4 mL HCL	4	6,15	23,1	120	
5 mL HCL	5	6,08	23,4	150	
6 mL HCL	6	5,97	23,2	180	
7 mL HCL	7	5,89	23,1	210	
8 mL HCL	8	5,79	23,5	240	
9 mL HCL	9	5,68	23,1	270	
10 mL HCL	10	5,60	23,3	300	
11 mL HCL	11	5,50	23,8	330	
12 mL HCL	12	5,40	23,8	360	
13 mL HCL	13	5,25	23,4	380	
14 mL HCL	14	5,13	22,8	400	
15 mL HCL	15	4,86	23,3	420	Dag 2
16 mL HCL	16	3,67	22,8	30	
17 mL HCL	17	3,56	22,6	60	
18 mL HCL	18	3,20	22,9	90	
19 mL HCL	19	3,23	23,0	120	
20 mL HCL	20	3,13	23,0	150	
21 mL HCL	21	2,94	22,6	175	
22 mL HCL	22	2,75	22,5	200	
23 mL HCL	23	2,20	22,4	225	
24 mL HCL	24	1,68	22,7	250	

Aske: 20,00 g
Destilleret vand: 300 mL



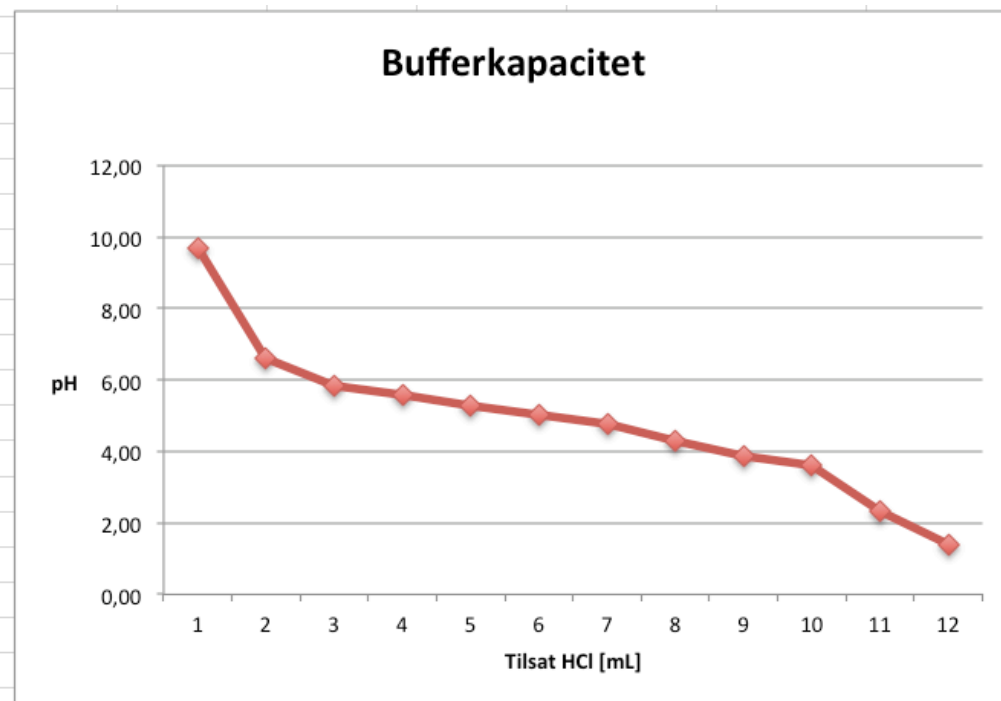
Da prøven måtte deles op i to dele, grundet tidsbehovet, blev endnu et forsøg med bufferkapacitet udført.

Denne gang er mængden af vand og aske halveret, svarende til at mængden af tilsat saltsyre (HCl) per måling er fordoblet. Samtidig er omrystningstiden forkortet væsentlig.

	Tilsat HCL [mL]	pH	Temperatur [°C]
Aske i destilleret vand	0	9,67	22,1
med 1 mL HCl	1	6,60	23
2 mL HCl	2	5,85	23,3
3 mL HCl	3	5,58	23,5
4 mL HCl	4	5,30	23,3
5 mL HCl	5	5,01	23,4
6 mL HCl	6	4,76	23
7 mL HCl	7	4,30	24,1
8 mL HCl	8	3,88	24,2
9 mL HCl	9	3,63	23,2
10 mL HCl	10	2,31	22,9
11 mL HCl	11	1,40	23,5

Aske 10,00 g

Destilleret vand 150 mL



Bilag 16 – Densitet af røggasaske

Et 100 milliliter bæger fyldes med aske og vejes for således at finde massen af 100 milliliter aske, som herefter omregnes til kilogram per kubikmeter.

Forsøget er foretaget på røggasaske REFA 5.

Fejlkilde: Der kan forekomme afvigelser i volumen af asken, da det er målt ved øjemål.

Løs aske

Prøve	Bæger [g]	Bæger + aske [g]	Aske [g]	Aske [kg]	Volumen [L]	Volumen [m3]	Densitet [kg/m3]
1	82,97	153,59	70,62	0,0706	0,1	0,0001	706,20
2	79,8	149,09	69,29	0,0693	0,1	0,0001	692,90
3	90,04	160,47	70,43	0,0704	0,1	0,0001	704,30
Gennemsnit	84,27	154,38	70,11	0,0701	0,1	0,0001	701,13

Sammenpresset aske

Prøve	Bæger [g]	Bæger + aske [g]	Aske [g]	Aske [kg]	Volumen [L]	Volumen [m3]	Densitet [kg/m3]
1	98,54	185,34	86,80	0,0868	0,1	0,0001	868,00
2	104,3	190,19	85,89	0,0859	0,1	0,0001	858,90
Gennemsnit			86,35	0,0863	0,1	0,0001	863,45

Bilag 17 - Porøsitet og densitet

Forsøg 1

Midter- og endestykker fra trykte mørtelprøver

Prøve	m,0 [kg]	m,dry [kg]	Vandindhold [%]	m,ov [kg]	m,u [kg]	V [10 ⁻⁶ m ³]	Vå [10 ⁻⁶ m ³]	Porøsitet	ρ,dry [kg/m ³]	ρ,ssd [kg/m ³]
B28 lille	0,1154	0,1093	5,27	0,11876	0,06701	51,85	9,50	0,1832	2107,47	2290,29
B28 stor	0,1506	0,1429	5,09	0,15768	0,08859	69,23	14,80	0,2138	2064,32	2277,68
B42	0,0764	0,0727	4,77	0,07909	0,04492	34,24	6,39	0,1867	2123,63	2309,97
C28	0,2153	0,2047	4,90	0,22806	0,12716	101,10	23,37	0,2311	2025,08	2255,74
D28	0,2405	0,2255	6,23	0,25034	0,13970	110,86	24,91	0,2247	2033,89	2258,13
D42	0,0729	0,0688	5,69	0,07666	0,04269	34,04	7,93	0,2329	2019,80	2252,18
Reference		0,1355		0,15113	0,08391	67,35	15,68	0,2328	2011,44	2243,79

Prøverne har ligget i eksikkator med destilleret ved atmosfærisk tryk i 15 minutter.

Forsøg 2

Hele utrykte mørtelprøver

Prøve	m,0 [kg]	m,dry [kg]	Vandindhold [%]	m,ov [kg]	m,u [kg]	V [10 ⁻⁶ m ³]	Vå [10 ⁻⁶ m ³]	Porøsitet	ρ,dry [kg/m ³]	ρ,ssd [kg/m ³]
B14,1	0,585	0,5328	5,22	0,58992	0,33029	260,1503006	57,23	0,2200	2048,05	2267,61
B14, 2	0,586	0,5331	5,29	0,59031	0,33015	260,6813627	57,32	0,2199	2045,03	2264,49
D14, 1	0,567	0,5096	5,74	0,57291	0,31664	256,7835671	63,44	0,2470	1984,55	2231,10
D14,2	0,574	0,5161	5,79	0,57845	0,32112	257,8456914	62,47	0,2423	2001,58	2243,40

Prøverne har ligget i eksikkator fyldt med destilleret vand ved atmosfærisk tryk i 24 timer.

Bilag 18 – Rådata fra kapillarsugning

Opsuget mængde vand per areal

I tabellen herunder fremgår dimensionerne af ni forskellige mørtelprøver af typerne A, B og D. Ligeledes fremgår vægten af hver prøve efter henholdsvis 0, 1, 2, 4, 16, 32, 60, 120 og 240 minutters kapillarsugning. Den opsugede mængde vand per areal for hvert tidsinterval er også beregnet og indskrevet i tabellen.

Prøve	B1	B2	B3	D1	D2	D3	A1	A2	A3
Højde[mm]	160,20	160,20	160,40	160,50	160,50	160,50	75,00	76,00	76,50
Bredde [mm]	40,93	41,19	41,01	40,81	40,74	40,25	40,10	39,50	40,80
Dybde [mm]	40,12	40,13	40,16	40,05	40,13	40,10	39,95	39,80	39,70
Vægt 0 [g]	532,80	533,10	532,00	509,60	516,10	501,80	257,71	256,98	258,86
Vægt 1 [g]	533,20	533,50	532,40	510,30	516,70	502,80	258,40	257,47	259,56
Q1[kg/m2]	0,244	0,242	0,243	0,428	0,367	0,619	0,431	0,312	0,432
Vægt 2 [g]	533,30	533,70	532,50	510,50	516,90	502,90	258,45	257,57	259,63
Q2[kg/m2]	0,305	0,363	0,304	0,551	0,489	0,681	0,462	0,375	0,475
Vægt 4 [g]	533,40	533,80	532,60	510,70	517,00	503,20	258,50	257,67	259,71
Q4 [kg/m2]	0,365	0,423	0,364	0,673	0,550	0,867	0,493	0,439	0,525
Vægt 8 [g]	533,60	534,00	532,80	511,00	517,30	503,50	258,68	257,75	259,83
Q8 [kg/m2]	0,487	0,544	0,486	0,857	0,734	1,053	0,605	0,490	0,599
Vægt 16 [g]	533,80	534,30	533,10	511,50	517,70	504,10	258,98	258,03	260,18
Q16 [kg/m2]	0,609	0,726	0,668	1,163	0,978	1,425	0,793	0,668	0,815
Vægt 32 [g]	534,20	534,90	533,40	512,20	518,20	504,80	259,56	258,45	260,73
Q32 [kg/m2]	0,853	1,089	0,850	1,591	1,284	1,858	1,155	0,935	1,154
Vægt 60 [g]	534,80	535,60	534,00	513,20	519,00	505,70	260,35	259,09	261,55
Q60 [kg/m2]	1,218	1,512	1,214	2,203	1,774	2,416	1,648	1,342	1,661
Vægt 120 [g]	535,80	536,80	535,00	514,60	520,40	507,20	261,64	260,18	262,80
Q120 [kg/m2]	1,827	2,238	1,822	3,059	2,630	3,345	2,453	2,035	2,432
Vægt 240 [g]	537,40	538,90	536,40	516,50	522,30	509,10	263,86	261,96	264,69
Q240 [kg/m2]	2,801	3,509	2,672	4,222	3,792	4,522	3,839	3,168	3,599

Gennemsnit

I denne tabel er gennemsnittet fra resultater i ovenstående beregnet.

Gennemsnit	Prøve B	Prøve D	Prøve A
Højde [mm]	160,27	160,50	75,83
Bredde [mm]	41,04	40,60	40,13
Dybde [mm]	40,14	40,09	39,82
m0 [g]	532,63	509,17	257,85
Q1 [kg/m ²]	0,24	0,47	0,39
Q2 [kg/m ²]	0,32	0,57	0,44
Q4 [kg/m ²]	0,38	0,70	0,49
Q8 [kg/m ²]	0,51	0,88	0,56
Q16 [kg/m ²]	0,67	1,19	0,76
Q32 [kg/m ²]	0,93	1,58	1,08
Q60 [kg/m ²]	1,31	2,13	1,55
Q120 [kg/m ²]	1,96	3,01	2,31
Q240 [kg/m ²]	2,99	4,18	3,54

Kapillartal

Herunder er det gennemsnitlige kapillartal for hver af de tre typer mørtelprøver beregnet.

Tid [min]	Q, A	k, A	Q, B	k, B	Q, D	k, D
1	0,39	0,392	0,24	0,243	0,47	0,472
2	0,44	0,309	0,32	0,229	0,57	0,406
4	0,49	0,243	0,38	0,192	0,70	0,348
8	0,56	0,200	0,51	0,179	0,88	0,312
16	0,76	0,190	0,67	0,167	1,19	0,297
32	1,08	0,191	0,93	0,164	1,58	0,279
60	1,55	0,200	1,31	0,170	2,13	0,275
120	2,31	0,211	1,96	0,179	3,01	0,275
240	3,54	0,228	2,99	0,193	4,18	0,270
Gennemsnit		0,240		0,191		0,326

Bilag 19 – Kemisk indhold i ubehandlet røggasaske

Parameter	Tør produkt [mg/kg]	Vådprodukt [mg/kg]
Cl	130000-220000	71000
Ca	190000-250000	110000
Si	69000-98000	120000
Al	22000-46000	71000
Na	12000-19000	28000
K	27000-34000	35000
Fe	6100-18000	15000
Mg	7000-18000	23000
S	12000-18000	26000
Ti	2500-5100	8400
P	2400-4600	6000
Ag	14-60	53
As	65-250	190
Ba	760-1400	1900
Cd	140-200	270
Co	10-15	22
Cr	15-240	390
Cu	640-1100	1300
Hg	9,3-19	38
Mn	280-630	1400
Mo	9,3-16	20
Ni	23-63	67
Pb	4200-6500	4200
Se	8,2-16	12
Sn	620-780	1000
Sr	400-500	200
Zn	14000-18000	23000
V	26-50	62
pH	12,1-12,4	11
Alkalinitet	5,6-12	5
Glødetab [g/kg]	28-49	110
Total org.stof [g/kg]	6-9	17

Data fra Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, Nr. 92 1997. "Restprodukter fra røggasrensning ved affaldsforbrænding 3".

Appendix

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

B: Vandindhold i jord

C: Oplukning af jordprøve efter DS 259

D: Glødetab i jord

E: Måling af ledningsevne i jord

F: Vandopløselighed

G: Vandopløselige anioner

H: Method for measuring Buffer Capacity of Soils and Sludge

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 kombinationssselektrode 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.

Vandindhold i jord

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et varmeskab.

C Analysens udførelse

Ved meget præcis måling:

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

Dette gøres vha. en tang, fingrene afsætter fugt.

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

Ved mindre præcis måling (mest anvendt):

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

D Beregning af resultat

Vandindholdet angives i procent af vægten af den fugtige jord.

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

E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald og bægerglassene rengøres.

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 metalkoncentrationen i jorden.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes et atomabsorptionsspektrofotometer (AAS).

C Kemikalie sikkerhed

Salpetersyre - Brandnærende; Ætsende; Brandfarlig ved kontakt med brandbare stoffer. Alvorlig ætsningsfare. 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) HNO_3 :**

500 mL koncentreret HNO_3 overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er $\frac{1}{2}$ 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 stinkskaab).

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 stinkskaab. **Brug engangshandsker.** Autoklaveflasken skylles med 3 gange destilleret vand. Filtreret skal suge 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.

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

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm
 B = g jord afvejet
 C = fortyndingsfaktor

H Affaldshåndtering

Salpetersyre hældes i affaldsdunke mærket X 4.18.

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskabet.

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Glødetab i jord

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et muffelovn.

C Analysens udførelse

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

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

Derefter afvejes omkring 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 ekssikkator og vejes på analyse vægt.

D Beregning af resultat

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

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

E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

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 ledningsevнемåler.

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 ledningsevнемålingen beregnes jordens ionindhold i jordvæsken.

Det samlede ionindhold i jordvæsken:

$$S_{\text{væske}} (\text{mækv.} / L) = \frac{10 \text{ cm} \cdot \text{mækv.} \cdot \text{ledningsevnen} (\text{mS} / \text{cm})}{L \cdot \text{mS}}$$

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

$$S_{jord} = \frac{S_{væske} \cdot V_{vand\ tilsat}}{M_{jord}}$$

E Affaldshåndtering

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Vandopløselighed

Analyse:

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

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

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

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

Hele prøven hældes over i filteret og stilles til afdrypning.

Når asken er næste tør stilles filteret med asken i varmeskab ved 105°C natten over.

Asken og filteret vejes og vægten noteres.

Vandopløselige anioner

Analyse:

10g tørret aske afvejes på teknisk vægt til 100mL plastikflaske. Der tilsættes 50mL destilleret vand.

Prøven stilles på rystebord natten over.

Prøven filtreres med sprøjtefilter og prøven gemmes til ionchromotograf og AAS

Method for measuring Buffer Capacity of Soils and Sludge¹

1. Mix 20 gram of dry soil/dry sludge in a container/glass beaker with 300 mL deionized water.
2. Stir for 30 minutes using a shake table/magnetic stirrer.
3. Measure pH.
4. Add 1 mL of concentrated HCl.
5. Mix additional 30 minutes.
6. Measure pH.
7. Repeat step 4-6 until pH evens out (pH 2-1)
8. Plot pH of solution vs. H^+ addition (ml conc. HCl)

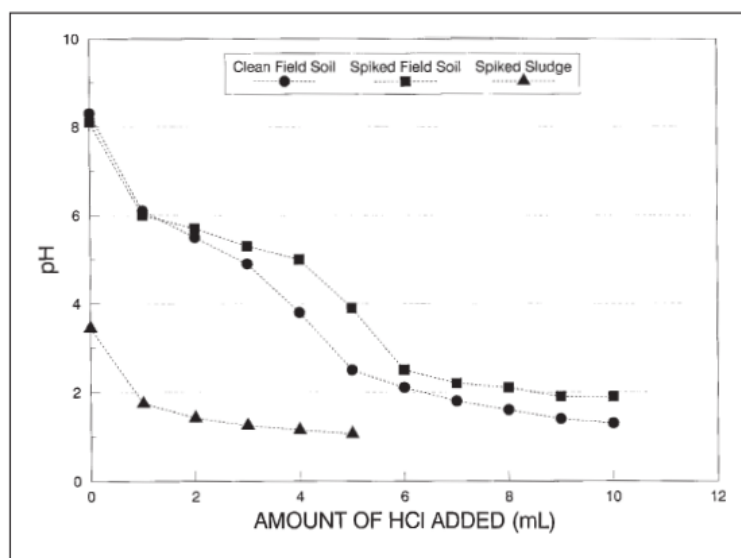


Figure 4. Buffering capacity test results.

¹ Reddy, K.R., Donahue, M., Saichek, R. E., Sasoaka, R., 1999. Preliminary Assessment of Electrokinetic Remediation of Soil and Sludge Contaminated with Mixed Waste. Journal of the Air & Waste Management Association, 49:7, 823-830.

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