

Metoder til genanvendelse af farvede glasskår til produktion af tegl og beton og til vejbygning

Del 2 - Pilotforsøg

Marianne Tange Hasholt, Dorte Mathiesen og Helge Hansen
Teknologisk Institut

Finn Thøgersen
Vejteknisk Institut

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indholdsfortegnelse

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
ENGLISH SUMMARY	11
1 INDLEDNING	15
2 KEMISK ANALYSE AF GLAS TIL PILOTFORSØG	17
2.1 UNDERSØGELSE AF GLASSAND	17
2.1.1 Indledning	17
2.1.2 Prøvemateriale	17
2.1.3 Kornstørrelsesfordeling	17
2.1.4 Mikroskopi	18
2.1.5 Kemisk sammensætning	21
2.2 UNDERSØGELSE AF GLASMEL	21
2.2.1 Prøvematerialer	21
2.2.2 Densitet	21
2.2.3 Kornstørrelsesfordeling	21
2.2.4 Mikroskopi	22
2.2.5 Kemisk sammensætning	22
3 GLAS SOM FILLERMATERIALE I BETON	23
3.1 FORSØGSPROGRAM	23
3.2 FORMALING AF GLAS	24
3.3 INDLEDENDE FORSØG MED PASTA OG MØRTLER	24
3.3.1 Styrkeudvikling	25
3.3.2 Vandbehov og tid til begyndende afbinding	26
3.3.3 Alkali/kisel-reaktivitet	28
3.4 BETONFORSØG	30
3.4.1 Friskbetonegenskaber	30
3.4.2 Varmeudvikling	30
3.4.3 Styrkeudvikling	31
3.4.4 Chloridmodstand	32
3.4.5 Frostbestandighed	32
3.5 MÅLING AF FARVEÆNDRINGER VED ANVENDELSE AF GLASFILLER	33
3.6 KONKLUSION	37
4 GLAS SOM MAGRINGSMIDDEL I TEGL	39
4.1 VALG AF MATERIALER	39
4.2 BLANDINGSFORHOLD	40
4.3 FREMSTILLING AF BLANDINGER OG FORMGIVNING AF STÆNGER	40
4.4 TØRRING	41
4.5 BRÆNDING	41
4.6 MIKROSKOPIUNDERSØGELSER	43
4.7 KONKLUSION	43
5 KNUST GLAS TIL VEJBYGNING	47
5.1 BESKRIVELSE	47
5.2 FORSØGSPROGRAM	48
5.3 RESULTATER	48

5.3.1	<i>Sigteanalyser</i>	48
5.3.2	<i>Glødetab</i>	50
5.3.3	<i>Densitet</i>	51
5.3.4	<i>Slidstyrke</i>	51
5.3.5	<i>Maksimal tørdensitet og optimalt vandindhold</i>	52
5.3.6	<i>CBR-værdi</i>	54
5.4	KONKLUSTION	54
6	REFERENCER	57

Bilag A:	Metode til kemisk analyse af glassand
Bilag B:	Kornstørrelsesfordeling for glasmel
Bilag C:	Mikroskopibilleder af glasmel
Bilag D:	Recepter til pilotforsøg med beton
Bilag E:	Forsøgsresultater fra pilotforsøg med beton (rådata)
Bilag F:	Kornstørrelsesfordeling lerblandinger
Bilag G:	Mikroskopibilleder af teglblandinger

Forord

Nærværende rapport indeholder resultater fra anden fase af projektet *Metoder til genanvendelse af farvede glasskår til produktion af tegl og beton og til vejbygning*. Projektet er udført som projekt under Miljøstyrelsens Program for renere produkter, Affald og genanvendelse.

Hvor projektets første fase bestod i at kortlægge mulighederne for at genanvende farvede glasskår i byggematerialer vha. et litteraturstudium, er der i denne anden fase udført pilotforsøg med konkrete anvendelser af knuste og formalede glasskår. Glasset er således afprøvet som fillermateriale i beton, som magringsmiddel i tegl samt som ubundet materiale til bærelag og fyld ved vejbygning.

Projektet er gennemført af en projektgruppe bestående af

- Teknologisk Institut, Betoncenteret og Murværkscenteret
- Vejteknisk Institut
- Aalborg Portland A/S
- Vindø Teglværk a/s

Projektet er fulgt af en følgegruppe bestående af:

- Birgitte Kjær, Miljøstyrelsen
- Anders Stæhr, Uniscrap
- Bent Harsmann, Rexam Glass Holmegaard
- Anders Kargo, NCC Roads A/S
- Karsten Ludvigsen, RGS 90
- Henning Jørgensen, Reno-Sam
- Bo Mathiesen, Miljøforum Fyn
- Jacob Thrysøe, Aalborg Portland
- Jan Rømsgaard, Vindø Teglværk
- Mette Glavind, Teknologisk Institut (projektleder)

Sammenfatning og konklusioner

Denne rapport sammenfatter resultaterne af tre selvstændige pilotundersøgelser omhandlende anvendelse af farvede glasskår til fremstilling af beton, tegl og materialer til vejbygning.

Beton

Muligheden for at anvende glasfiller i beton er undersøgt. Den anvendte glasfiller er formålet til samme finhed som cement. På baggrund af resultaterne kan konkluderes følgende:

De foreliggende resultater tyder ikke på, at der ud fra et betonteknologisk synspunkt er noget til hinder for, at glasfiller kan anvendes til fremstilling af beton. Det viste sig muligt at fremstille beton med glasfiller med god bearbejdelighed, tilstrækkelig frostbestandighed og chloridmodstandsevne og en evne til at undertrykke skadelige alkaliskel-skader på tilsvarende vis som flyveaske. Der blev observeret mindre styrkereduktioner, som vil være af betydning for, i hvor store mængder glasfilleren kan tilsættes, og hvilket delmateriale den skal substituere. Endelig viste anvendelsen af glasfiller i hvid beton en farveændring, der knap kan skelnes med det blotte øje, og er dermed et muligt alternativ til hvid silica, der er et relativt dyrt materiale.

Muligheden for anvendelsen af glasfiller i beton er foruden de betonteknologiske forhold afhængig af det gældende regelgrundlag for beton. I det nuværende regelgrundlag (standarden DS 481) er det tilladt at anvende glasfiller i større mængder i beton til passivt miljø (svarer til ca. 70% af al beton), idet det i denne miljøkasse kun er nødvendigt at dokumentere, at glasfilleren ikke skader betonens egenskaber, hvilket der i pilotundersøgelserne er indikationer for ikke er tilfældet.

DS 481 afløses inden for en relativ kort tidshorisont af EN 206-1 samt et nationalt tillægsk dokument DS 2426 til denne fælles europæiske standard. Her vil det være muligt at anvende puzzolanske tilsætninger ud over flyveaske og mikrosilica i **alle** miljøklasser, hvis det er specificeret i projektoplægget eller hvis der udarbejdes en **national standard** indenfor området. Dette kan både betyde en stramning og en lempelse for glasfilleren. Det er en lempelse, at der ikke er noget, der hindrer anvendelsen af glasfilleren i alle miljøklasser. Men i praksis vil det nemt komme til at virke som en stramning, at anvendelsen af glasfiller skal specificeres i det enkelte projekt, idet der ikke p.t. findes en national standard for anvendelsen af glasfiller i beton. Det vil være svært for betonproducenten uden videre at indarbejde glasfiller i sine standardrecepter, idet projektoplæggene formentlig vil indeholde forskellige specifikationer fra gang til gang.

Tegl

Anvendelse af glassand og glasmel som magringsmiddel i lerblandinger til røde blødstrogne sten fra to forskellige teglværker Hammershøj og Sønderkov er undersøgt.

Resultaterne viser primært, at der er store forskelle på virkningerne af henholdsvis glassand og glasmel:

- Glassand blærer op. Virkningen kan netop spores som mørke uregelmæssigheder på synsfladerne ved 975 °C. Ved 1000 °C ses opblæringerne allerede med det blotte øje.
- Der spores ingen tilsvarende virkninger af glasmel, heller ikke i mikroskopet.
- Resultaterne for vægttab under brænding antyder en stigende gasudvikling ved stigende temperatur. Dette kan muligvis forklare opblæringen af glaspartiklerne.

Der er ligeledes forskelle på, hvordan virkningerne er i de to lertyper, selv om begge er rødbrændende. I Hammershøj leret er virkningen i bedste fald neutral. I Sønderkov leret er der omtrent neutral virkning af glassand, mens der generelt er en positiv virkning af glasmel.

Muligheden for anvendelse af glas i tegl bedømmes således:

Glassand kan anvendes ved temperaturer under 975 °C uden opblæring. Det kunne evt. være interessant for savsmuldssten eller bagmursten, der typisk brændes ved 800 °C.

Opblæringen, der ses ved højere temperaturer, kan evt. udnyttes til at give et mere porøst og sugende materiale under forudsætning af, at en nedgang i styrke kan accepteres.

Glassand vil formentlig kunne håndteres på samme måde som teglværker i dag håndterer almindeligt sand. Hvis der er risiko for biologisk aktivitet pga. næringsstoffer i glas materialet, bør det dog vaskes først eller alternativt holdes helt tørt så længe som muligt.

Forsøgene peger på, at det er muligt at opnå tilstrækkelige egenskaber ved lavere brændingstemperaturer ved anvendelse af **glasmel**. Der vil være mulighed for at nedsætte brændingstemperaturerne med op til 50 °C. En lavere temperatur vil normalt give et mere lyserødt materiale. Selvom forsøgene tyder på, at tilsætning af glasmel giver en noget mørkere farve i forhold til referencen, er der dog en mulighed for at fremstille et lyserødt teglmateriale, der er mere tætsintret end normalt for lyserødt tegl.

Anvendelse til bagmursten er også en mulighed for glasmel.

Glasmel vil kræve en speciel håndtering på teglværkerne. Det bør holdes tørt så længe som muligt, hvis der er risiko for biologisk aktivitet pga. næringsstoffer fra ikke helt rene flasker. Transport vil formentlig skulle ske med tankvogn og opbevaring ske i silo.

Vejbygning

De mulige ubundne anvendelser af nedknust glas i Danmark kunne være som fyldmateriale, som bundsikringssand eller filtergrus.

Anvendelse som ikke-bærende **fyldmateriale** vurderes ikke at skabe tekniske problemer. Tilstrækkeligt nedknust vil glasset kunne indbygges og komprimeres tilfredsstillende, også som 100 % glastilslag. For fyldanvendelser, hvor der kræves en vis bæreevne, kan glassets lave CBR-værdi evt. udgøre et problem. Opblanding med naturligt tilslag kan givetvis forbedre situationen.

Ud fra de udførte laboratorieforsøg ser det ud til, at knust glas kan opfylde de danske krav til **bundsikringsmaterialer**. Bl.a. skal gennemfaldet på 0,075 mm sigten være mindre end 9 %, hvilket kan opfyldes med god margin. I øvrigt skal sandækivalenten være større end eller lig med 30 %. Denne prøvning er ikke udført for det knuste glas, idet den ikke vurderes at være relevant pga. det lave indhold af finstof.

Den dårlige stabilitet af det knuste glas kan være den største hindring for brug i ren form. En anvendelse som nedre lag i en tolags bundsikringsopbygning eller opblanding med naturligt tilslag kan være mulige løsninger på problemet.

I udlandet er der ikke fundet referencer til brug af 100 % glastilslag til anvendelser, der minder om den danske bundsikring. Normalt vil man kun bruge op til 20-30 % glastilslag. Det kan dog absolut ikke udelukkes, at en 100 % anvendelse er teknisk mulig, men blot ikke afprøvet, idet man ikke har ønsket at fjerne sig for meget fra det kendte.

En mulig anvendelse for knust glas kunne være som **filtergrus**, der bruges omkring drænrør o. lign. Glasset burde pga. sin enskornede struktur uden ret meget finstof være yderst velegnet som drænmateriale. I litteraturen anføres da også ofte, at knust glas har god drænevne.

Undersøgelserne viser imidlertid, at kornkurverne for de to glasfraktioner ligger udenfor Vejreglernes grænsekurver for Filtergrus I. Kornkurverne er generelt for grov- og enskornet. Forklaringen på dette tilsyneladende paradoks er, at et godt filtermateriale ikke kun skal være drænende, men også skal kunne bevare dræningsevnen, og dermed ikke må kunne fyldes op af finstof fra omgivelserne.

Overordnet set skal det til slut anføres, at den her foretagne vurdering ikke tager stilling til de miljømæssige forhold for brug af knust returglas, som må analyseres særskilt. Såfremt materialet vurderes at være potentielt forurenet kan det muligvis ikke bruges til de vejtekniske anvendelser, hvor materialet udsættes for vandgennemstrømning, dvs. som filtermateriale, bundsikring og ikke-afdækket fyld.

perspektiver for anvendelse af farvede glasskår

Pilotundersøgelserne peger på, at det er teknisk muligt at anvende glas i enten beton, tegl eller vejbygningsmateriale. Men for at glas kan blive et attraktivt alternativ til andre delmaterialer i de nævnte byggematerialer, er bl.a. økonomiske forhold af afgørende betydning for, om glasset vil blive anvendt.

Der er to forskellige veje at gå: Enten kan man gøre så lidt ved glasset som muligt (evt. kun knuse det) og lade det konkurrere med forholdsvis billige materialer som fx naturlige materialer til vejfyld. Eller man kan fremstille et mere forædlet produkt som glasfiller, der både kræver rensning og formaling, men som til gengæld kan konkurrere med produkter, der har en højere værdi. I Tabel 0.1 er angivet et overslag over, hvad priserne er på de produkter, som knust glas i givet fald kan erstatte.

Glassets værdi til ubundne formål i forbindelse med vejbygning er, ved sammenligning med de naturlige materialer det erstatter, i størrelsesordenen 0-50 kr./ton.

Ved anvendelse af glasfiller i beton vil glasfillerens markedsværdi i høj grad afhænge af, om den anvendes til hvid eller grå beton. Der findes ikke ret mange velegnede fillermaterialer, der ikke påvirker den hvide betons farve. I hvid beton skal glasfilleren konkurrere med fx hvid slagge, der koster 600-700 kr./tons, og der kan således accepteres tilsvarende omkostninger til forarbejdning af glasset. I øjeblikket er mængden af hvid beton til konstruktionsformål imidlertid begrænset. Betonproducenterne er også interesserede i alternative fillermaterialer, der fx helt eller delvist kan substituere flyveaske i grå beton, men prisen på flyveaske er noget lavere end for hvid slagge, ca. 150 kr./tons, hvilket har stor betydning for, om det vil være rentabelt at fremstille glasfiller til produktion af grå beton. Desuden skal det tages med i regnestykket, at det også er forbundet med nogle omkostninger for betonproducenten at håndtere et ekstra fillermateriale, fx vil det kræve ekstra silokapacitet.

Det er vanskeligt at vurdere, hvad markedsprisen vil være for glassand eller glasfiller til teglproduktion, da det ikke så meget afhænger af prisen på de materialer, det erstatter. Fx er prisen på sand til magring ca. 45 kr./tons, hvilket glasset næppe vil kunne konkurrere med. Anvendelsen af glas vil være betinget af, at der kan opnås en forbedret proces på teglværket. Det er svært at vurdere værdien af en sådan procesforbedring (energibesparelse ved lavere brændingstemperatur etc.) generelt, da det afhænger meget af lokale forhold på de enkelte teglværker, herunder hvilke råmaterialer, de i øvrigt har til rådighed.

Tabel 0.1 Prisoverslag for de produkter knust glas forventes at kunne erstatte.

Beton	Tilslag fx P-sten, 8-16 mm	50-70 kr./tons
	Filler til hvid beton Metakaolin Hvid slagge Hvid mikrosilica	2.000 kr./tons 600-700 kr./tons 5.000-6.000 kr./tons
	Filler til øvrig beton Flyveaske	150 kr./tons
Tegl	Magringsmiddel Sand Chamotte	45 kr./m ³ (incl. transport) 150 kr./tons ¹
	Sintringsmiddel	235 euro/tons ²
Vejbygning	Ubundne lag Stabilgrus 0-32 mm Bundsikringsgrus 0-8 mm Filtergrus 0-8 mm Fyldmaterialer	35-50 kr./tons 10-20 kr./tons 30-50 kr./tons 0-30 kr./tons

1. Forudsat fremstilling af chamotte fra teglværkets egne brøkker, dvs. prisen dækker knusning og transport.
2. Sintringsmidler anvendes ikke i dansk teglproduktion, men kommercielle produkter forhandles i fx Tyskland.

Summary

This report summarises the results of three separate pilot studies on the use of coloured glass fragments for the manufacturing of concrete, tiles, and materials for road construction.

Concrete

The possibility of using glass filler in concrete was surveyed. The used glass filler is ground to the same blaine as cement. Based on the results the following conclusions can be drawn:

From a concrete technological point of view the results do not indicate that there are any obstacles to using glass filler in the manufacturing of concrete. It turned out that it is possible to manufacture concrete with glass filler that offers good workability, sufficient frost resistance, and resistance against chloride, and an ability to tolerate damaging alkalikisel damages as is the case with fly ashes. Small strength reductions were, however observed, which will influence the amount of glass filler that can be added to the concrete and the fractions of the materials that can be substituted. Finally, when using glass filler in white concrete a change of the colour of the concrete appeared, which can hardly be distinguished by the naked eye, and therefore a possible alternative to white silica, which is a quite expensive material.

The possibility of using glass filler in concrete depends on the concrete technological conditions as well as on current legislation on concrete. According to the present regulations (the standard DS 481), it is allowed to use glass filler in large quantities in concrete used for passive environment (corresponding to approx. 70% of all concrete). In this environmental class, it is only necessary to document that the glass filler does not damage the properties of the concrete, which the present pilot studies do not show any indication of.

EN 206-1 and a national supplementary document DS 2426 to the European standard will within a very short time frame replace DS 481. According to the standard it is allowed to use puzzolan additions beside fly ashes and silica fume in **all** environmental classes, provided it is specified in the project specification or a **national standard** is prepared within the area. It may imply a tightening as well as a relaxation of the use of glass filler. Relaxation is given when there are no obstacles to the use of glass filler in all environmental classes. However, in practice it may easily seem a tightening that the use of glass filler has to be specified in every single project specification, because at present there is no national standard for using glass filler in concrete. It will be difficult for the concrete manufacturer to incorporate glass filler in his standard formulas right away, as each project specification will presumably imply different specifications.

Bricks

The use of glass sand and glass powder as addition agents in clay mixtures for red soft mud bricks from two different brick works Hammershøj and Sønderskov was surveyed.

The results primarily show that the effect of using glass sand and glass powder respectively, vary considerably:

- Glass sand bloats up. The effect can be traced as dark irregularities at the visible parts of the tiles when exposed to 975°C. At 1000°C the bloating can be seen with the naked eye.
- The same effect cannot be traced when using glass powder, not even in a microscope.
- The results of weight loss during incineration indicate an increasing development of gases at increasing temperatures. It may explain the bloating of the glass particles.

Likewise, differences in how the two types of clay are affected by the use of glass can be detected, even though they are both red burning. The effect on clay from Hammershøj is, at best, neutral. The effect from glass sand on the clay from Sønderkov is close to neutral, while the effect is generally positive when using glass powder.

The possibility of using glass in the manufacturing of tiles can be estimated as follows:

Glass sand can be used at temperatures below 975°C without any bloating. Therefore, it might be possible to use glass sand in the manufacturing of bricks for inner walls, which are typically burnt at temperatures below 800°C.

The bloating, which appears at high temperatures, may be used for production of a more porous and absorbing material, assuming that a reduction in the strength of the tile can be accepted.

Glass sand can probably be handled as ordinary sand is handled today. If there is a risk of biological activity due to nutrients in the glass material it may, however, be necessary to wash the glass or alternatively to keep it totally dry as long as possible.

The testing of the glass indicates that it is possible to obtain sufficient properties at low burning temperatures when using **glass powder**. It will therefore be possible to lower the burning temperatures by up till 50°C. A low temperature will normally give a more pink material. Even though the testing implies that the addition of glass powder gives a darker colour compared to the reference colour, it is, however, possible to manufacture a pink tile material, which is more dense than normal for pink tiles.

It is also possible to use glass powder for manufacturing bricks for inner walls.

Special handling of glass powder will require special handling at the brick works. The material should be kept dry as long as possible if there is any risk of biological activity due to nutrients in the glass material that may not be totally clean. Transport will probably have to take place in a tanker and storage in a silo.

Road construction

The possible unbound uses of crushed glass in Denmark could be as fill material as sub-base sand or filter gravel.

The use as non-load-bearing **fill material** is estimated not to cause any technical problems. If the glass is sufficiently crushed it can be placed and

compacted satisfactorily, even as a 100 % glass aggregate. For fill purposes demanding a certain bearing capacity, the low CBR value of the glass may be a problem. Mixing with natural aggregate can probably improve the quality.

Based on the laboratory tests carried out it appears that broken glass can meet the Danish requirements for **sub-base materials**. Among others the amount passing the 0.075 mm sieve must be less than 9 %, which can meet the requirements with a good margin. Besides the sand equivalent has to be larger than or equal to 30 %. The test has not been carried out with crushed glass, as it has not been estimated to be relevant due to the low content of fines.

The poor stability of the broken glass may end up being the largest obstacles for using the glass in its pure form. Using broken glass as the lower layer in a two-layer sub-base or a mixture with natural aggregate can be possible solutions to the problem.

It has not been possible to find any foreign references on the use of a 100 % glass aggregate for applications, corresponding to the Danish sub-base. the normal procedure is only to use up to 20-30 % glass aggregate. However, it cannot be excluded that a 100 % use of glass aggregate is technically possible, but evidently it has not been tested.

It might be possible to use broken glass as **filter gravel**, which is used around drains etc. Due to its uniform grain size structure almost without fines, the glass should be very suitable as a drain material. In the literature it is even mentioned quite often that broken glass has a good drainage capacity.

However, studies indicate that the grain size distributions of the two glass fractions are not included in the Danish Road Standards curve limits for filter gravel I. The grain size distributions are generally too coarse-grained and uniform materials. The explanation to this apparent paradox is that a good filter material does not only have to have the ability to drain, but also be able to preserve it, and therefore prevent fines from the surroundings to penetrate and fill up the voids.

Generally speaking it should be noted that the study does not consider the environmental aspects when using broken recoverable glass, which therefore has to be dealt with separately. If the material is estimated to be potentially contaminated it might not be possible to use it for road construction purposes where the material is exposed to water flow, i.e. as filter material, sub-base and non-uncovered fill.

Perspectives of using coloured glass fragments

Pilot studies indicate that it is possible technically to use glass in the manufacture of concrete, tiles, and road constructions. However, to ensure that glass becomes a popular alternative in line with other constituents, which are used in the mentioned building materials, the economic conditions are of vital importance, among others, if the use of broken glass is to succeed

Two possible methods are available: Either the pre-treatment of the glass is reduced to a minimum (e.g. only crush the glass) to allow it to compete with the rather cheap materials such as e.g. natural materials for road filling. Or the glass can be worked up into a more refined product such as glass filler, which implies cleaning and grinding. However, it can then compete with products of

a high quality standard. Table 0.1 shows an estimate on the prices of the products, which can be replaced by glass if occasion should arise.

The market value of glass for free purposes in connection with road construction is compared with the natural materials it can replace in the area of DKK 0-50/ton.

When using glass filler in concrete the glass filler market value will very much depend on whether it is to be used in a manufacturing of white or grey concrete. There are not many suitable filler materials that do not effect the colour of the white concrete. In white concrete the glass filler will compete with e.g. white slag, which costs DKK 600-700/ton. Therefore similar expenses can be accepted for processing the glass. At the moment the quantity of white concrete for construction purposes is rather limited. The concrete manufacturers are also interested in alternative filler materials, which e.g. totally or partly can substitute fly ashes in grey concrete. But the price of fly ashes is rather low compared with the price of white slag. This fact has a large impact when deciding whether it is profitably to manufacture glass filler for the production of grey concrete. Besides, it must be included in the considerations that there are also costs involved for the concrete manufacturer when handling an extra filler material, e.g. extra silo capacity is necessary.

It is difficult to predict the market price for glass sand or glass filler for brick manufacturing, as it does not depend on the price as much as on the materials it will replace. E.g. the price of sand for addition is approx. DKK 45/ton, which is based on the fact that an improved process at the brick works must be obtained. In general, it is difficult to estimate the value of such a process improvement (saving of energy at low burning temperatures etc.), as it very much depends on local conditions at each brick work, incl. the raw materials at their disposal.

Table 0.1 Price estimates FOR the products that broken glass may be able to replace

Concrete	Aggregate e.g. P-stone, 8-16 mm	50-70 DKK/tons
	Filler for white concrete Metakaolin White slag White silica fume	2.000 DKK/ton 600-700 DKK/ton 5.000-6.000 DKK/ton
	Filler for other types of concrete Fly ashes	150 DKK/ton
Tile	Clay mixture Sand Chamotte	45 DKK/m ³ (incl. transport) 150 DKK/ton ¹
	Sintering additive	235 EURO/ton ²
Road construction	Unbound layer Base coarse gravel 0-32 mm Sub-base gravel 0-8 mm Filter gravel 0-8 mm Fill materials	35-50 DKK/ton 10-20 DKK/ton 30-50 DKK/ton 0-30 DKK/ton

1. PRESUPPOSING that manufacturing of chamotte is based on the broken bricks from the brick work, I.E. that the price includes breaking and transport.
2. Sintering additive is not used in Danish tile manufacturing but commercial products are sold e.g. in Germany.

1 Indledning

Baggrundsnotatet *Udvikling og afprøvning af alternative metoder til genanvendelse af farvede glasskår* [1] redegør for, at der i øjeblikket indsamles mere glas i form af glasemballage end hvad der kan genanvendes ved omsmelting til nyt glas i Danmark. Dette er især et problem for farvet glas, hvor der vurderes at være ca. 15.000 tons skår i overskud om året.

Denne situation ligner situationen i en række andre nordeuropæiske lande, hvor der også er overskud af indsamlet, farvet glas (bl.a. pga. import af vin). Mulighederne for at genanvende overskudsmængden af farvede glasskår er enten at eksportere til udlandet, især Sydeuropa, eller genanvende skårene til alternative anvendelser i Danmark.

Der er derfor behov for at finde alternative anvendelser for det indsamlede glas i Danmark. Projektet *Metoder til genanvendelse af farvede glasskår til produktion af tegl og beton og til vejbygning* har til formål at belyse mulighederne for at anvende de farvede glasskår til byggematerialer.

Projektet omfatter både opsamling af udenlandske erfaringer på området (litteraturstudium) og konkrete forsøg under forhold, der er relevante for dansk byggepraksis. Litteraturstudiet og deraf følgende anbefalinger er samlet i en særskilt rapport [2], mens denne rapport sammenfatter resultaterne af pilotforsøgene.

2 Kemisk analyse af glas til pilotforsøg

2.1 Undersøgelse af glassand

2.1.1 Indledning

Der er foretaget bestemmelser af kornform, densitet, kornstørrelsesfordeling og kemisk sammensætning af glassand anvendt til forsøg med teglmaterialer og vejbygningsmaterialer.

2.1.2 Prøvemateriale

Materialet er fremstillet således:

- Udvalgelse af farvet glasmateriale fra Uniscrap, Trige
- Nedknusning i hammermølle og sigtning på 5 mm rist hos NCC, Trige. Dette materiale blev anvendt til forsøg som vejbygningsmateriale
- Yderligere sigtning på 2 og 1 mm trådsigte på laboratorium
- Fraktionen under 1 mm anvendes til nedennævnte undersøgelser og til forsøg med anvendelse i tegl.

2.1.3 Kornstørrelsesfordeling

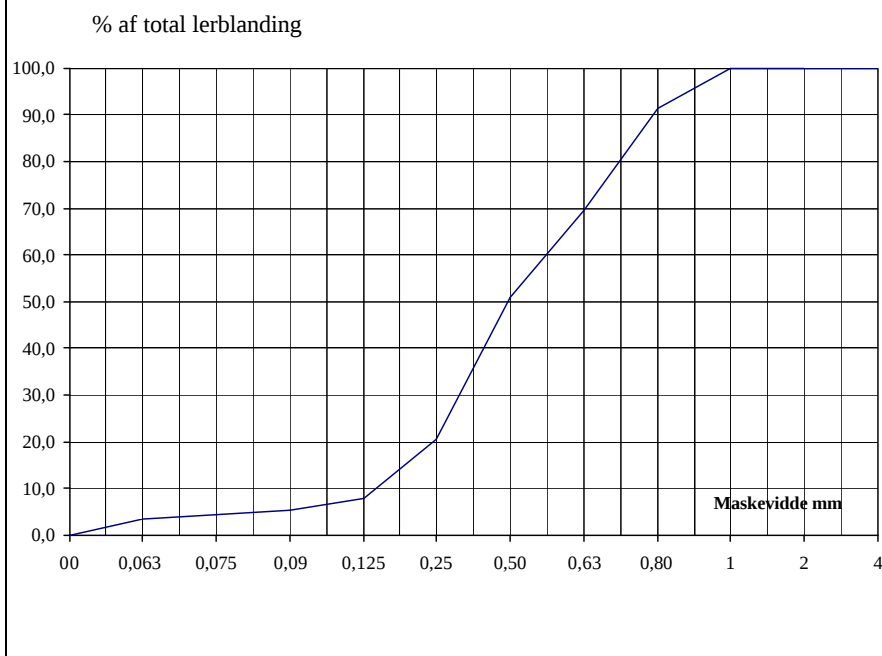
Kornstørrelsesfordelingen for fraktionen under 1 mm blev bestemt ved tørsigtning på sigtesøjle [1].

Resultaterne er vist i Figur 2.1.

Sagsnummer: 3146
 Prøvebeskrivelse: Glassand < 1 mm
 Modtaget :

Kornstørrelsesfordeling i prøve mærket:

Gennemfald på	4	mm	sigte	100,0 vægt %
-	- 2	-	-	100,0 -
-	- 1	-	-	99,8 -
-	- 0,8	-	-	91,5 -
-	- 0,63	-	-	69,6 -
-	- 0,50	-	-	50,8 -
-	- 0,250	-	-	20,6 -
-	- 0,125	-	-	7,8 -
-	- 0,090	-	-	5,4 -
-	- 0,075	-	-	4,3 -
-	- 0,063	-	-	3,5 -



Figur 2.1: Kornstørrelsesfordeling af glassand

2.1.4 Mikroskopi

Glassandet blev undersøgt i stereomikroskop med måleokkular.

Mikroskopibilleder af fraktionen <1 mm ses i Figur 2.2 og Figur 2.3.

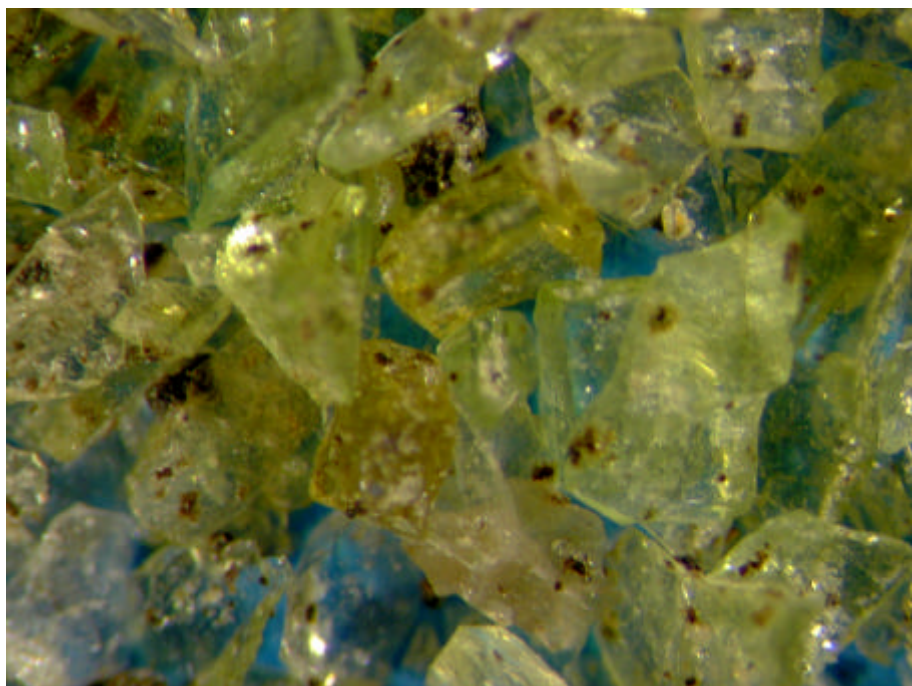
Der ses en del små sorte eller mørkebrune korn. Under mikroskopet kunne det med et spidst stålrødske konstateres, at disse korn var relativt bløde. Det kan evt. være asfaltrester fra knusning af vejmaterialer i hammermøllen.

Mikroskopibilleder af fraktionen 1-2 mm ses i Figur 2.4 og Figur 2.5

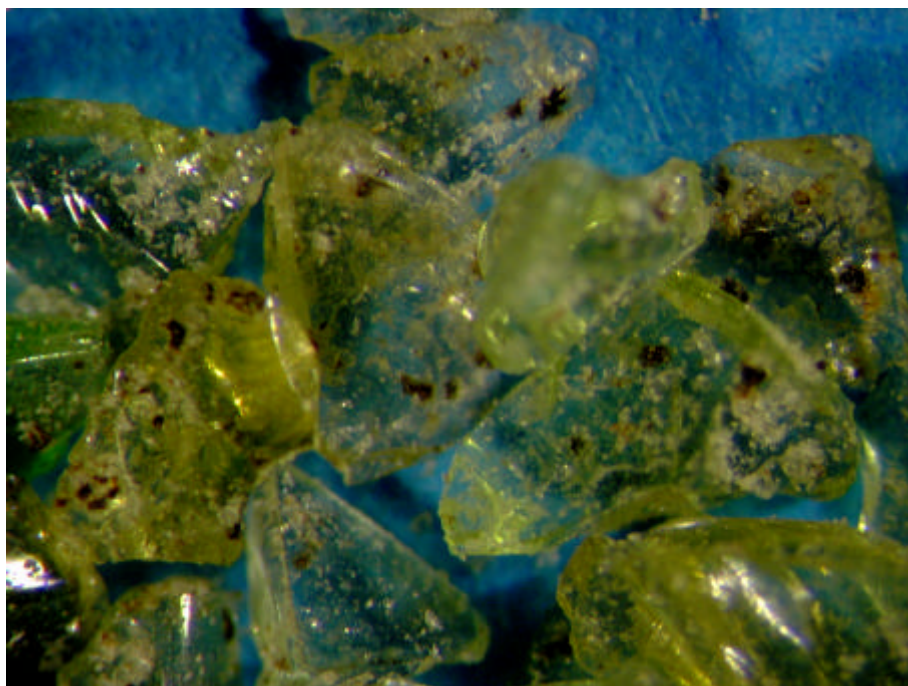
Det ses, at glassandet består af både grønt, brunt og klart glas.



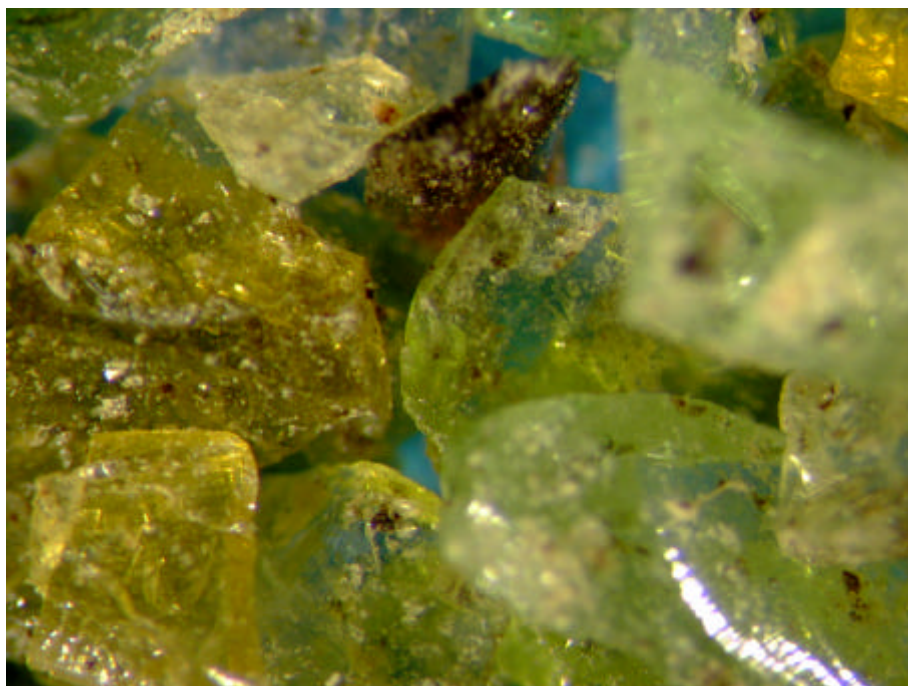
Figur 2.2: Glassand, Fraktion <1 mm. Forstørrelse 24×



Figur 2.3: Glassand, Fraktion <1 mm. Forstørrelse 24×



Figur 2.4: Glassand, Fraktion 1-2 mm. Forstørrelse 24×



Figur 2.5: Glassand, Fraktion 1-2 mm. Forstørrelse 24×

2.1.5 Kemisk sammensætning

Den kemiske sammensætning af glassandet blev bestemt som beskrevet af Teknologisk Institut, Murværks kvalitetshåndbog, afsnit 7.32, se Bilag A.

Resultaterne er vist som oxider i Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kemisk sammensætning af glassand [2]

Siliciumoxid, SiO ₂	68,76
Aluminiumoxid, Al ₂ O ₃	1,87
Jernoxid, Fe ₂ O ₃	0,59
Chromoxid, Cr ₂ O ₃	0,15
Calciumoxid, CaO	10,07
Magnesiumoxid, MgO	1,36
Natriumoxid, Na ₂ O	12,23
Kaliumoxid, K ₂ O	0,66
Titanoxid, TiO ₂	<0,003
Bariumoxid, BaO	0,07

2.2 Undersøgelse af glasmel

2.2.1 Prøvematerialer

Der er foretaget bestemmelse af kornform, kornstørrelsesfordeling, densitet og kemisk sammensætning af 4 prøver af glasmel formålet af Aalborg Portland på laboratoriemøller.

Fra Aalborg Portland er følgende 4 prøver af formålet glas modtaget 12/5-2003:

- Materiale A: Prøve 0675990, klar, Blaine 350 m²/kg
- Materiale B: Prøve 0675988, grøn, Blaine 350 m²/kg
- Materiale C: Prøve 0675991, klar, Blaine 500 m²/kg
- Materiale D: Prøve 0675989, grøn, Blaine 500 m²/kg

2.2.2 Densitet

Materialernes densitet blev bestemt efter BS 4550 [3]. Resultaterne er vist i Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Densitet på glasmel (kg/m³)

A	2461
B	2484
C	2459
D	2515

2.2.3 Kornstørrelsesfordeling

Kornstørrelsesfordelingerne blev bestemt med Sedigraph [4]. Prøvematerialerne blev ikke sigtet på forhånd. Resultaterne er vist i Bilag B.

Efter bestemmelse af materialernes kornstørrelsesfordeling blev materiale D valgt til videre forsøg i tegl, se afsnit 4. Dette er valgt, da materiale D er det materiale, der ligger længst fra glassandet mht. kornstørrelsesfordeling, og derved opnås den største bredde i de gennemførte forsøg.

Karakteristiske tal er desuden vist i Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Karakteristiske tal fra kornstørrelsesfordeling bestemt med Sedigraph

Prøve	Median $\mu\text{ m}$	Top af frekvenskurve $\mu\text{ m}$	Andel > 20 $\mu\text{ m}$ (Vægt%)
A (2 bestemmelser)	19,27	33	48,8
	19,75	33	49,6
B (2 bestemmelser)	20,87	40	51,4
	19,96	40	49,9
C	13,23	23	36,1
D	12,25	23	33,9

2.2.4 Mikroskopi

Materialerne blev undersøgt med polarisationsmikroskop, efter først at være rørt op i propylenglycol.

Mikroskopibilleder ses i Bilag C. Der ses relativt store korn på op til 0,1 mm, og mange meget mindre korn. Kornene har en flad og skarpkantet struktur.

Med krydsede nicoller kunne det konstateres, at stort set alt materiale var optisk isotropt og altså må være glas.

2.2.5 Kemisk sammensætning

Den kemiske sammensætning blev for materialerne A og D bestemt som beskrevet i Bilag A. Resultaterne er vist som oxider i Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Kemisk sammensætning [2].

	Prøve A klar	Prøve D grøn
Siliciumoxid, SiO_2	68,65	66,72
Aluminiumoxid, Al_2O_3	0,66	1,48
Jernoxid, Fe_2O_3	0,19	0,41
Chromoxid, Cr_2O_3	0,011	0,19
Calciumoxid, CaO	8,34	10,87
Magnesiumoxid, MgO	4,11	0,84
Natriumoxid, Na_2O	13,01	13,09
Kaliumoxid, K_2O	0,24	0,48
Titanoxid, TiO_2	<0,003	<0,03
Bariumoxid, BaO	0,01	0,03

3 Glas som fillermateriale i beton

Knust glas kan genanvendes i beton, både som tilslag og som filler.

Det største potentiale vurderes imidlertid at være til stede ved anvendelse af glas som fillermateriale. Dette har to årsager. For det første er det som fillermateriale, at der kan afsættes de største mængder, fordi der af hensyn til betonens holdbarhed, styrke mm. vil være nogle restriktioner ved brug af glas som tilslag. For det andet er det som fillermateriale, at glasset mht. pris vil være mest konkurrencedygtigt. Sidstnævnte gælder især som filler til hvid beton, hvor alternative fillermaterialer som hvid mikrosilica og hvid slagge både er dyre og svære at skaffe.

Det er derfor valgt at udføre pilotforsøg med anvendelse af glas som fillermateriale i beton, hvor glasset er formalet til cementfinhed.

3.1 Forsøgsprogram

Forsøgsprogrammet er inddelt i forskellige faser:

- *Forsøg med formaling af glas.* Disse forsøg er foretaget for dels at kunne vurdere nogle af fillerens fysiske egenskaber (primært kornkurven), dels for at kunne vurdere energiforbruget og dermed omkostningen ved at formale glasset til filler.
- *Indledende forsøg med pasta og mørtler.* Ved disse forsøg vurderes glasfillerens indflydelse på styrke, vandbehov og afbindingstid samt om glasfilleren vil gøre betonen mere eller mindre udsat for skadelige alkali/kisel-reaktioner. Resultaterne af mørtelforsøgene benyttes desuden til at vælge en konkret glastype samt formalingsgrad af glasset til betonforsøg.
- *Betonforsøg.* Der udføres parallelforsøg med en konventionel beton, der indeholder flyveaske, og en tilsvarende beton, hvor flyveasken er erstattet af glasfiller. Ved disse forsøg undersøges den friske betons egenskaber (bearbejdelse, luftindhold mm.), den hærtnende betons egenskaber (varme- og styrkeudvikling) samt den hærtnede betons holdbarhed.
- *Måling af farveændringer ved anvendelse af glasfiller i hvid beton.* Det er altafgørende for anvendelsen af glasfiller i hvid beton og i beton med lyse nuancer i det hele taget, at fillerens betydning for det visuelle indtryk af betonen er kendt. Derfor undersøges glasfillerens betydning for betonens farve specifikt.

Alle forsøgsfaser på nær betonforsøgene er udført med såvel grønt som klart glas. Der er udført forsøg med glas, der er formalet til finheder på henholdsvis 350 m²/kg og 500 m²/kg (Blaine-værdier). Generelt gennem projektet er der anvendt følgende benævnelser af prøveemner:

- *REF:* Referenceprøve uden glasfiller
- *G350:* Prøveemne med glasfiller af grønt glas formalet til en finhed på 350 m²/kg.

- *G500*: Prøveemne med glasfiller af grønt glas formalet til en finhed på 500 m²/kg.
- *K350*: Prøveemne med glasfiller af klart glas formalet til en finhed på 350 m²/kg.
- *K500*: Prøveemne med glasfiller af klart glas formalet til en finhed på 500 m²/kg.

De forskellige fillere er vist på Figur 3.1. Det er dog svært ud fra dette billede at se nogen forskel på pulverne.



Figur 3.1: De fem glasfillere K350, K500, G500 og G350 samt Aalborg White[®] cement

3.2 Formaling af glas

Glas til pilotforsøg er formalet på laboratiemøller hos Aalborg Portland, der normalt anvendes til formaling af cementklinker.

For såvel grønt som klart glas er der sket en formaling til to forskellige finheder, idet der er sigtet efter finheder på henholdsvis 350 og 500 m²/kg (Blaine-værdier). De resulterende kornkurver ses i Bilag B, og mikroskopibilleder fremgår af Bilag C.

Ved formalingen er der registreret et effektforbrug for laboratiemøllerne, der svarer til, at det ca. vil kræve 45 kWh at formale 1 tons glas (lidt mindre ved formaling til 350 m²/kg, lidt mere ved formaling til 500 m²/kg). Dette svarer til effektforbruget ved formaling af cementklinker.

3.3 Indledende forsøg med pasta og mørtler

Mørtel er i princippet en meget simpel beton, der kun består af sand, vand og cement samt eventuelt andet pulver, hvor traditionel beton er et mere

komplekst materiale. Pasta er endnu simplere, idet den kun består af pulver og vand.

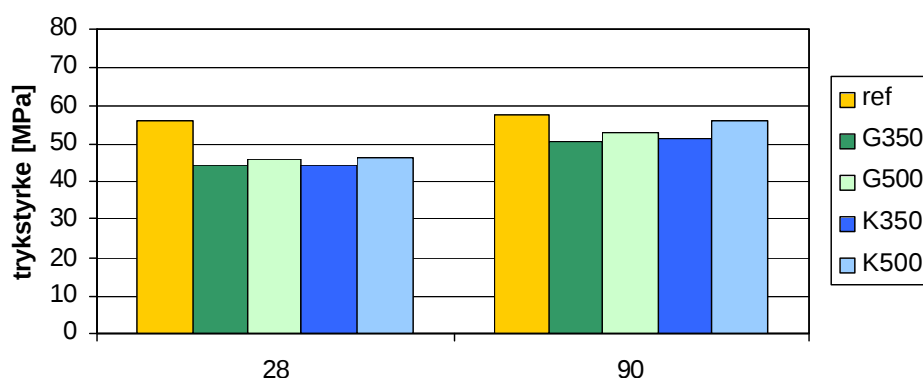
Resultater fra forsøg med mørtel kan ikke direkte overføres til beton, men for fx glasfiller-materialer vil de indikere en række egenskaber, der vil kunne genfindes, når fillerne blandes i beton. Mørtelforsøgene er imidlertid nemmere og billigere at udføre end tilsvarende forsøg med beton, og derfor egner de sig godt til at screene et større antal fillermaterialer.

Mørtlerne med glasfiller i dette projekt er sammensat på samme måde som de mørtler, der benyttes til at teste flyveaske, jf. DS/EN 450 [1], idet flyveasken blot erstattes med glas. Det betyder, at pulverkombinationen består af 75% cement og 25% glasfiller, forholdet mellem vand og pulver er 1:2 og forholdet mellem pulver og sand er 1:3, se desuden Bilag D. Samme pulverkombination er anvendt i pasta.

Ved de indledende forsøg med pasta og mørtler er der målt styrkeudvikling, vandbehov og begyndende afbindingstid. Der er desuden målt alkali/kisel-ekspansion for mørtelprismer med glasfiller.

3.3.1 Styrkeudvikling

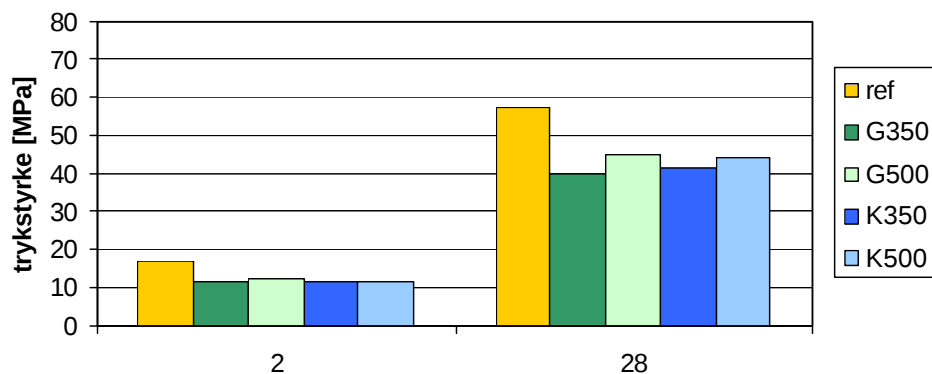
Mørtlernes styrkeudvikling er registreret for mørtler med tre forskellige typer cement: Norsk Industricement, der benyttes som referencecement ved test af flyveaske, samt Aalborg White[®] cement og Lavalkali Sulfatbestandig cement fra Aalborg Portland, der er to danske cementtyper. Resultaterne fremgår af Figur 3.2, Figur 3.3 og Figur 3.4.



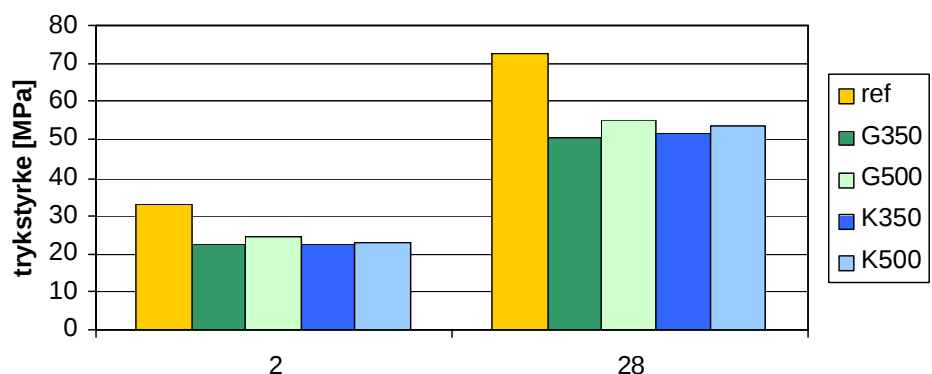
Figur 3.2: Styrkeudvikling for mørtel af Norsk Industricement og forskellige glasfillere (28 og 90 døgn).

Styrken for mørtler med Norsk Industricement er målt henholdsvis 28 og 90 døgn efter støbning. Ved 28 døgn udgør styrken af mørtler med glasfiller 79-82% af styrken for en referencemørtel uden glasfiller (100% cement). Ved 90 døgn har mørtel med glasfiller en styrke på 87-97% af referencemørtlens styrke.

For flyveaske er kravet, at styrken efter 28 og 90 døgn ikke må være mindre end henholdsvis 75% og 85% af referencemørtlens styrke. De forskellige glasfillere ses alle at opfylde dette krav.



Figur 3.3: Styrkeudvikling for mørtel af Lavalkali Sulfatbestandig cement og forskellige glasfillere (2 og 28 døgn).



Figur 3.4: Styrkeudvikling for mørtel af Aalborg White® cement og forskellige glasfillere (2 og 28 døgn).

For mørtel med Lavalkali Sulfatbestandig cement og glasfiller er styrken efter 2 døgn på 67-72% af styrken for mørtel med ren cement. Efter 28 døgn er styrken i forhold til den rene cementmørtel steget lidt til 70-78%. For mørtel med Aalborg White® cement og glasfiller er de tilsvarende tal 69-76% og 70-76%.

For alle tre cementtyper ses der en tendens til, at der opnås lidt højere styrker ved den fine formaling på 500 m²/kg end ved formalingen til 350 m²/kg. Der ses ikke nogen forskel afhængigt af glassets farve.

3.3.2 Vandbehov og tid til begyndende afbinding

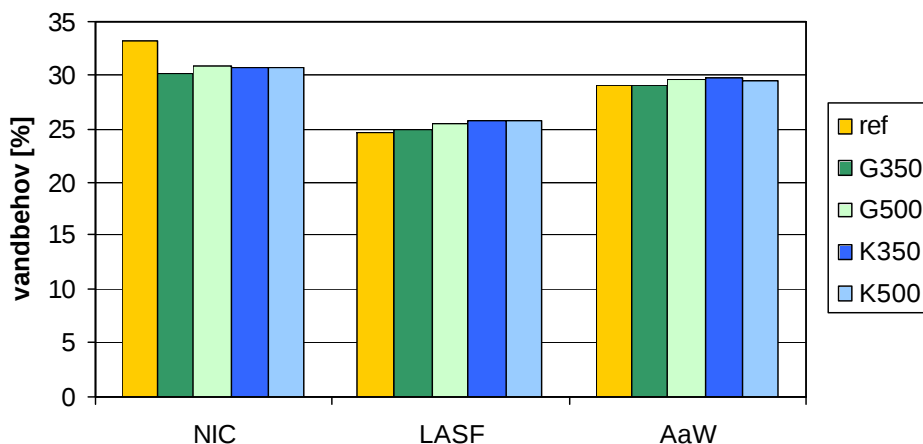
Vandbehovet og det tidspunkt, hvor afbindingen sætter ind, måles vha. metoden beskrevet i DS/EN 196-3 [2]. Denne metode er udviklet til afprøvning af cement. I nærværende forsøg er cementen afløst af en pulverkombination af 75% cement og 25% glas.

Først blandes pulveret med en given mængde vand, og pastaens konsistens registreres (målt som nedsynkningen af et stempel). Dette gentages med mere eller mindre vand, indtil pastaen har en på forhånd defineret standard-konsistens. Den mængde vand i forhold til pulverbemængden, der lige netop giver pastaen den ønskede standard-konsistens, kaldes vandbehovet. Vandbehovet udtrykker således noget om, hvordan glasfilleren påvirker betons bearbejdelse. Hvis vandbehovet er stort, vil glasfilleren forringe bearbejdelsen, mens et lavt vandbehov er til gavn for bearbejdelsen.

Når der er opnået en pasta med standard-konsistens, anvendes denne til forsøg med afbindingstid. Med passende mellemrum (dvs. mindst hvert 10.

minut) stikkes en nål i pastaen, og modstanden måles. På et tidspunkt begynder modstanden at stige som tegn på, at afbindingen er begyndt. Definitionen på det præcise tidspunkt for begyndende afbinding er det tidspunkt, der svarer til en bestemt modstand.

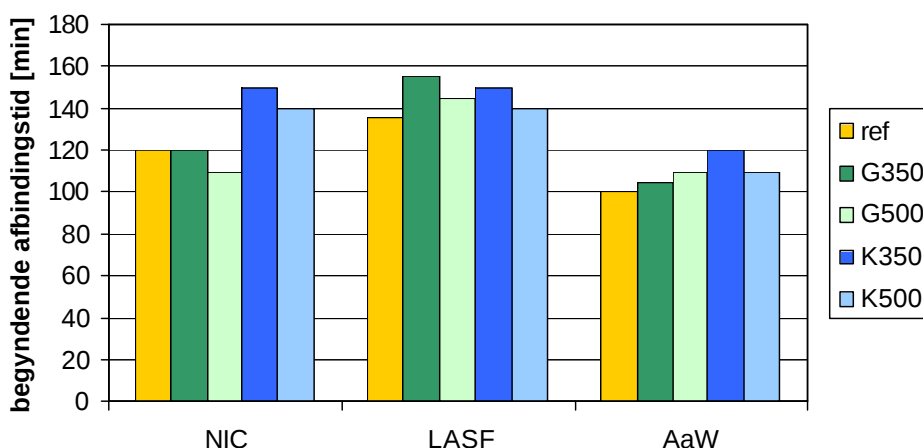
Vandbehov og begyndende afbindingstid er målt ved anvendelse af tre forskellige cementtyper, se Figur 3.5 og Figur 3.6.



Figur 3.5: Målt vandbehov jf DS/EN 196-3. Forkortelser: NIC – Norsk Industricement; LASF – Lavalkali Sulfatbestandig cement; AaW – Aalborg White® cement.

Det ses, at der ikke er noget entydigt billede, men derimod en afhængighed af hvilken type cement, glasfilleren sammenlignes med. Ved anvendelse af en cement med højt vandbehov som fx Norsk Industricement, fås et lidt lavere vandbehov, når en del af cementen erstattes med glasfiller. Anvendes der derimod en cement med lavt vandbehov som fx Lavalkali Sulfatbestandig cement fra Aalborg Portland, øger glasfilleren vandbehovet.

Det kan således konkluderes, at de fire testede glasfillere nogenlunde bidrager til vandbehovet som en gennemsnitlig cement. Der ses ikke nogen signifikante forskelle mellem de forskellige glasfillere, hverken mht. farve eller finhed.



Figur 3.6: Begyndende afbindingstid jf DS/EN 196-3. Forkortelser: NIC – Norsk Industricement; LASF – Lavalkali Sulfatbestandig cement; AaW – Aalborg White® cement.

Mht. afbindingstid ses det, at tilsætningen af glasfiller i stort set alle tilfælde forlænger tiden til afbindingen begynder. Der er tale om forlængelser, der typisk er i størrelsesordenen 10-20 minutter.

Ved brug af Norsk Industricement og Aalborg White[®] cement ser det ud til, at det især er det klare glas, der forlænger afbindingstiden. Ved brug af Lavalkali Sulfatbestandig cement, der i sig selv har en lidt længere afbindingstid end de øvrige cements, ses der dog ikke nogen effekt af glassets farve. I fem ud af seks tilfælde er afbindingstiden længere ved brug af filler med finhed 350 m²/kg end ved brug af filler med finhed 500 m²/kg.

3.3.3 Alkali/kisel-reaktivitet

Som beskrevet i litteraturstudiet [3], er skadelige alkali/kisel-reaktioner et emne, der bør undersøges, før en eventuel glasfiller anvendes til betonproduktion.

Når kisel (amorf SiO₂) kommer i kontakt med en alkali-holdig væske, sker der en kemisk reaktion. Reaktionsproduktet er en hygroskopisk gel, der tiltrækker vand og derfor sveller. Hvis reaktionen finder sted i beton, vil alkali/kisel-gelen opbygge et tryk på det omgivende materiale, der kan få betonen til at revne.

Alkali stammer enten fra betonens delmaterialer (bl.a. cementen) eller trænger ind i betonen fra det omgivende miljø (fx fra havvand og tøm-salte). Kisel findes i forskellige sand- og stenmaterialer. I princippet er det tilstrækkeligt at sikre ét af to, nemlig at der enten ikke er tilstrækkeligt alkali eller tilstrækkeligt kisel til at alkali/kisel-reaktionerne kan få et skadeligt omfang. I DS 481 [4] stilles der dog for beton til fugtigt miljø både krav om, at der er et begrænset alkali-indhold og at tilslagsmaterialerne ikke er alkali-reaktive.

Grunden til, at alkali/kisel-reaktioner særligt bør undersøges for materialer af glas, er, at hovedbestanddelen i glas er amorf SiO₂, men samtidigt har glasset et højt indhold af alkali (15-20%), så her tilsættes de to uønskede komponenter samtidigt, og alkali/kisel-reaktioner er derfor uundgåelige. Det, der herefter afgør, om reaktionerne rent faktisk fører til skader i betonen, er glassets partikelstørrelse.

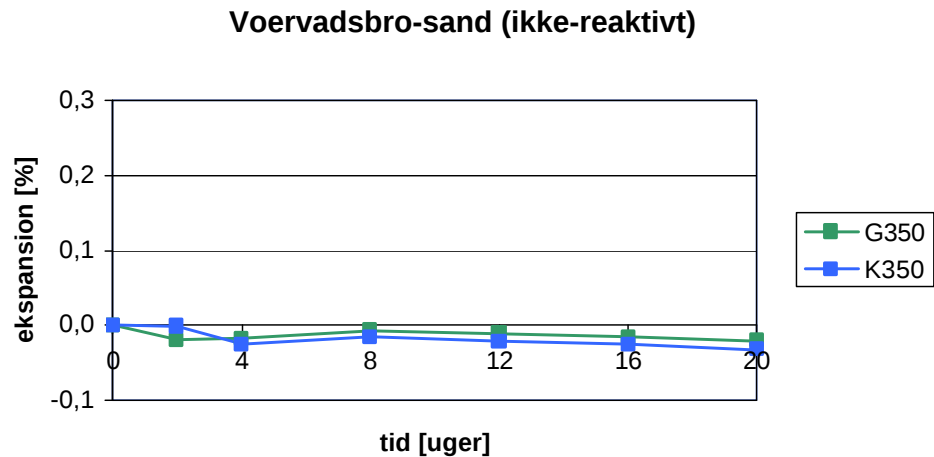
For meget små partikler vil en stor del af kisen blive omdannet til gel, fordi den specifikke overflade er stor og der derfor er en stor flade med kontakt til en alkali-holdig porevæske, hvor reaktionerne kan foregå. Men selvom der dannes meget gel, vil den være jævnt fordelt i form af meget små ansamlinger i betonens faststofstruktur. Mens større ansamlinger lokalt kan give anledning til tryk, der overstiger betonens styrke, vil de små ansamlinger hver for sig ikke være i stand til at opbygge et skadeligt tryk. På den måde kan tilsætningen af meget små, reaktive partikler faktisk være en fordel, fordi de så at sige forbruger alkali, før det kan komme til at reagere med større partikler, og dermed forebygger skadesudvikling, hvis fx sandpartiklerne er reaktive. Det samme gør sig gældende ved anvendelsen af mikrosilica i beton.

I nærværende projekt er der udført to serier af mørtelforsøg i henhold til metoden DS 405.15 [5]. I begge tilfælde erstattes 25% af cementen med glasfiller.

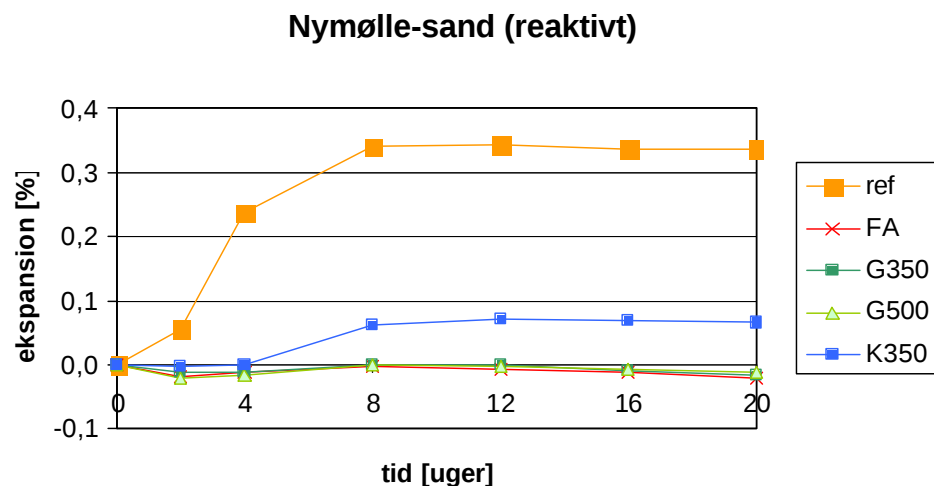
I den første serie er glasfilleren afprøvet sammen med ikke-reaktivt sand for at undersøge, om glasset i sig selv kan give anledning til skadelige reaktioner. Det er valgt at gennemføre forsøgene med de to groveste fillere (finhed 350 m²/kg), for hvis disse to fillere ikke giver anledning til problemer, forventes der heller ikke at opstå problemer med skadelige reaktioner ved anvendelse af endnu finere glaspartikler.

I den anden forsøgsserie er glasset afprøvet sammen med et reaktivt sand for at undersøge, om glasfilleren ligefrem kan forebygge skadelige alkali-kiselreaktioner. I denne forsøgsserie indgår der også prøveemner, hvor 25% af cementen er erstattet af flyveaske, idet flyveaske netop er kendt for at kunne have en sådan positiv effekt. Prøveemnerne med flyveaske er mærket FA.

Resultaterne fra de to forsøgsserier er gengivet i Figur 3.7 og Figur 3.8.



Figur 3.7: Alkali/kisel-ekspansion målt for prøveemner med ikke-reaktivt sand (Voervadsbro-sand).



Figur 3.8: Alkali/kisel-ekspansion målt for prøveemner med reaktivt sand (Nymølle-sand).

Det ses af Figur 3.7, at selv ikke ved så store mængder som 25% af pulveret giver glasfilleren anledning til nævneværdig ekspansion. I DS 481 [4] tillades der ved tilsvarende forsøg med sand, der skal godkendes til ekstra aggressivt miljø, en ekspansion på 0,1% i løbet af 20 uger.

I Figur 3.8 ses det, at Nymølle-sandet er meget reaktivt, idet ekspansionen af referenceprismerne overstiger 0,1% efter mindre end 4 ugers forsøg. De afprøvede glasfillere formår imidlertid at holde skadesudviklingen i skak på samme vis som flyveaske og mikrosilica. Glassets farve eller formaling er tilsyneladende ikke afgørende.

3.4 Betonforsøg

Det er undersøgt, om glasfiller ændrer på forskellige væsentlige betonegenskaber så som bearbejdelighed, styrke mm. Undersøgelserne er forløbet som parallelprøvning, hvor der er blandet en referencebeton med flyveaske og en beton, der svarer til referencebetonen, men hvor flyveasken er erstattet af G350 glasfiller kg til kg.

Som referencebeton er valgt en beton til aggressiv miljøklasse med en karakteristisk styrke på 35 MPa. G350 er valgt som glasfiller til betonforsøgene, fordi ingen af de foregående forsøg med mørtel har tydet på store forskelle afhængigt af glassets farve og af om det er formålet til 350 eller 500 m²/kg. Det er derfor oplagt dels at bruge den farve glas, der er størst interesse i at få nyttiggjort i beton, samt at anvende den formalingsgrad, der kræver det mindste energiforbrug.

De to betoner benævnes henholdsvis *Beton-ref* og *Beton-G350*. Recepterne for de to betoner fremgår af Bilag D. Rådata fra betonforsøgene fremgår af Bilag E.

3.4.1 Friskbetonegenskaber

Begge betontyper er blandet to gange, så nedenstående observationer af den friske betons egenskaber er gennemsnittet for de to blandinger, se Tabel 3.1.

Tabel 3.1: Friskbetonegenskaber.

	Beton-ref	Beton-G350
sætmål, mm	145	155
densitet, kg/m ³	2249	2201
luftindhold ¹ , volumen%	6,8	9,2

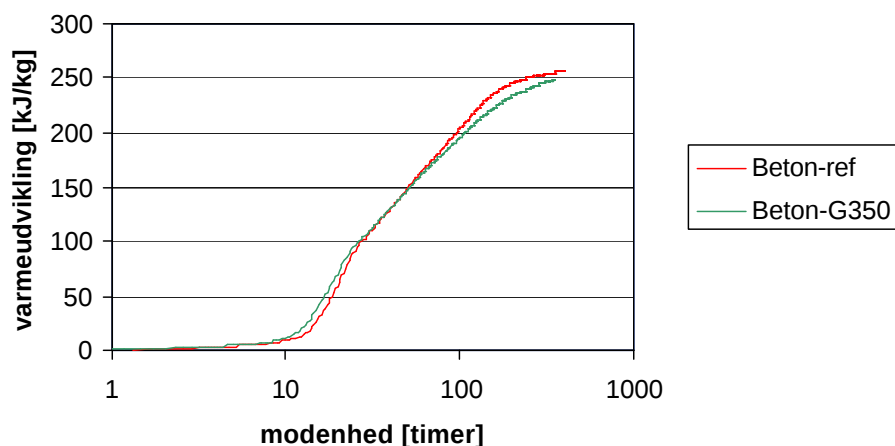
¹ Luftindholdet er beregnet på baggrund af den målte densitet og receptdata.

Det ses, at beton med glasfiller har en lidt bedre bearbejdelighed (målt som sætmål) end beton med flyveaske. Dette skyldes muligvis, at beton med glasfiller også har et højere luftindhold end beton med flyveaske. En forklaring på dette kan være, at luftindblandingsmidlet virker mere effektivt i beton med glasfiller, fordi der ikke er kulrester til stede, der stammer fra flyveasken.

Ved udstøbning af beton til prøveemner til de øvrige undersøgelser, blev det vurderet, at beton med glasfiller bevarede konsistensen længere, mens beton med flyveaske hurtigere tabte bearbejdeligheden. Der er imidlertid ikke foretaget målinger af sætmålstab som funktion af tid.

3.4.2 Varmeudvikling

Resultaterne for varmeudvikling fremgår af Figur 3.9 og Tabel 3.2.



Figur 3.9: Målt varmeudvikling (kJ pr. kg pulver i blandingen).

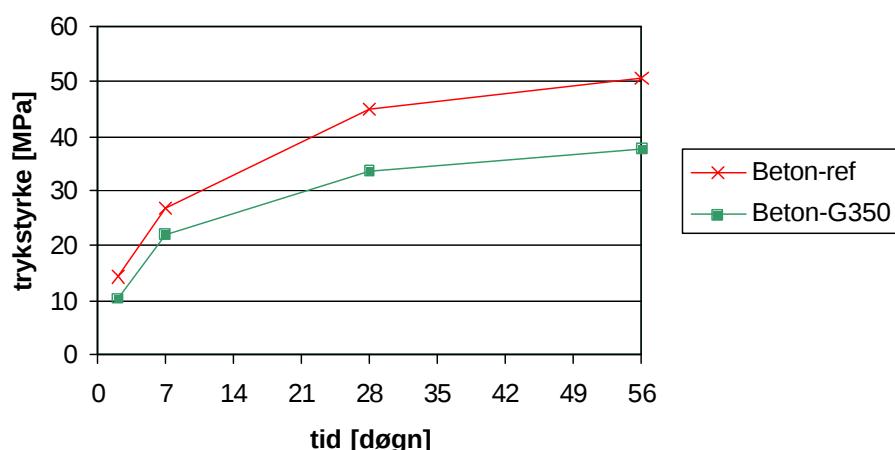
Tabel 3.2: Parametre bestemt ved varmeudvikling.

	Beton-ref	Beton-G350
Q_{∞} - cement, kJ/kg	347,1	349,5
Q_{∞} - pulver, kJ/kg	277,5	279,4
α	1,05	0,89
τ_0 , timer	11,93	9,77

Varmeudviklingen er næsten identisk for de to typer beton, både med hensyn til den totale varmeudvikling Q_{∞} samt de to parametre α og τ_0 , der henholdsvis siger noget om, hvor hurtigt varmeudviklingen forløber, og hvornår betonen begynder at udvikle varme. Man skal derfor være forsigtig med overfortolkning. Det ser dog ud til, at varmeudviklingen starter en anelse tidligere for beton med glasfiller (muligvis pga. alkaliaktivering), men at varmeudviklingen til gengæld forløber lidt langsommere. Det sidste gør, at der må forventes en lidt langsommere styrkeudvikling for beton med glasfiller.

3.4.3 Styrkeudvikling

Betonens styrke er målt til fire terminer (2, 7, 28 og 56 døgn), se Figur 3.10.



Figur 3.10: Styrkeudvikling.

Det ses, at beton med glasfiller har en lidt lavere styrke end beton med flyveaske. Dette kan til dels forklares med, at beton med glasfiller har et luftindhold, der er 1-2% højere end luftindholdet i referencebetonen (dette ses

af målinger af den friske betons luftindhold samt analyse af luftporestrukturen i den hærdnede beton). Som tommelfingerregel nedsætter hver % luft styrken med ca. 4%, og det må derfor forventes, at beton med glasfiller har 4-8% lavere styrke.

Forskel i luftindhold kan dog ikke forklare hele forskellen på de målte styrker, og det ser således ud til, at beton med glasfiller har en lavere styrke end beton med flyveaske.

3.4.4 Chloridmodstand

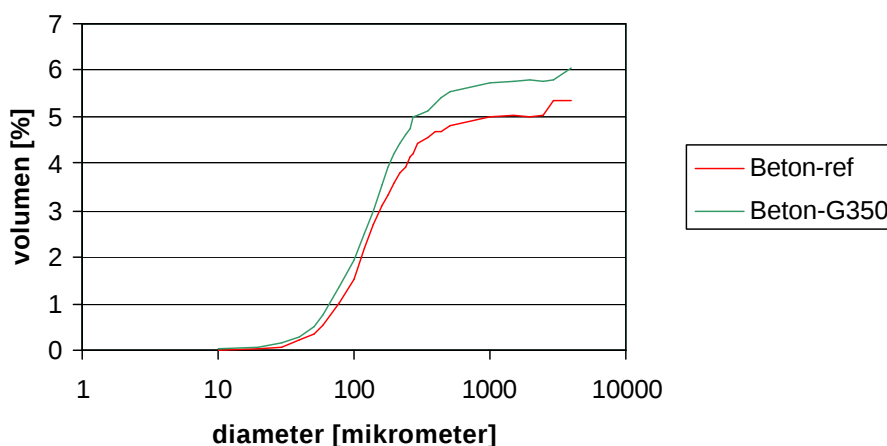
Chloridmodstanden er bestemt som chloridmigrationskoefficient jf. NT BUILD 492, dog er chloridmodstanden bestemt 44 døgn efter støbning, hvor der normalt anvendes en prøvningstermin på 28 døgn. Dette har dog ingen betydning for sammenligningen af resultater.

Beton-ref har en chloridmigrationskoefficient på $3,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, mens Beton-G350 har en chloridmigrationskoefficient på $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. De lave koefficienter viser, at begge typer beton har god chloridmodstand. Det kan se ud til, at glasset forbedrer chloridmodstanden en anelse. Det er dog problematisk at drage nogen konklusion ved sammenligning af tal, der under alle omstændigheder er meget små.

3.4.5 Frostbestandighed

Frostbestandigheden kan dels vurderes på baggrund af en analyse af den hærdnede betons luftporestruktur, dels ved direkte at måle skadesudviklingen i form af afskalning ved en accelereret test.

Resultaterne af luftporeanalysen fremgår af Figur 3.11 og Tabel 3.3.

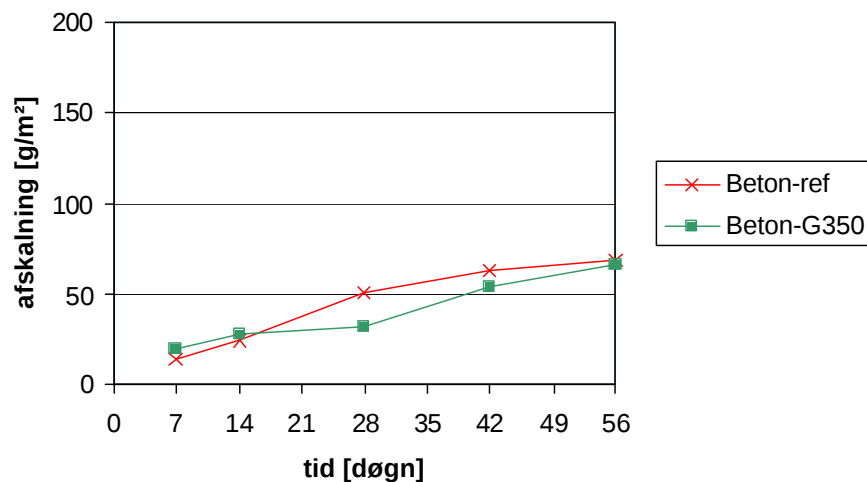


Figur 3.11: Luftporefordeling, jf. DS/EN 480-11.

Tabel 3.3: Parametre bestemt ved luftporeanalyse jf DS/EN 480-11.

	Beton-ref	Beton-G350
Totalt luftindhold, vol. %	5,6	6,4
Specifik overflade, mm^{-1}	51	55
Afstandsfaktor, mm	0,09	0,08
Mikroluftindhold, vol. %	4,5	5,0

Begge typer beton har meget tilfredsstillende luftporestrukturer. I DS 481 er der krav om, at afstandsfaktoren ikke må overstige 0,20 mm. Begge typer beton opfylder dette krav, og det viser sig også, at begge typer beton klarer sig godt i en accelereret frosttest, se Figur 3.12.



Figur 3.12: Resultat af accelereret frosttest jf. SS 13 72 44.

Iflg. DS 481 skal beton til aggressivt miljø have god frostbestandighed, hvilket betyder, at betonen i den accelererede frosttest

- enten skal have en akkumuleret afskalning efter 56 døgn, der er mindre end $0,20 \text{ kg/m}^2$
- eller skal have en akkumuleret afskalning efter 56 døgn, der er mindre end $0,50 \text{ kg/m}^2$ samtidigt med at afskalningen efter 56 døgn er mindre end det dobbelte af afskalningen efter 28 døgn ($m_{56}/m_{28} < 2$).

Afskalningen for både Beton-ref og Beton-G350 er stort set negligerbar, og begge typer beton lever op til DS 481s krav.

3.5 Måling af farveændringer ved anvendelse af glasfiller

Aalborg Portland har udviklet en standardiseret procedure for måling af betons farve. Her udstøbes tre betonfliser for hver prøve, og farven måles umiddelbart efter afformning (dvs. dagen efter støbning) samt 14 og 28 døgn efter støbning. Ved farvemålingen anvendes en robot, der har en lyskilde og en farvescanner påmonteret. Målingerne opsamles og bearbejdes af en computer. Opstillingen er vist på Figur 3.13 og skal blot give læseren en fornemmelse af, hvordan farvemålingsudstyret ser ud.

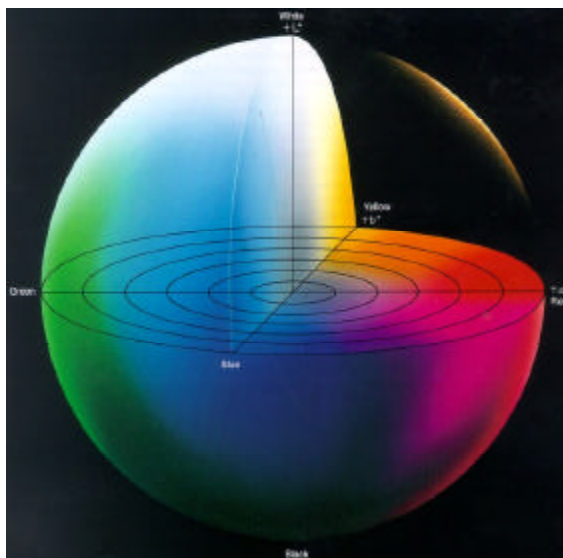


Figur 3.13: Farvemåler, Aalborg Portland.

Resultaterne præsenteres i form af tre forskellige værdier:

- *Hunter L* udtrykker fladens refleksion. En L-værdi på 100 svarer til en helt hvid flade, mens en L-værdi på 0 svarer til en helt sort flade.
- *Hunter a* udtrykker fladens rød/grøn-balance. Positive værdier angiver en rød toning, mens negative værdier angiver en grøn toning.
- *Hunter b* udtrykker fladens gul/blå-balance. Positive værdier angiver en gul toning, mens negative værdier angiver en blå toning.

Se desuden Figur 3.14.

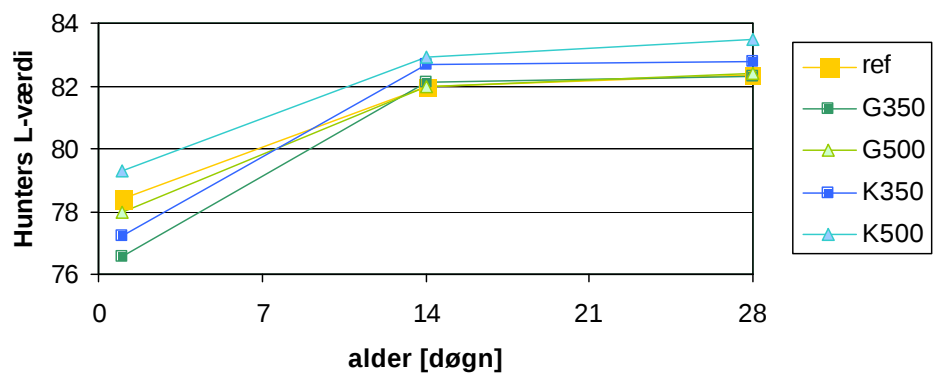


Figur 3.14: Hunters farvepræsentation.

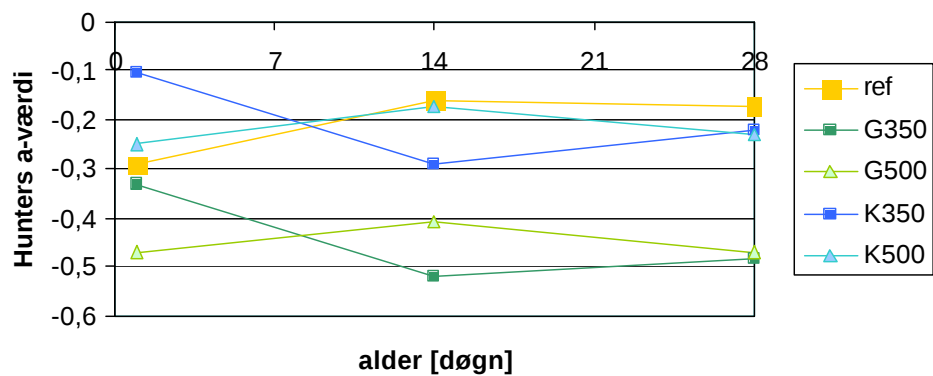
Som tommelfingerregel er farvedifferencer synlige, når

- Hunter L-værdier afviger 1,0 eller mere (i området 75-85)
- Hunter a-værdier afviger 0,2 eller mere (i området -1 til 1)
- Hunter b-værdier afviger mere end 0,5 (i området 0 til 6)

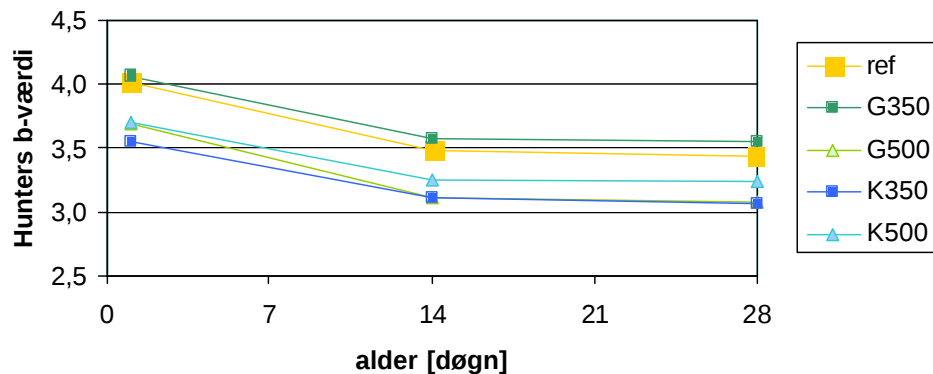
Resultaterne for de aktuelle farvemålinger, hvor 10% af den hvide cement i den oprindelige recept er udskiftet med glasfiller, er vist i Figur 3.15, Figur 3.16 og Figur 3.17.



Figur 3.15: Målinger af refleksion.



Figur 3.16: Målinger af rød/grøn-balance.



Figur 3.17: Målinger af gul/blå-balance.

Det ses, at refleksionen stiger, når betonen bliver ældre. Refleksionen for beton med grøn glasfiller er helt på linie med refleksionen for referencen, hvorimod refleksionen for beton med filler fremstillet af klart glas er lidt højere. Differencen ved de sene terminer er på grænsen til det synlige.

Ikke overraskende forskyder det grønne glas den rød/grønne balance. Forskellen i forhold til beton med klart glas og referencen uden glas er i størrelsesordenen 0,2 til 0,3 og vil sandsynligvis kunne skelnes med det blotte øje, hvis to prøver holdes op mod hinanden.

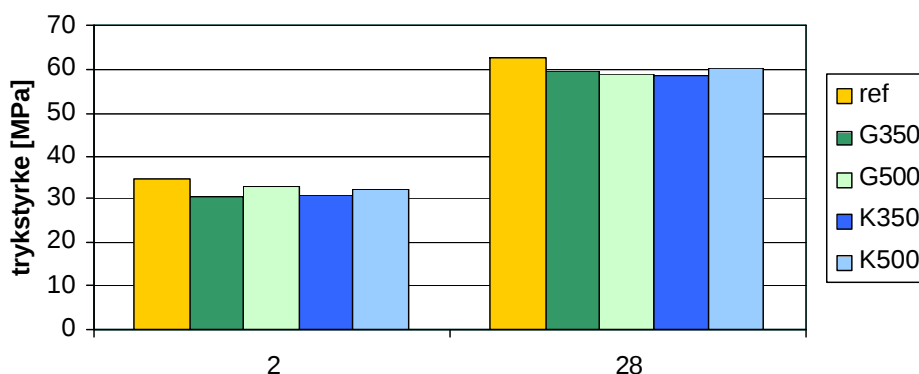
Alle betonerne har en gul nuance, men ved anvendelse af glas bliver tonen en anelse mere blå. Forskellene målt med Hunters b-værdi er dog mindre end 0,5 og vil derfor sandsynligvis ikke være synlig.

Farveindtrykket af hvid beton afhænger af en række faktorer, så som anvendte tilslagsmaterialer, additiver, udstøbningsmetoder mm. På baggrund af de foretagne farvemålinger vurderes glasfilleren ikke at influere væsentligt på den endelige farve.

Generelt vurderes det, at de anvendte glastyper og størrelsesfraktioner alle kan anvendes til fremstilling af hvid beton, uden det går ud over farveindtrykket, og ændringerne er således acceptable. Tilsvarende farveændringer kendes fra andre fillermaterialer til hvid beton som fx hvid mikrosilica, der også ændrer betonens nuance i retning af mere grønt og blå [6].

Ved fremstilling af betonfliser til farvemålinger blev der desuden målt sætmål og luftindhold for betonen, og der blev efterfølgende målt styrke 2 og 28 dogn efter støbning. Både luftindhold og sætmål for beton med glasfiller er på niveau med det, der er registreret for referencen (indenfor måleusikkerheden). Der er dog for alle betoner tale om ret stiv beton med et meget ringe luftindhold, og det er derfor ikke sikkert, at disse observationer også gælder for beton med mere gængs sætmål og luftindhold.

Styrkemålingerne for den hvide beton er vist i Figur 3.18.



Figur 3.18: Styrkeudvikling for hvid beton til farvemålinger.

Det ses, at styrkereduktionen ved anvendelse af glasfiller i de hvide betoner er mindre end den styrkereduktion, der blev konstateret ved mørtelforsøg, se afsnit 3.3.1. Dette var forventeligt, da kun 10% af cementen er substitueret ved fremstilling af beton til farvemåling, mens substitutionsgraden i mørtelforsøgene var 25%.

På baggrund af de foreliggende målinger er det muligt at beregne glasfillernes aktivitetsfaktorer. Aktivitetsfaktoren er et mål for et puzzolansk materials styrkepotentiale i forhold til cement, idet den benyttes til at omregne mængden af puzzolan til ækvivalent cementmængde. De beregnede aktivitetsfaktorer er vist i Tabel 3.4. En aktivitetsfaktor på fx 0,5 betyder, at 1 kg af den pågældende puzzolan kan erstattes af 0,5 kg cement.

Tabel 3.4: Aktivitetsfaktorer bestemt for forskellige glasfillere på baggrund af målte 28-døgnstyrker.

	G350	G500	K350	K500
aktivitetsfaktor	0,58	0,51	0,45	0,66

Det ses, at aktivitetsfaktorerne for glasfillere er på samme niveau som aktivitetsfaktoren for flyveaske, der ifølge DS 481 [4] kan sættes til 0,5. Aktivitetsfaktoren for glasfilleren er imidlertid meget mindre end aktivitetsfaktoren for mikrosilica, der ifølge samme standard kan sættes til 2,0.

3.6 Konklusion

Sammenfattes resultaterne i de forskellige forsøg beskrevet i afsnit 3.1-3.5 kan det konkluderes:

- Glas kan formales til filler med samme udstyr som det, der benyttes til cementformaling. Energiforbruget er omtrent det samme som ved formaling af cement, hvilket kan være med til at indikere, hvad prisen er på fremstilling af glasfiller.
- Det er muligt at fremstille beton med glasfiller med god bearbejdelighed. Om glasfilleren giver bedre eller ringere bearbejdelighed afhænger af, hvad den substituerer (typen af cement eller flyveaske), men generelt er bearbejdeligheden på niveau med tilsvarende typer beton med samme pulverindhold.
- Tilsætning af glasfiller betyder muligvis en mindre styrkereduktion. Vurderingen afhænger af, hvad glasfilleren substituerer (cement eller flyveaske). Det afhænger givetvis også af i hvor store mængder, filleren tilsættes. Således er fillerens aktivitetsfaktor ca. 0,5 i forsøg med betonens farve, hvor glasfiller erstatter 10% af cementvægten, mens den er tæt på 0 i mørtelforsøgene, hvor glasfiller erstatter 25% af cementen.
- Hvis glasfiller erstatter flyveaske, er det muligt at opnå samme luftindhold med en lavere dosering af luftindblandingsmiddel. Glasfilleren ser ikke ud til at påvirke luftporestrukturen negativt, og beton med glasfiller har god frostbestandighed, når ellers kravene til luftporestrukturen er opfyldt.
- Beton med glasfiller i stedet for flyveaske har en chloridmodstand, der er lige så god som chloridmodstanden for beton med flyveaske.
- Glasfilleren giver ikke i sig selv anledning til alkali/kisel-skader, selvom glas indeholder både alkali og reaktivt kisel. Tværtimod ser det ud til, at glasfilleren kan undertrykke en skadelig reaktion, hvis der anvendes reaktivt sand, på samme måde som flyveaske gør det.
- Anvendt i moderate mængder betyder anvendelsen af glasfiller en ændring af betonens farve, der knapt kan skelnes med det blotte øje. Farveændringen i hvid beton er på niveau med hvad der kendes fra andre hvide fillermaterialer som fx hvid mikrosilica.

De foreliggende resultater tyder således ikke på, at der ud fra et betonteknologisk synspunkt er noget til hinder for, at glasfiller kan anvendes til fremstilling af beton. Der må dog tages forbehold for det forholdsvis begrænsede forsøgsomfang.

Det bør desuden bemærkes, at i forhold til det nuværende regelgrundlag (standarden DS 481) er det kun tilladt at anvende glasfiller i større mængder i beton til passivt miljø, idet det i denne miljøkasse kun er nødvendigt at dokumentere, at glasfilleren ikke skader betonens egenskaber.

Det forventes, at DS 481 inden for en relativ kort tidshorisont afløses af EN 206 samt et nationalt tillægsk dokument til denne fælles europæiske standard. Her vil det være muligt at anvende puzzolanske tilsætninger ud over flyveaske og mikrosilica i alle miljøklasser, hvis det er specificeret i projektoplægget. Dette kan både betyde en stramning og en lempelse for glasfilleren. Det er en lempelse, at der ikke er noget, der hindrer anvendelsen af glasfilleren i alle miljøklasser. Men i praksis vil det nemt komme til at virke som en stramning, at anvendelsen af glasfiller skal specificeres i det enkelte

projekt. Betonproducenten kan således ikke uden videre indarbejde glasfiller i sine standardrecepter.

4 Glas som magringsmiddel i tegl

4.1 Valg af materialer

Som beskrevet i rapporten fra projektets fase 1 [1] er røde blødstrogne sten det mest oplagte emne til anvendelse af glas.

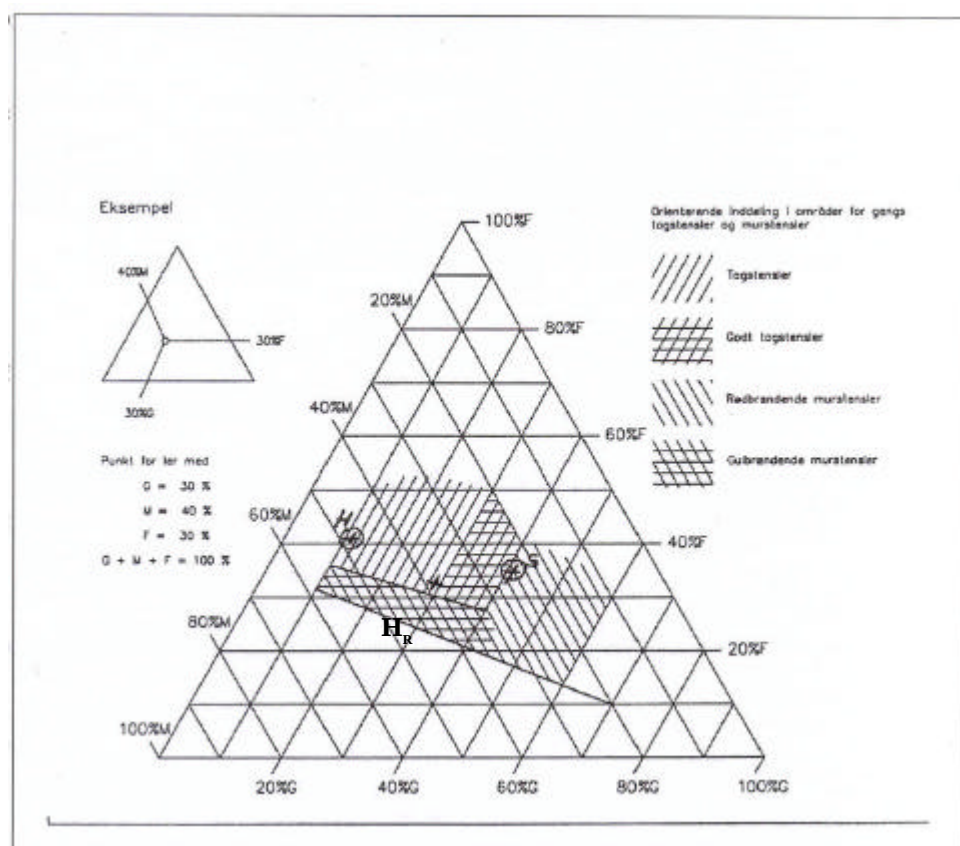
I projektet anvendes materialer fra 2 teglværker:

1. Hammershøj Teglværk

- Lerblanding. Kornstørrelsesfordelingen er bestemt i henhold til [2] og ses i Bilag F og i trekantdiagrammet på Figur 4.1 (H).
- Magringssand. Kornstørrelsesfordelingen er bestemt i henhold til [3] og ses i Bilag F.

2. Sønderkov Teglværk

- Strygeler. Kornstørrelsesfordelingen er bestemt i henhold til [2] og ses på Bilag F og i trekantdiagrammet på Figur 4.1 (S).



Figur 4.1. Kornstørrelsesfordeling (H_r: Referenceblanding, Hammershøj Teglværk, H: lerblanding, Hammershøj Teglværk, S: Strygeler, Sønderkov Teglværk)

I forsøgene er 2 typer glas anvendt:

- farvet glassand <1 mm, se afsnit 2.1.
- grønt glasmel, se afsnit 2.2.

4.2 Blandingsforhold

Følgende blandingsforhold er anvendt:

Tabel 4.1. Blandingsforhold i vægt%

Blanding mærkning	Hammershøj ler	Hammershøj sand	Sønderskov ler	Glassand	Glasmel
A (Hammershøj - glassand)	80	10		10	
B (Hammershøj - glasmel)	80	10			10
C (Hammershøj - reference)	80	20			
D (Sønderskov - glassand)			90	10	
E (Sønderskov - glasmel)			90		10
F (Sønderskov - reference)			100		

Kalkindholdet blev i de to referenceblandinger bestemt ved titrering.

Resultatet ses i Tabel 4.2, og kalkindholdene understreger, at der er tale om rene rødlerblandinger.

Tabel 4.2. Kalkindhold i referenceblandinger.

	Vægt % CaCO_3
C (Hammershøj reference)	0,38
F (Sønderskov reference)	0,15

4.3 Fremstilling af blandinger og formgivning af stænger

I forløbet med fremstilling af prøvelegemer indgår følgende delprocesser:

- Tørring af delmaterialer
- Afvejning af tørrede delmaterialer
- Tilsætning af vand og opblødning
- Homogenisering på valseværk
- Formgivning (strygning): Presning af stænger i metalforme 20×20×120 mm
- Bestemmelse af vandindhold i strygeler [4], se Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Vandindhold, strygeler, vægt%

A - (Hammershøj - glassand)	28,8
B - (Hammershøj - glasmel)	32,8
C - (Hammershøj - reference)	32,9
D - (Sønderskov - glassand)	28,2
E - (Sønderskov - glasmel)	27,3
F - (Sønderskov - reference)	29,8

Der ses ikke noget mønster i de fundne vandindhold. Det ses, at blandingen Hammershøj-glasmel og Hammershøj-reference har det højeste vandindhold.

4.4 Tørring

De pressede stænger blev efter afformning tørret i konditioneringsrum ved 20°C og 65% RH. Efter at svindet var ophørt blev stængerne færdigtørret ved 105°C i varmeskab.

Stængernes længde og vægt blev bestemt før og efter tørring. På grundlag heraf blev tørringssvind og vægttab beregnet, se Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Tørring

Blanding	Længdesvind %	Vægttab %
A - (Hammershøj - glassand)	7,2	28,0
B - (Hammershøj - glasmel)	9,4	32,5
C - (Hammershøj - reference)	9,3	32,4
D - (Sønderskov - glassand)	7,2	27,5
E - (Sønderskov - glasmel)	7,9	27,3
F - (Sønderskov - reference)	8,6	29,3

Ikke uventet ses, at større vandindhold, se Tabel 4.3, og dermed vægttab giver større længdesvind.

4.5 Brænding

De 2 værker har begge en toptemperatur i tunnelovnen på ca. 1050°C, og holdetider på henholdsvis 7 og 4 timer. 1050°C blev derfor valgt som max. temperatur. Desuden blev der gennemført brændinger ved 1025°C, 1000°C og 975 °C, ud fra en antagelse om, at glastilsætning kan sænke teglmaterialets sintringstemperatur.

Brændingerne blev gennemført i en elektrisk kammerovn. Holdetid ved toptemperatur var 4 timer.

Følgende egenskaber blev bestemt på de brændte stænger:

- Brændingssvind, Tabel 4.5
- Vægttab ved brænding, Tabel 4.6
- Nedbøjning ved 10 cm understøtning
- Nettodensitet (DS 438.13) [5], Tabel 4.7
- Vandoptagelse (DS 438.13) [5], Tabel 4.8
- Minutsug (DS 438.13) [6], Tabel 4.9
- Bøjningstrækstyrke, Tabel 4.10
- Trykstyrke, Tabel 4.11
- Udseende og overfladestruktur herunder mikroskopiundersøgelser af brudflader og synsflader

Tabel 4.5. Brændingssvind i %

Blanding	975°C	1000°C	1025°C	1050°C
A (Hammershøj – glassand)	1,6	2,4	3,5	4,7
B (Hammershøj – glasmel)	2,4	3,7	4,7	6,7
C (Hammershøj – reference)	2,7	4,4	6,3	7,4
D (Sønderskov – glassand)	1,0	1,5	2,0	2,3
E (Sønderskov – glasmel)	1,7	2,2	3,1	3,8
F (Sønderskov – reference)	0,9	1,4	2,3	3,3

Tabel 4.6. Vægttab ved brænding i %

Blanding	975°C	1000°C	1025°C	1050°C
A (Hammershøj – glassand)	4,1	4,1	4,3	4,5
B (Hammershøj – glasmel)	4,7	4,5	4,7	4,7
C (Hammershøj – reference)	4,8	4,7	5,0	5,1
D (Sønderskov – glassand)	4,4	4,4	4,6	4,7
E (Sønderskov – glasmel)	4,3	4,2	4,3	4,4
F (Sønderskov – reference)	4,8	4,8	5,0	5,0

Tabel 4.7. Nettodensitet i kg/m³

Blanding	975°C	1000°C	1025°C	1050°C
A (Hammershøj – glassand)	1774	2021	2076	2118
B (Hammershøj – glasmel)	2044	2129	2240	2360
C (Hammershøj – reference)	2051	2172	2370	2365
D (Sønderskov – glassand)	1871	1900	1902	1928
E (Sønderskov – glasmel)	1957	1988	2014	2072
F (Sønderskov – reference)	1879	1916	1956	1993

Tabel 4.8. Vandoptagelse i vol. %

Blanding	975°C	1000°C	1025°C	1050°C
A (Hammershøj – glassand)	19,3	15,3	9,8	4,6
B (Hammershøj – glasmel)	16,6	12,2	7,3	0,6
C (Hammershøj – reference)	17,0	11,2	4,1	1,3
D (Sønderskov – glassand)	19,7	16,7	13,2	9,9
E (Sønderskov – glasmel)	17,0	15,2	13,0	9,6
F (Sønderskov – reference)	21,4	19,3	16,7	13,8

Tabel 4.9. Minutsugning i kg/m²

Blanding	975°C	1000°C	1025°C	1050°C
A (Hammershøj – glassand)	1,41	1,10	0,57	0,25
B (Hammershøj – glasmel)	0,81	0,46	0,19	0,04
C (Hammershøj – reference)	0,73	0,56	0,10	0,07
D (Sønderskov – glassand)	2,25	2,05	1,71	1,21
E (Sønderskov – glasmel)	2,00	1,54	1,17	0,91
F (Sønderskov – reference)	1,79	1,94	1,58	1,56

Tabel 4.10. Bøjningstrækstyrke MPa

Blanding	975°C	1000°C	1025°C	1050°C
A (Hammershøj – glassand)	11,1	12,7	15,2	16,2
B (Hammershøj – glasmel)	15,9	18,1	23,5	20,6
C (Hammershøj – reference)	15,1	16,2	18,1	21,8
D (Sønderskov – glassand)	6,1	6,8	7,4	7,9
E (Sønderskov – glasmel)	8,2	8,9	9,6	10,8
F (Sønderskov – reference)	6,5	6,5	7,7	8,4

Tabel 4.11. Trykstyrker MPa

Blanding	975°C	1000°C	1025°	1050°C
A (Hammershøj - glassand)	32,3	44,4	63,7	50,0
B (Hammershøj - glasmel)	44,7	67,0	91,5	104,0
C (Hammershøj - reference)	43,0	64,0	83,3	109,6
D (Sønderskov - glassand)	9,5	22,1	28,2	28,7
E (Sønderskov - glasmel)	16,7	35,6	34,5	33,7
F (Sønderskov - reference)	15,3	25,8	26,9	27,4

4.6 Mikroskopiundersøgelser

De brændte teglmaterialers struktur er undersøgt med stereomikroskop.

Mikroskopibilleder af alle blandinger ved alle brændingstemperaturer er vist i Bilag G. Der ses både synsflader (mod metalform ved strygningen) og brudflader (fra bestemmelse af bøjningstrækstyrke).

Farvemæssigt ser den eneste virkning ud til at være, at glasmel gør Sønderskov leret mørkere.

4.7 Konklusion

Resultaterne viser primært, at der er store forskelle på virkningerne af henholdsvis glassand og glasmel. Der er ligeledes forskelle på, hvordan virkningerne er i de to lertyper, selv om begge er rødbrændende.

Glassand i Hammershøj ler giver ved alle temperaturer:

- Mindre brændingssvind
- Mindre densitet
- Højere vandoptagelse
- Højere minutsug
- Mindre bøjningstrækstyrke
- Mindre trykstyrke

Glasmel i Hammershøj ler giver ikke væsentlige eller systematiske ændringer på de undersøgte egenskaber.

Glassand i Sønderskov ler giver:

- Nogenlunde uændret brændingssvind
- Nogenlunde uændret densitet
- Mindre vandoptagelse
- Nogenlunde uændret minutsug
- Uændret bøjningstrækstyrke
- Mindre trykstyrke ved lav temperatur, større ved høj temperatur.

Glasmel i Sønderskov ler giver:

- Større brændingssvind
- Større densitet
- Mindre minutsug ved høj temperatur
- Højere bøjningstrækstyrke
- Højere trykstyrke

For Sønderkov leret gælder, at der i forsøgene er tilsat 10 % glassand eller glasmel direkte til strygeleret uden at der er kompenseret tilsvarende i sandindholdet. Højere sandindhold vil normalt give nedsat styrke. En positiv virkning på styrkerne vil derfor i virkeligheden formentlig være større.

Kombineres resultaterne med iagttagelserne ved mikroskopiundersøgelserne når man følgende konklusioner:

- Glassand blærer op. Virkningen kan netop spores som mørke uregelmæssigheder på synsfladerne ved 975 °C. Ved 1000 °C ses opblæringerne allerede med det blotte øje
- Opblæringerne ses også på brudflader som luftlommer omkring glaspartiklerne.
- Der spores ingen tilsvarende virkninger af glasmel, heller ikke i mikroskopet
- Resultaterne for vægttab under brænding antyder en stigende gasudvikling med stigende temperatur. Dette kan muligvis forklare opblæringen af glaspartiklerne.

Det er iøjnefaldende, at der er forskel på glasmaterialernes virkning i de to lertyper, der begge er rødbrændende. I Hammershøj leret er virkningen i bedste fald neutral. I Sønderkov leret er der omtrent neutral virkning af glassand, mens der generelt er en positiv virkning af glasmel.

Forskellen på de to lertyper er:

- Hammershøj-leret har et noget højere calciumoxidindhold end Sønderkov-leret, som det ses af kalktitreringerne Tabel 4.2
- Hammershøj-leret er finere end Sønderkov-leret Figur 4.1
- Sønderkov-leret er af en karakteristisk sydvestjysk type, normalt med lavt alkaliindhold (Teglværksler i Danmark, GEUS 2001-02)

Alle 3 forhold kan medvirke til, at Hammershøj-leret sintrer hurtigere end Sønderkov-leret. Og det er netop i det langsomst sintrerende ler, at glas kan have en positiv virkning ved de anvendte temperaturer.

På basis af forsøgsresultaterne bedømmes mulighederne for anvendelse i tegl således:

Glassand kan anvendes ved temperaturer under 975 °C uden opblæring. Det kunne evt. være interessant for savsmuldssten eller bagmursten, der typisk brændes ved 800 °C.

Opblæringen kan evt. udnyttes til at give et mere porøst og sugende materiale, under forudsætning af, at en nedgang i styrke kan accepteres.

Mulighederne for at undgå kølerevner, som beskrevet i [1] ved at erstatte kvartssand med glassand, vil i praksis kun kunne bedømmes ved egentlige produktionsforsøg med røde blødstrøgne teglsten i normalformat brændt i en tunnelovn, hvor der er risiko for kølerevner.

Glassand vil formentlig kunne håndteres på samme måde som teglværker i dag håndterer almindeligt sand. Hvis der er risiko for biologisk aktivitet pga. næringsstoffer i glas materialet, bør det dog vaskes først eller alternativt holdes helt tørt så længe som muligt

Anvendelse af glasmel kan give mulighed for at nedsætte brændings-temperaturen med op til 50 °C.

En lavere temperatur vil normalt give et mere lyserødt materiale. Selvom forsøgene tyder på, at tilsætning af glasmel giver en noget mørkere farve i forhold til referencen, er der dog en mulighed for at fremstille et lyserødt teglmateriale, der er mere tætsintret end normalt for lyserødt tegl.

Anvendelse til bagmursten er også en mulighed for glasmel.

Glasmel vil kræve en speciel håndtering på teglværkerne. Det bør holdes tørt så længe som muligt, hvis der er risiko for biologisk aktivitet pga. næringsstoffer fra ikke helt rene flasker. Transport vil formentlig skulle ske med tankvogn og opbevaring skal ske i silo.

5 Knust glas til vejbygning

Til undersøgelse af knust blandet returglas' anvendelighed til vejbygningsformål har Vejteknisk Institut udført en række af de standardforsøg der normalt udføres for naturmaterialer. Der er primært fokuseret på ubundne anvendelser, idet brug i asfaltbelægninger i første omgang ikke vurderes at være rentabel.

Som sammenligningsgrundlag for resultaterne bruges i vid udstrækning amerikanske forsøgsresultater, primært fra en stor undersøgelse udgivet af Clean Washington Center i 1998 [1]. Det må antages, at glas indsamlet i USA ikke adskiller sig væsentligt fra dansk returglas, og dermed kan de amerikanske resultater supplere de udførte forsøg.

5.1 Beskrivelse

Vejteknisk Institut modtog i to plastictonder 200 kg knust glas fra Uniscrap. Glasset var fra Uniscrap nedknust i knuser indstillet til max. 16 mm.

Glaspartiklerne var overvejende indenfor 0-16 mm fraktionen, dog sås enkelte skår op til 30 mm. Der var ganske mange rester af etiketter løst i glasset samt fastsiddende på en del af skårene. Herudover var der enkelte andre fremmedlegemer, men ingen spor af metal (låg o. lign.). Farven var overvejende grøn, men varierede fra helt klart glas til helt mørkt.

Glasset fremtrådte i øvrigt fugtigt og fedtet med en karakteristisk lugt, som givetvis skyldes at rester af indhold (vin, fødevarer) sad på glasskårene. Glasset var altså tilsyneladende ikke vasket eller på anden måde rengjort.



Figur 5.1: Fotos af knust glas modtaget hos Vejteknisk Institut.

5.2 Forsøgsprogram

Ved modtagelsen blev det knuste glas først tørret ved 105 °C og derefter blev der ved sigtning fremstillet to fraktioner: 0-4 mm og 0-16 mm. For hver af de to fraktioner blev følgende vejtekniske standardforsøg udført:

- Kornstørrelsesfordeling ved sigteanalyse
- Indhold af organisk materiale ved glødetab
- Bestemmelse af korndensitet
- Slidstyrke ved Los Angeles og Micro Deval
- Maksimal tørdensitet og optimalt vandindhold ved Proctor- og vibrationsindstampning
- Kornkurve efter indstampning og vibration
- Bæreevne ved CBR-forsøg

5.3 Resultater

Resultaterne fra forsøg på det danske glas vil som nævnt i vid udstrækning blive sammenlignet med resultater fra USA. De amerikanske undersøgelser er blevet udført på to fraktioner, nemlig mindre end ¾" og mindre end ¼", dvs. henholdsvis < 19 mm og < 6,4 mm. Disse fraktioner kan med god tilnærmelse sammenlignes med 0-16 mm og 0-4 mm fraktionerne.

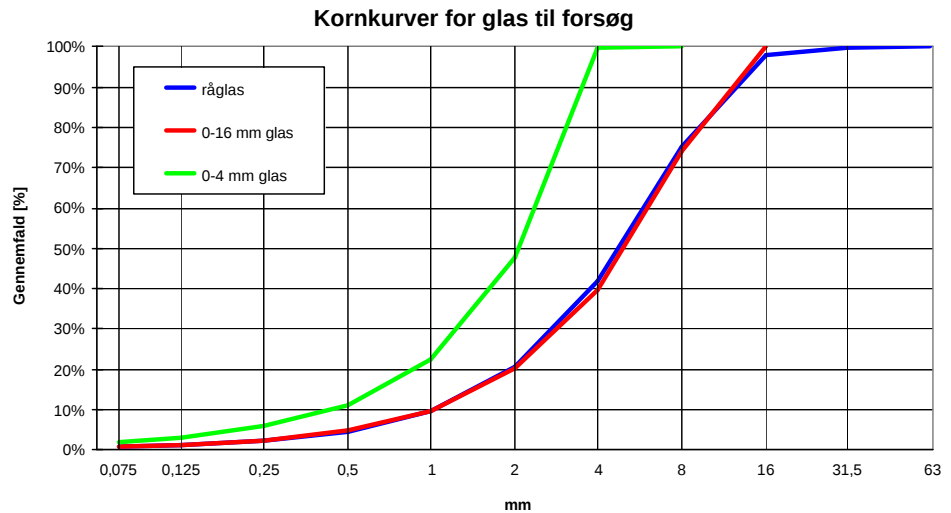
5.3.1 Sigteanalyser

Kornstørrelsesfordelingen for det knuste glas må anses for at være den vigtigste parameter, idet denne fordeling influerer på hovedparten af de andre tekniske egenskaber.



Figur 5.2: Sigterester for knust glas fra 16 - 31,5 mm (venstre) til 0 - 0,075 mm (højre).

På Figur 5.3 vises kornkurver for det modtagne glas samt for de to fraktioner der blev fremstillet til forsøgene.

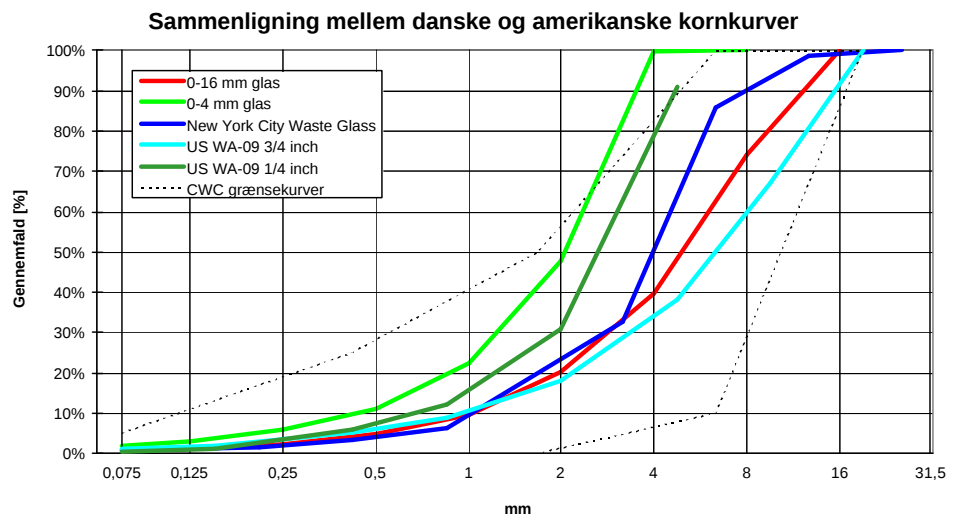


Figur 5.3: Kornstørrelsesfordeling for glasset som det blev modtaget (råglas) samt for de to fraktioner der blev brugt til forsøg.

Det fremgår, at der er meget lille forskel på kurven for råglas og kurven for 0 – 16 mm materiale. Under nedknusningen er der opstået enkelte store flade skår, som går igennem knuseren, men tilbageholdes på en 16 mm sigte. Denne >16 mm fraktion udgjorde 2,1 vægt-% af det samlede materiale.

Det skal bemærkes, at 0 – 4 mm fraktionen er fremstillet ved frasigtning fra en 0 – 16 mm glasfraktion. Det kan ikke udelukkes at kornkurven for en ”ægte” 0 – 4 mm fraktion, dvs. fremstillet ved knusning til max. 4 mm, ville blive lidt anderledes end den her viste.

Det danske glas sammenlignes med eksempler på kornkurver taget fra de amerikanske referencer i Figur 5.4.



Figur 5.4: Kornkurver for de to danske glasfraktioner sammenlignet med kornkurver for amerikansk returglas.

Det danske 0 – 4 mm glas stemmer godt overens med den amerikanske 0 – 6,35 mm fraktion (de grønne kurver), i hvert fald når der tages hensyn til forskellen i maksimalstørrelse.

For de grove fraktioner er der også god overensstemmelse mellem det danske 0 – 16 mm materiale og de to referencer. Kun omkring 8 mm sigten er der en vis afvigelse, men det danske materiale placerer sig imellem de to amerikanske sigtekurver.

Generelt kan det konkluderes at der er fin overensstemmelse mellem de danske og amerikanske kornkurver. Som følge af dette vil andre tekniske egenskaber, som er fundet i forbindelse med de amerikanske forsøg, umiddelbart kunne overføres til danske glasmaterialer.

For alle glasfraktioner gælder, at der er tale om ret enskornede materialer (stejle kornkurver), hvor eksempelvis hovedparten af kornene i 0 – 16 mm materialet ligger i intervallet 2 - 8 mm. Indholdet af filler (< 0,075 mm) er i alle tilfælde mindre end 2 %. Uensformighedstallet for alle de undersøgte glasfraktioner ligger mellem 5 og 6.

På Figur 5.4 er ligeledes indtegnet grænsekurver for tilslag til ubundne anvendelser, anbefalet af Clean Washington Center. Det fremgår, at knust glas med maksimalkornstørrelse 8 – 16 mm vil opfylde disse krav, mens det danske 0 – 4 mm glas i toppen af kurven falder uden for området.

5.3.2 Glødetab

En mindre materialeprøve opvarmes til 1000 °C, hvorved alle organiske materialer brænder af. Ved vejning før og efter bestemmes således indholdet af forskellige forureninger som f.eks. etiketter, kork og rester af mad og vin.

I modsætning til de naturmaterialer, som normalt testes, vil glasset ved opvarmningen gradvist blive blødere og de enkelte skår begynder at flyde sammen.

Ved bestemmelsen af glødetab i de traditionelle digler gav dette anledning til små ”sprængninger”, som ødelagde en af diglerne. Tilsyneladende opstod der overtryk inde i materialet, som ikke kunne undvige på fredelig vis. Det var dog muligt at bestemme glødetabet, som fremgår af følgende tabel:

Glasfraktion	Udført på	Glødetab [%]
0 - 4 mm	0 - 1 mm	1,9
	0 - 4 mm	0,67
0 – 16 mm	0 - 1 mm	0,8
	0 – 16 mm	0,44

Glødetabet bestemmes normalt på 0-1 mm materiale, men i dette tilfælde fandtes også værdien for hele fraktionen, henholdsvis 0-4 og 0-16 mm.

Indholdet af organiske stoffer er altså forholdsvis størst i de små fraktioner, formentlig som følge af større totaloverflade på de små partikler med højere indhold af overfladeforureninger (rester af føde- og drikkevarer) til følge.

De amerikanske resultater for glødetab ligger fra 0,1 – 0,6 %.

5.3.3 Densitet

Korndensiteten for glasset blev bestemt til henholdsvis 2,51 og 2,50 t/m³ for de to fraktioner, altså praktisk taget samme værdi.

Amerikanske resultater for rent returglas varierer fra 2.41 til 2.52 t/m³, dvs. værdier, der er i god overensstemmelse med de danske resultater. Der er dog heller ikke grund til at tro andet, idet grundmaterialet er det samme.

Naturligt tilslag har normalt korndensitet 2,60 – 2,70 t/m³. Glastilslag er altså af størrelsesordenen 5 – 10 % lettere end naturligt tilslag.

5.3.4 Slidstyrke

Ved Los Angeles test vurderes tilslags slidstyrke ved at rotere tilslagspartikler i en tromle med stålkugler. Ud fra 0 – 16 mm fraktionen testes en prøve i fraktionen 4,75 – 9,5 mm, mens en prøve i fraktionen 2,35 – 4,75 testes for 0 – 4 mm materialet. I begge tilfælde findes Los Angeles værdien som gennemfaldet på en 1,7 mm sigte efter 500 omdrejninger i tromlen. En høj værdi er således udtryk for ringe slidstyrke.

Glasfraktion	Los Angeles værdi [%]
0 – 4 mm	23,2
0 – 16 mm	35,4

De amerikanske resultater for nogenlunde tilsvarende fraktioner er vist i følgende tabel:

Glasfraktion	Los Angeles værdi [%]
0 – 1/4 "	29,9 og 30,9
0 – 3/4 "	41,7

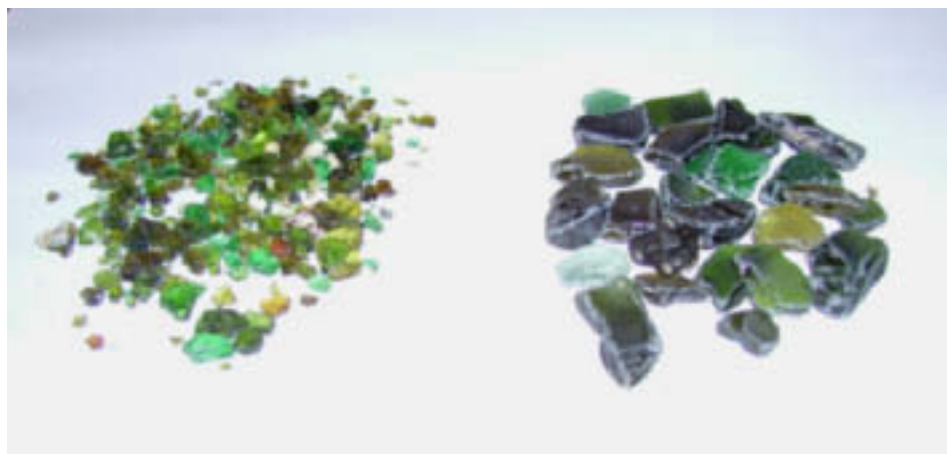
Der er god overensstemmelse med de danske data, dog får amerikanerne et lidt større slid. I begge tilfælde er sliddet på den grove fraktion størst. Dette skyldes, at de større partikler generelt er fladere og dermed knækker lettere i Los Angeles møllen.

Traditionelle danske grus- og sandmaterialer har Los Angeles værdier omkring 25 %. Glasfraktionen 0 – 4 mm har en slidstyrke på samme niveau, idet kornene her er relativt kubiske. Slidstyrken for den grove fraktion er derimod dårligere end for traditionelle materialer.

En anden slidstyrketest er Micro Deval, som minder om Los Angeles prøvning, dog er metoden blidere, idet tilslagspartiklerne roterer i vand og med mindre stålkugler. Denne metode må antages at simulere de reelle forhold i en vejbelægning bedre end Los Angeles testen.

Micro Deval værdien for grovfraktionen blev fundet til 7,4 %. Dette er en værdi der ligger i den bedre ende i forhold til det, man finder for traditionelle naturmaterialer.

Det resulterende materiale efter de to slidstyrketest er vist i Figur 5.5. Her ses en fundamental forskel på de to prøvemethoder, idet Los Angeles testen nedknuser glaspartiklerne, mens Micro Deval testen kun slider de skarpe kanter runde.



Figur 5.5: Glas efter Los Angeles test (venstre) og Micro Deval test (højre).

5.3.5 Maksimal tørdensitet og optimalt vandindhold

Densitet ved indbygning undersøges ved hjælp af Proctorindstampning, hvor en materialeprøve indstemples med et faldlod i en $\varnothing 15$ cm cylinderform.

Maksimal tørdensitet og optimalt vandindhold bestemt ved Standard Proctor fremgår af følgende tabel:

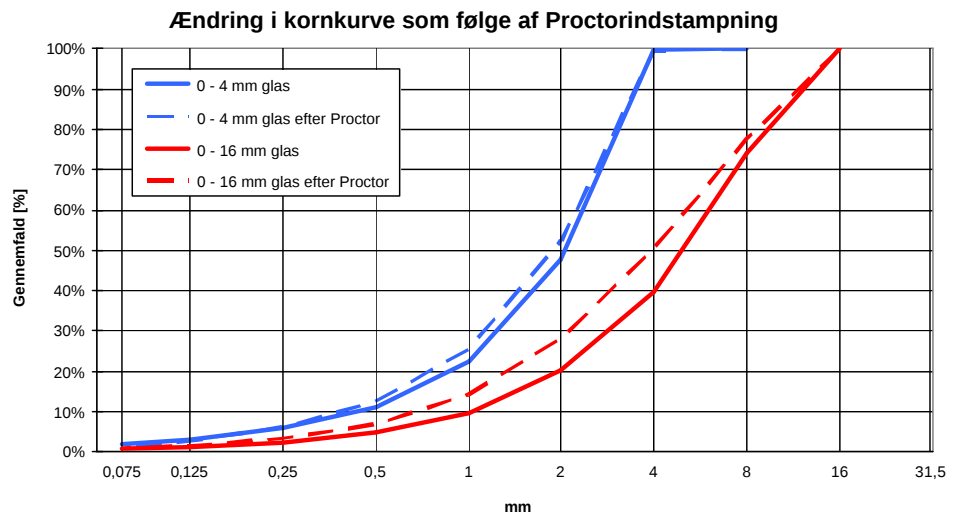
Glasfraktion	Maksimal tørdensitet [t/m ³]	Optimalt vandindhold [%]
0 – 4 mm	1,66	7,5
0 – 16 mm	1,70	5,5

Til sammenligning vises her tilsvarende amerikanske resultater:

Glasfraktion	Maksimal tørdensitet [t/m ³]	Optimalt vandindhold [%]
0 – ¼ "	1,67 og 1,68	4,7 og 5,0
0 – ¾ "	1,59 og 1,72	5,3 og 5,5

Det fremgår, at de maksimale tørdensiteter er af samme størrelsesorden for de danske og amerikanske forsøg, hvorimod de optimale vandindhold er lidt højere i de danske forsøg. Det skal dog bemærkes, at usikkerheden på det optimale vandindhold er relativt stor ved såvel de danske som amerikanske forsøg, idet glasset i forhold til naturligt tilslag er relativt ufølsomt overfor ændringer i vandindholdet. Dette betyder, at et klart optimum kan være svært at bestemme, men er dog en fordel i anlægssituationer, hvor en meget præcis styring af vandindholdet bliver mindre vigtig.

Ved Proctorindstampningen må det umiddelbart forventes, at en del af glaspartiklerne knuses under faldloddets påvirkning. Dette er undersøgt ved at lave en sigteanalyse før og efter indstampning. Resultatet er vist i Figur 5.6.



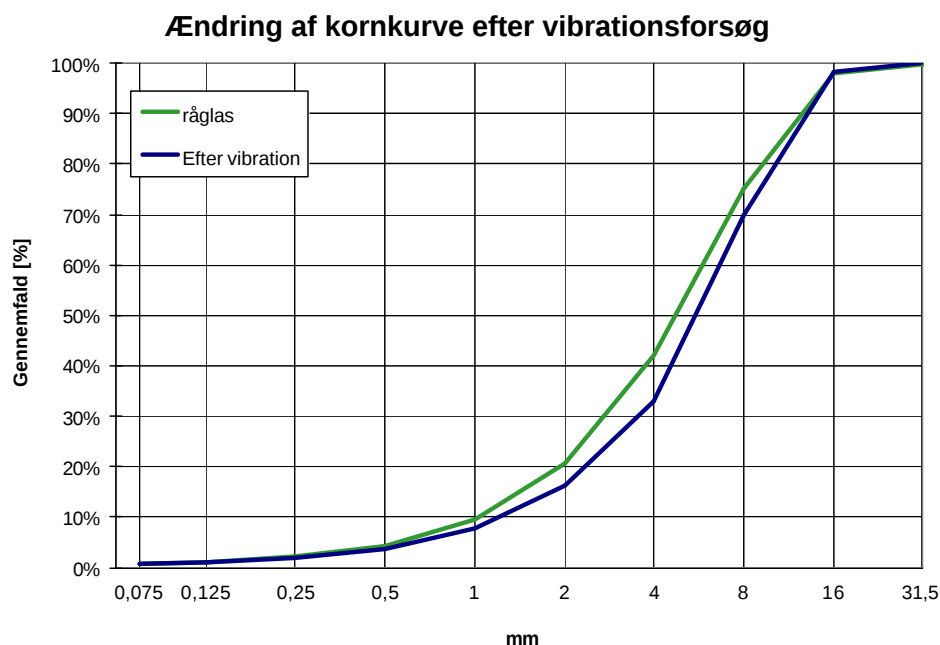
Figur 5.6: Nedknusning ved indstamping illustreret i form af ændring af kornkurve.

Som forventet fremgår det, at kornkurverne ligger højere efter indstamping, dvs. en del af partiklerne er blevet knust. Effekten er mest markant for den grove fraktion.

En anden metode til bestemmelse af referencedensitet er vibrationsforsøg. Metoden bruges efterhånden ofte i stedet for Proctorindstamping, specielt for materialer, der ikke har et veldefineret optimalt vandindhold. Endvidere efterligner denne metode bedre nutidens kraftige vibrationstromler, og der opnås en højere maksimal tør densitet. Vibrationsforsøget udføres i en form med volumen 14 liter, dvs. en større materialeprøve undersøges i forhold til Proctorindstamping.

Prøvningen blev foretaget på det modtagne råmateriale. Resultatet blev en maksimal tør densitet på $1,84 \text{ t/m}^3$ og et optimalt vandindhold på 8,9 %.

For vibrationsforsøget blev det også undersøgt, om der sker en ændring af kornstørrelsesfordelingen. Af Figur 5.7 fremgår det, at der imod forventning er en højere andel af store partikler efter forsøget, hvilket ikke umiddelbart er realistisk. Resultatet må bero på almindelig statistisk usikkerhed på målingen, men tyder i hvert fald ikke på, at der sker nogen nedknusning i forbindelse med vibrationen.



Figur 5.7: Kornkurve for råglas før og efter vibrationsforsøg.

5.3.6 CBR-værdi

CBR-værdien er et udtryk for bæreevnen (stabiliteten) af et ubundet materiale. For begge de undersøgte fraktioner blev der fundet en CBR-værdi omkring 5 %, hvilket er udtryk for en dårlig bæreevne. Instabiliteten skyldes givetvis den enskornede natur af glastilslaget.

Det har ikke været muligt at finde CBR-værdier for 100 % glastilslag i litteraturen, men for blandinger af 50 % glas og 50 % naturligt tilslag rapporteres værdier på 42 – 125, altså væsentligt højere end for det danske tilslag. På denne baggrund må det vurderes, at de fundne resultater er overraskende lave.

5.4 Konklusion

De udførte forsøg sigter som tidligere nævnt primært på at karakterisere det knuste glas' anvendelighed til ubundne formål. I Figur 5.4 blev kornkurverne sammenholdt med CWC's grænsekurver for anvendelighed til forskellige ubundne formål, og det fremgik, at dansk returglas knust ned til en maksimal kornstørrelse på 8-16 mm fuldt ud falder indenfor det anbefalede område.

De mulige ubundne anvendelser i Danmark kunne være som fyldmateriale, som bundsikringssand eller filtergrus.

Anvendelse som ikke-bærende fyldmateriale vurderes ikke at skabe tekniske problemer. Tilstrækkeligt nedknust vil glasset kunne indbygges og komprimeres tilfredsstillende, også som 100 % glastilslag. For fyldanvendelser, hvor der kræves en vis bæreevne, kan glassets lave CBR-værdi evt. udgøre et problem. Opblanding med naturligt tilslag kan givetvis forbedre situationen.

Ud fra de udførte laboratorieforsøg ser det ud til, at knust glas kan opfylde de danske krav til bundsikringsmaterialer. Bl.a. skal gennemfaldet på 0,075 mm

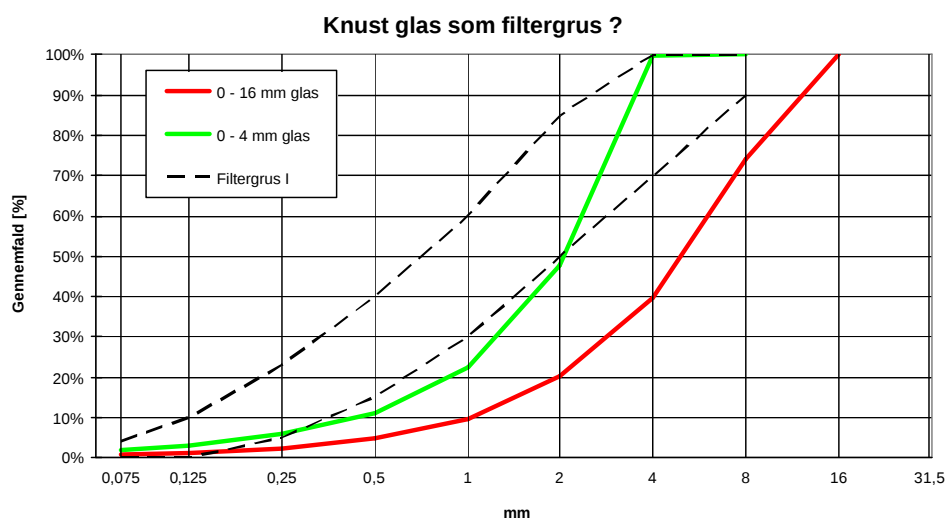
sigten være mindre end 9 %, hvilket kan opfyldes med god margin. I øvrigt skal sandækvivalenten være større end eller lig med 30 %. Denne prøvning er ikke udført for det knuste glas, idet den ikke vurderes at være relevant pga. det lave indhold af finstof.

Den dårlige stabilitet af det knuste glas kan være den største hindring for brug i ren form. En anvendelse som nedre lag i en tolags bundsikringsopbygning eller opblanding med naturligt tilslag kan være mulige løsninger på problemet.

I udlandet er der ikke fundet referencer til brug af 100 % glastilslag til anvendelser, der minder om den danske bundsikring. Normalt vil man kun bruge op til 20-30 % glastilslag. Det kan dog absolut ikke udelukkes, at en 100 % anvendelse er teknisk mulig, men blot ikke afprøvet, idet man ikke har ønsket at fjerne sig for meget fra det kendte.

En mulig anvendelse for knust glas kunne være som filtergrus, der bruges omkring drænrør o. lign. Glasset burde pga. sin enskornede struktur uden ret meget finstof være yderst velegnet som drænmateriale. I litteraturen anføres da også ofte, at knust glas har god drænevne.

I Figur 5.8 sammenlignes kornkurverne for de to glasfraktioner med Vejreglernes grænsekurver for Filtergrus I. Det fremgår, at glasset ikke holder sig inden for grænserne, men generelt er for grov- og enskornet. Forklaringen på dette tilsyneladende paradoks er, at et godt filtermateriale ikke kun skal være drænende, men også skal kunne bevare dræningsevnen, og dermed ikke må kunne fyldes op af finstof fra omgivelserne.



Figur 5.8: Sammenligning mellem kornkurver for knust glas og Vejreglernes grænsekurver for filtergrus.

Overordnet set skal det til slut anføres, at den her foretagne vurdering ikke tager stilling til de miljømæssige forhold for brug af knust returglas, som må analyseres særskilt. Såfremt materialet vurderes at være potentielt forurenet, kan det muligvis ikke bruges til de vejtekniske anvendelser, hvor materialet udsættes for vandgennemstrømning, dvs. som filtermateriale, bundsikring og ikke-afdækket fyld.

6 Referencer

Kapitel 1

- [1] *Udvikling og afprøvning af alternative metoder til genanvendelse af farvede glasskår*, baggrundsnotat, Miljøstyrelsen (maj 2002).
- [2] Hasholt, Marianne Tange, Hansen, Helge, & Thøgersen, Finn: *Metoder til genanvendelse af farvede glasskår til produktion af tegl og beton og til vejbygning. Del 1: Litteraturstudium*, Miljøstyrelsen (2003). Rapporten findes kun i elektronisk form og kan hentes på Miljøstyrelsens hjemmeside: www.mst.dk.

Kapitel 2

- [1] Kornstørrelsesfordeling, Murværkscentrets metode 8.05
- [2] Metaloxider i silikatmaterialer, Murværkscentrets metode 7.32
- [3] Densitet, Murværkscentrets metode 7.80, BS 4500 Methods of testing cement 3.2 Density test
- [4] Kornstørrelsesfordeling, sedigraph, Murværkscentrets metode 8.52

Kapitel 3

- [1] DS/EN 450: *Flyveaske til beton. Definitioner, krav og kvalitetsstyring*, 1. udgave, Dansk Standard (1994).
- [2] DS/EN 196-3: *Metoder til prøvning af cement. Del 3: Bestemmelse af bindetid og volumenbestandighed*, 1. udgave, Dansk Standard (1995).
- [3] Hasholt, Marianne Tange, Hansen, Helge, & Thøgersen, Finn: *Metoder til genanvendelse af farvede glasskår til produktion af tegl og beton og til vejbygning. Del 1: Litteraturstudium*, Miljøstyrelsen (2003). Rapporten findes kun i elektronisk form og kan hentes på Miljøstyrelsens hjemmeside: www.mst.dk.
- [4] DS 481: *Beton. Materialer*, 1. udgave, Dansk Standard (1999).
- [5] DS 405.15: *Mørtelprismeeekspansion*. Metoden er identisk med TI-B 51: *Prøvningsmetode. Sands alkalikiselreaktivitet*, Teknologisk Institut, Byggeri (1985).
- [6] Kommunikation med Jacob Thrysoe, Aalborg Portland, den 23. juni 2003.

Kapitel 4

- [1] Hasholt, Marianne Tange, Hansen, Helge, & Thøgersen, Finn: *Metoder til genanvendelse af farvede glasskår til produktion af tegl og beton og til vejbygning. Del 1: Litteraturstudium*, Miljøstyrelsen (2003). Rapporten findes kun i elektronisk form og kan hentes på Miljøstyrelsens hjemmeside: www.mst.dk.
- [2] Kornstørrelsesfordeling, sedigraph, ler, Murværkscentrets metode 8.52
- [3] Kornstørrelsesfordeling, sand, Murværkscentrets metode 8.01
- [4] Vandindholdsbestemmelse, Murværkscentrets metode 7.72.
- [5] Nettodensitet og vandoptagelse, Murværkscentrets metode 5.50
- [6] Minutsug, Murværkscentrets metode 5.40

Kapitel 5

- [1] *A Tool Kit for the Use of Post-Consumer Glass as a Construction Aggregate*,
Clean Washington Center, report no. GL-97-5,
www.cwc.org/glass/gl.htm/gl975rpt.htm

A. Metode til kemisk analyse af glassand

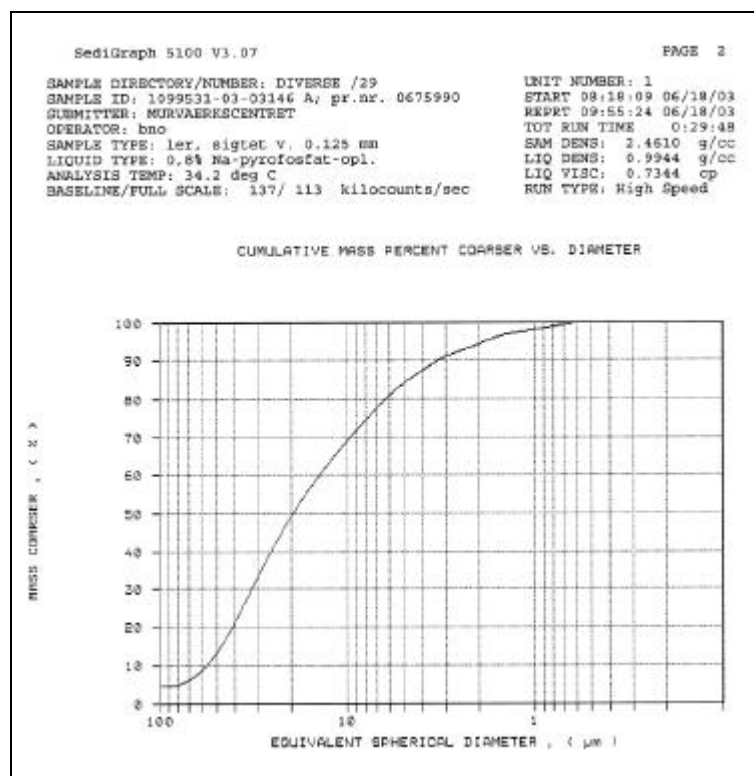
MURVÆRKSCENTRET - KVALITETSHÅNDBOG		
7.32	METALOXIDER I SILIKATMATERIALER Lithiummetaborat smeltning	RAPPORTBILAG Rev. 94/04
Analyseprøverne blandes med lithiummetaborat, ca. 6 gange prøvemængden, i en platindigel. Blandingen smeltes ved 1000°C i 15 minutter, hvorefter diglen chokkøles i destilleret vand. Under magnetomrøring opløses blandingen i varm, fortyndet saltsyre, opløsningen fortyndes til kendt volumen. Koncentrationerne måles med atomabsorptionsspektrofotometer ved sammenligning med kendte standarder. Standarder og prøveopløsning tilsættes lanthanklorid for at eliminere påvirkning fra forstyrrende elementer. Følgende metaller kan bestemmes med metoden: – Ca, calcium – Fe, jern – K , kalium – Mg, magnesium – Mn, mangan – Na, natrium – Pb, bly – Zn, zink – Al, aluminium		

Figur A.1 Metode til bestemmelse af metaloxider i silikatmaterialer

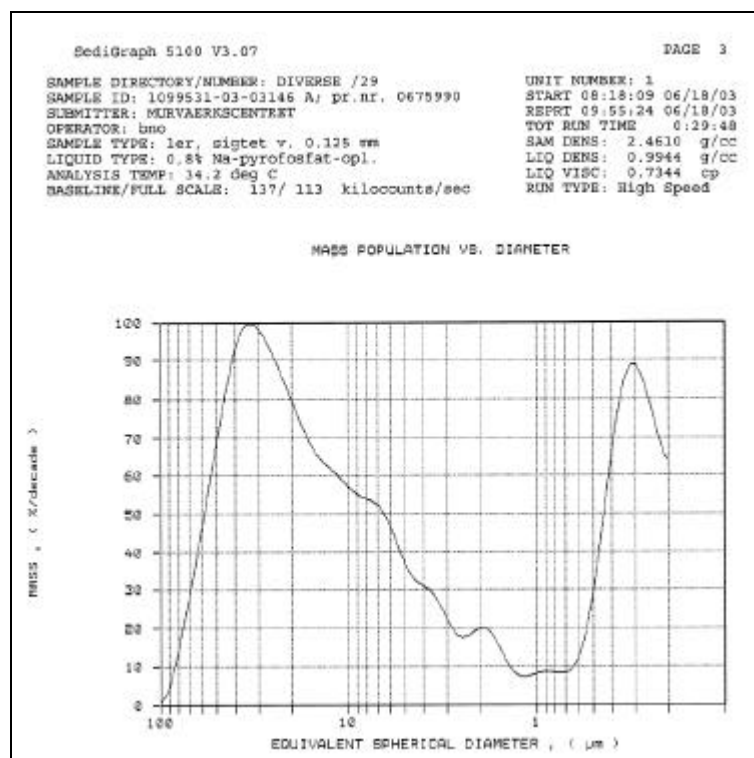
B. Kornstørrelsesfordeling for glasmel bestemt ved Sedigraph

SediGraph 5100 V3.07		PAGE 1
SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DIVERSE /29		UNIT NUMBER: 1
SAMPLE ID: 1099531-03-03146 A/ pr.nr. 0675990		START 08:18:09 06/18/03
SUBMITTER: MURVAERKSCENTRET		REPT 09:55:24 06/18/03
OPERATOR: hno		TOT RUN TIME 0:29:48
SAMPLE TYPE: ler, sigtet v. 0.125 mm		SAM DENS: 2.4610 g/cc
LIQUID TYPE: 0.8% Na-pyrophosfat-opl.		LIQ DENS: 0.9944 g/cc
ANALYSIS TEMP: 14.2 deg C		LIQ VISC: 0.7344 cp
BASELINE/FULL SCALE: 137/ 113 kilocounts/sec		RUN TYPE: High Speed
STARTING DIAMETER: 100.00 μ m		REYNOLDS NUMBER: 1.47
ENDING DIAMETER: 0.20 μ m		FULL SCALE MASS %: 100
MASS DISTRIBUTION		
MEDIAN DIAMETER: 19.75 μ m		MODAL DIAMETER: 33.18 μ m
DIAMETER (μ m)	CUMULATIVE MASS COARSER (%)	MASS IN INTERVAL (%)
100.00	4.4	4.4
80.00	4.9	0.5
60.00	8.8	3.8
50.00	13.5	4.7
40.00	21.5	8.1
30.00	33.6	12.3
25.00	41.3	7.5
20.00	49.6	8.2
15.00	58.6	9.0
10.00	69.4	10.8
8.00	74.7	5.3
6.00	81.1	6.4
5.00	84.4	3.3
4.00	87.6	3.2
3.00	91.0	3.4
2.00	94.3	3.3
1.50	96.5	2.2
1.00	98.0	1.5
0.80	98.8	0.8
0.60	99.9	1.1
0.50	101.5	1.6
0.40	106.2	4.7
0.30	116.6	10.4
0.20	130.0	13.5

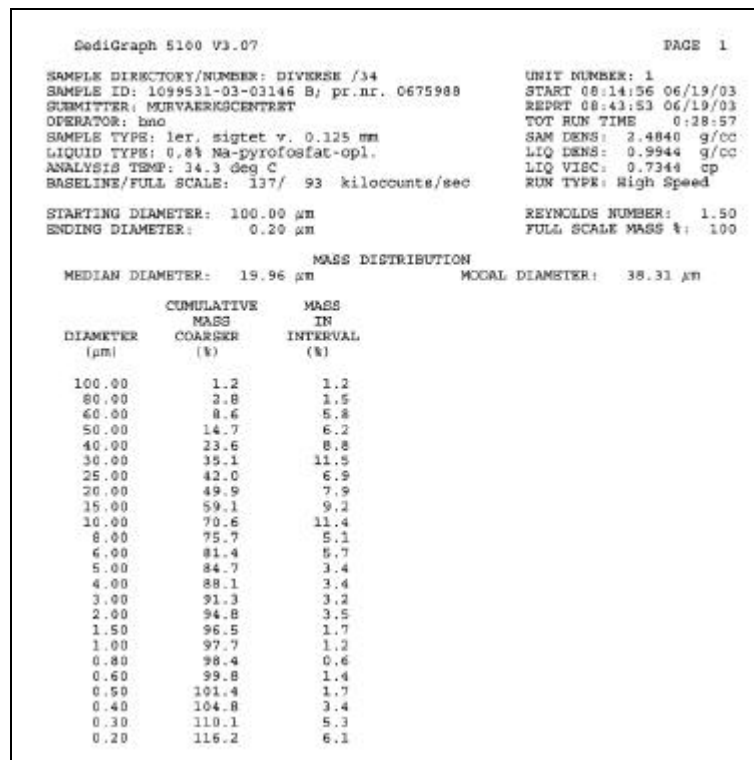
Figur B.1: Materiale A



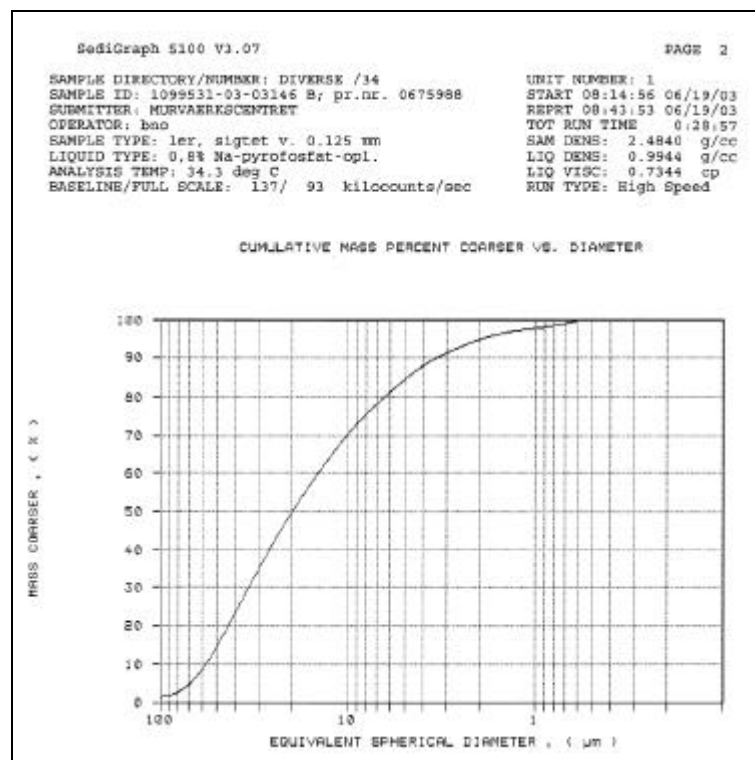
Figur B.2: Materiale A



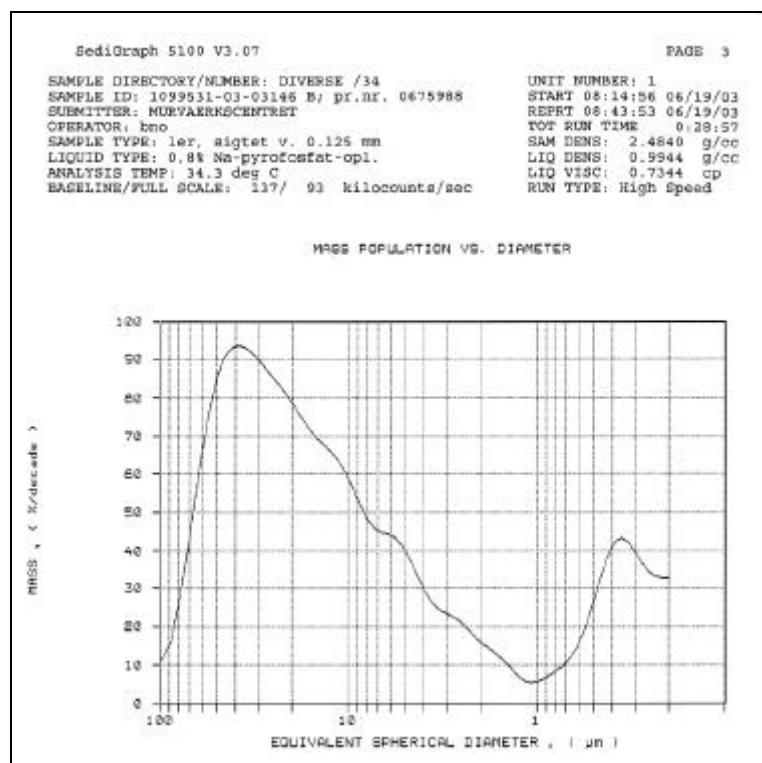
Figur B.3: Materiale A



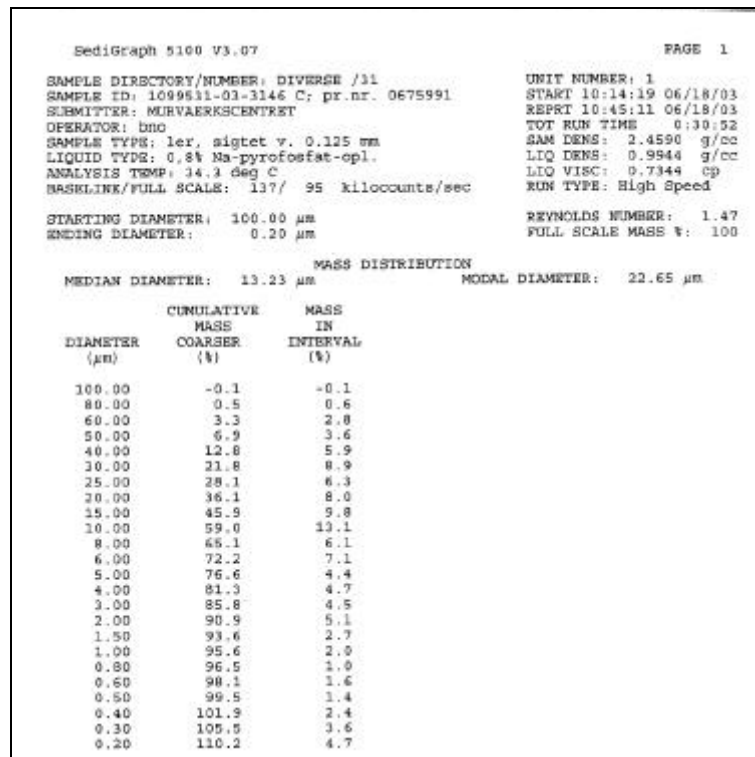
Figur B.4: Materiale B



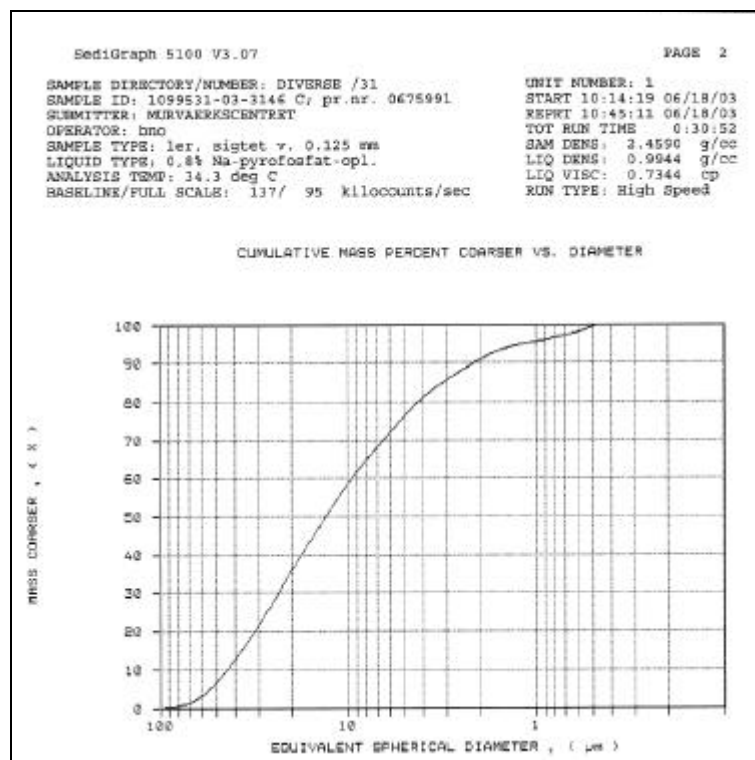
Figur B.5: Materiale B



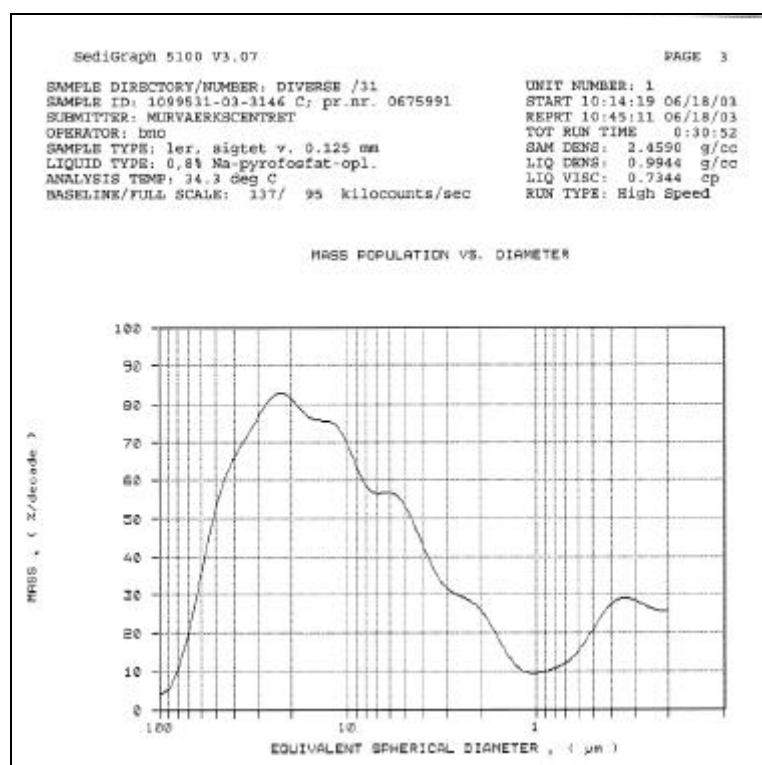
Figur B.6: Materiale B



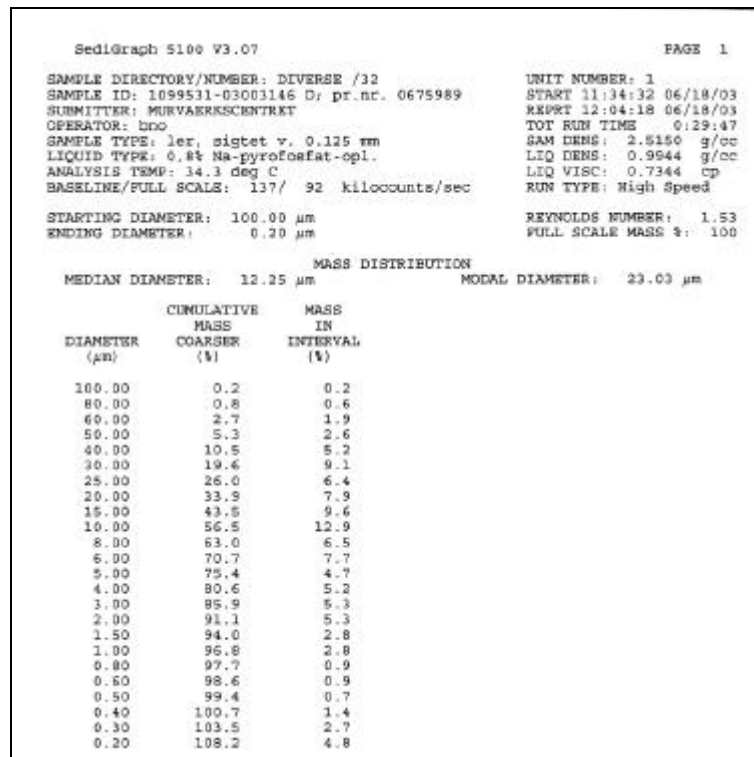
Figur B.7: Materiale C



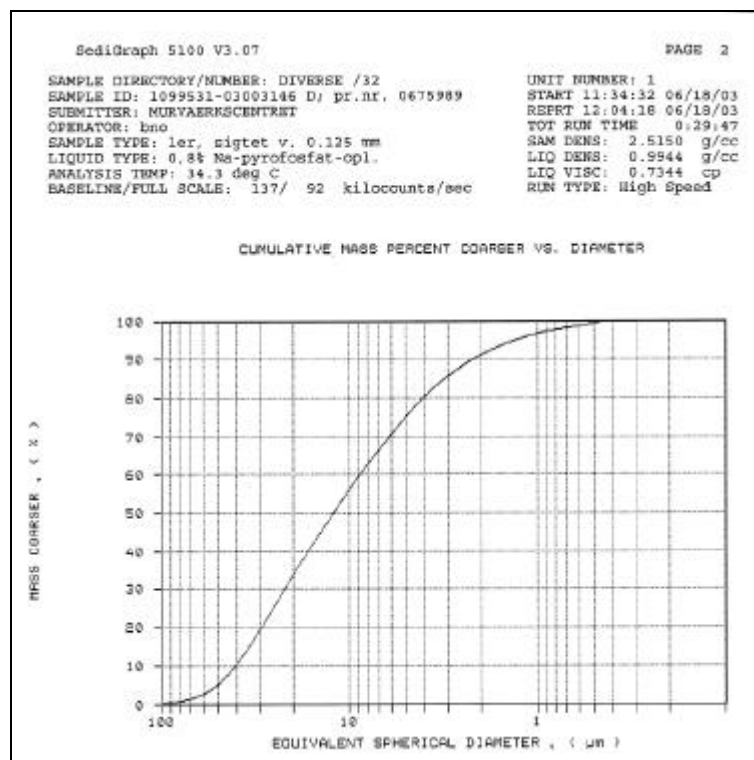
Figur B.8: Materiale C



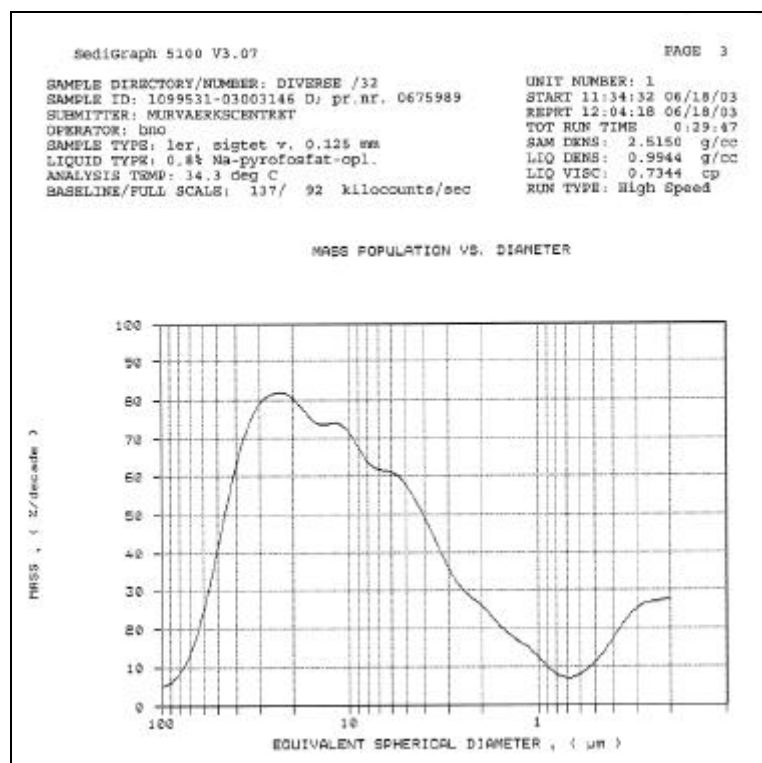
Figur B.9: Materiale C



Figur B.10: Materiale D

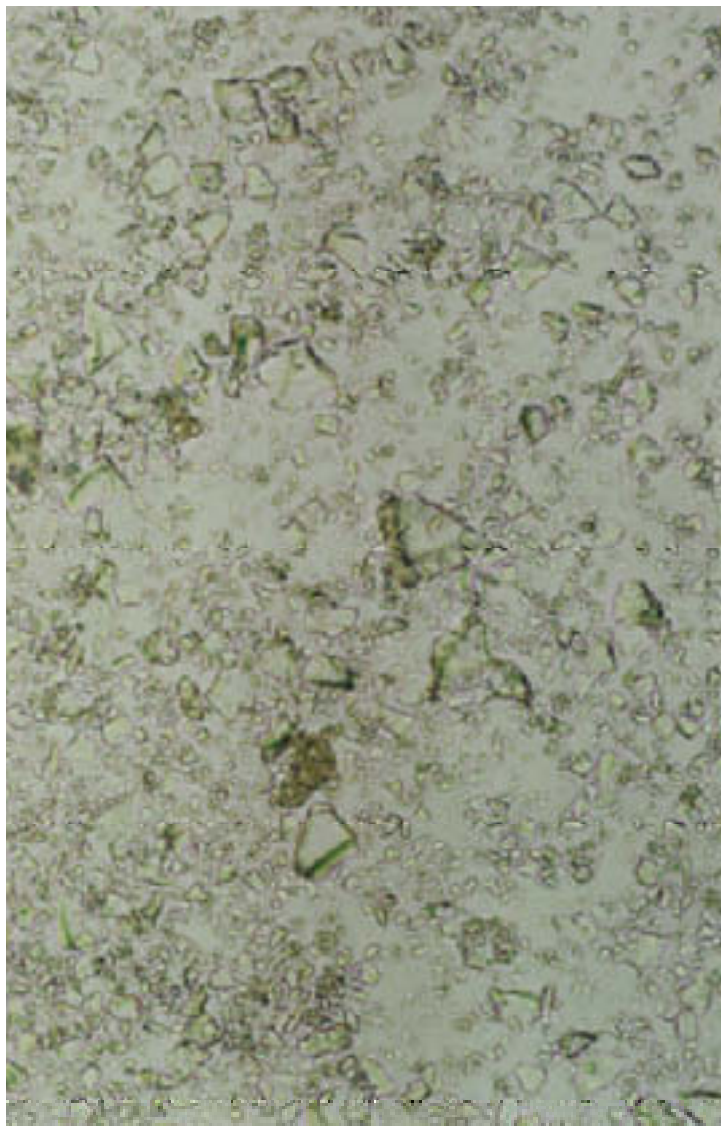


Figur B.11: Materiale D



Figur B.12: Materiale D

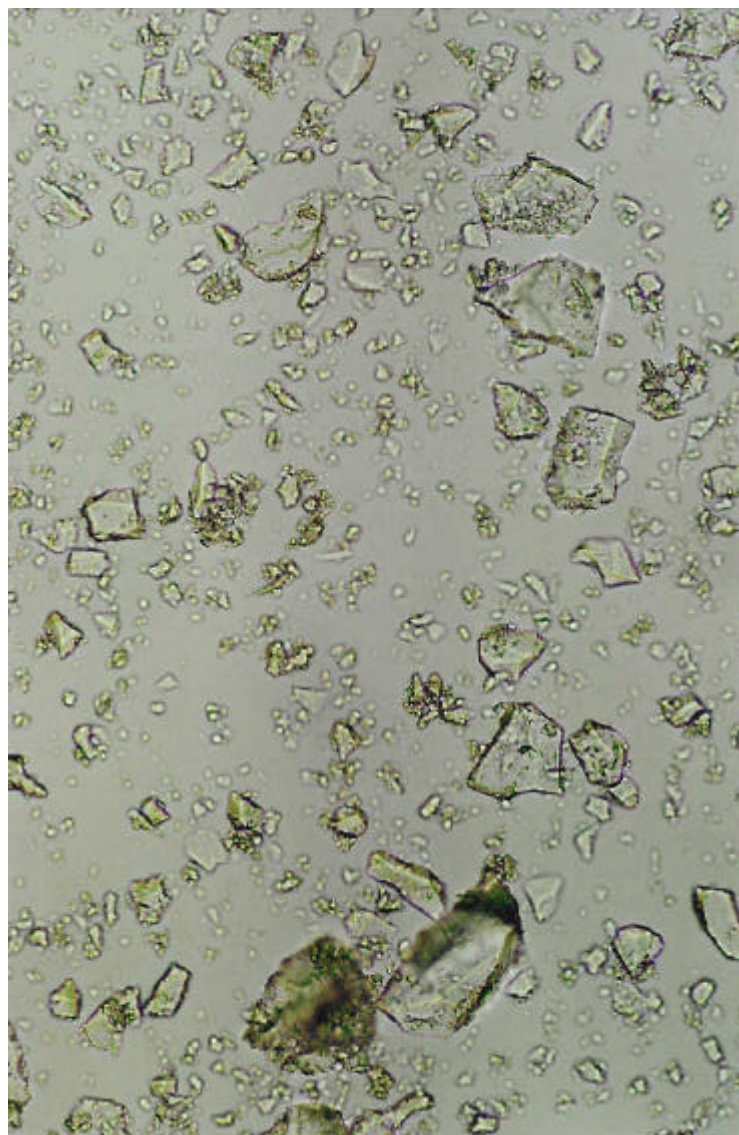
C. Mikroskopibilleder af glasmel



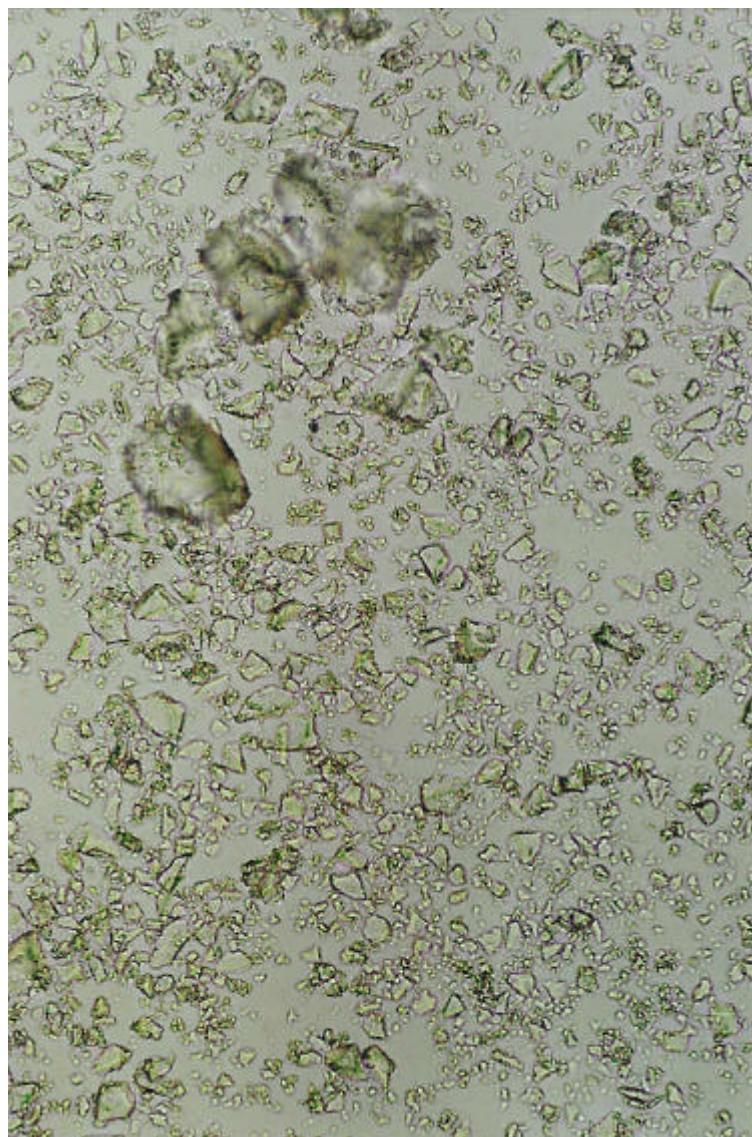
Figur C.1 Glasmel, prøve A, 230x



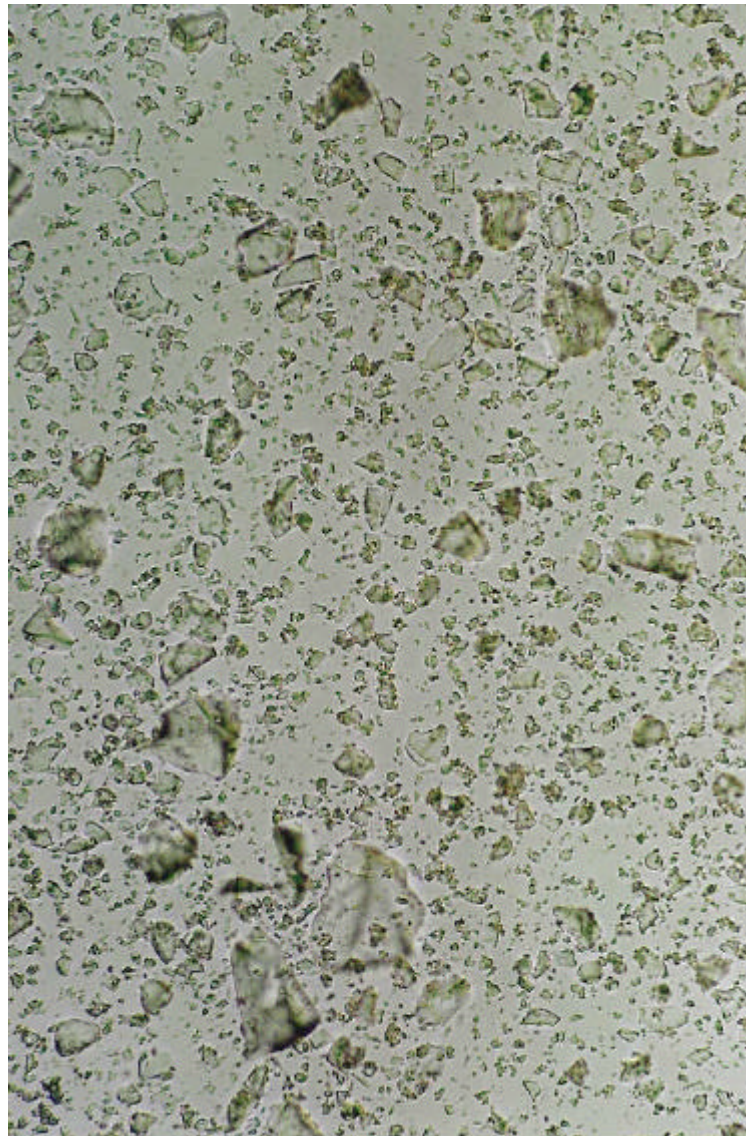
Figur C.2 Glasmel, prøve A, 230x



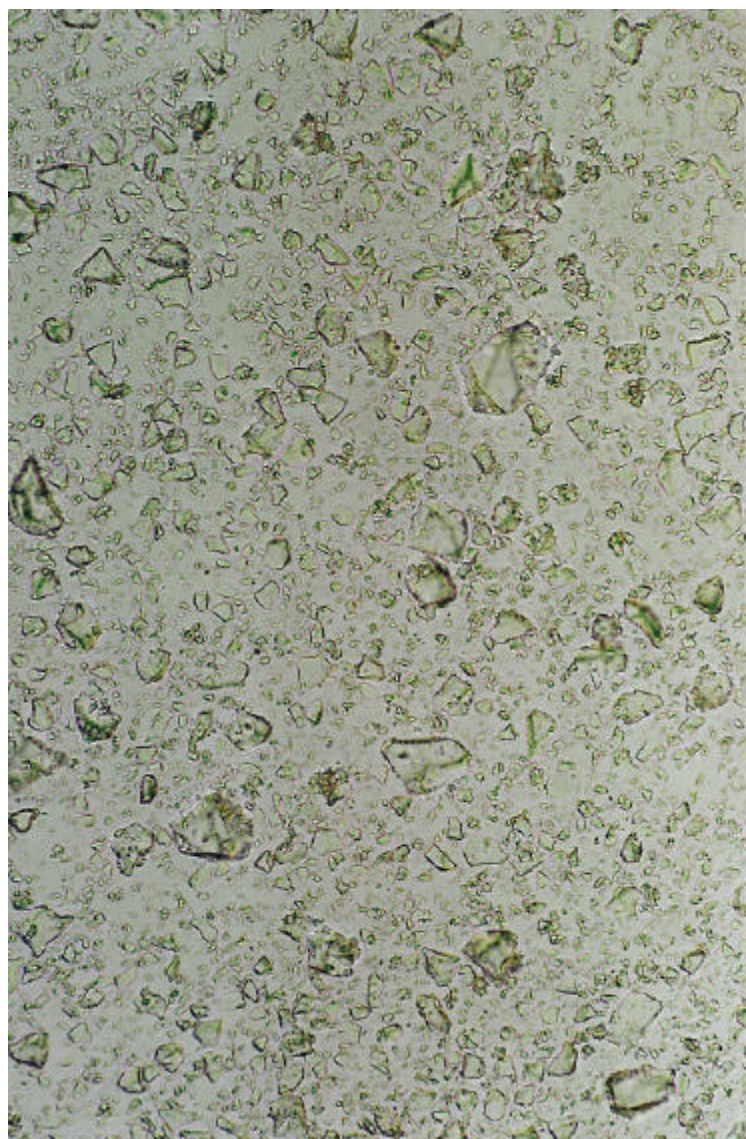
Figur C.3 Glasmel, prøve B, 230X



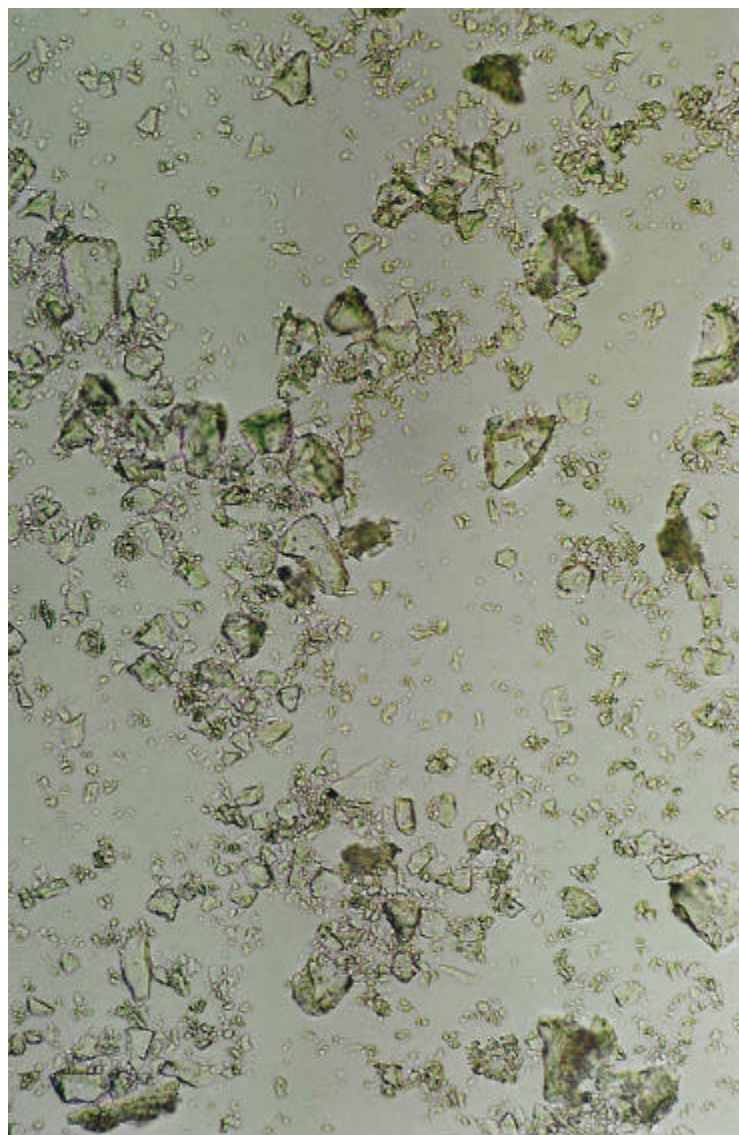
Figur C.4 Glasmel, prøve B, 230X



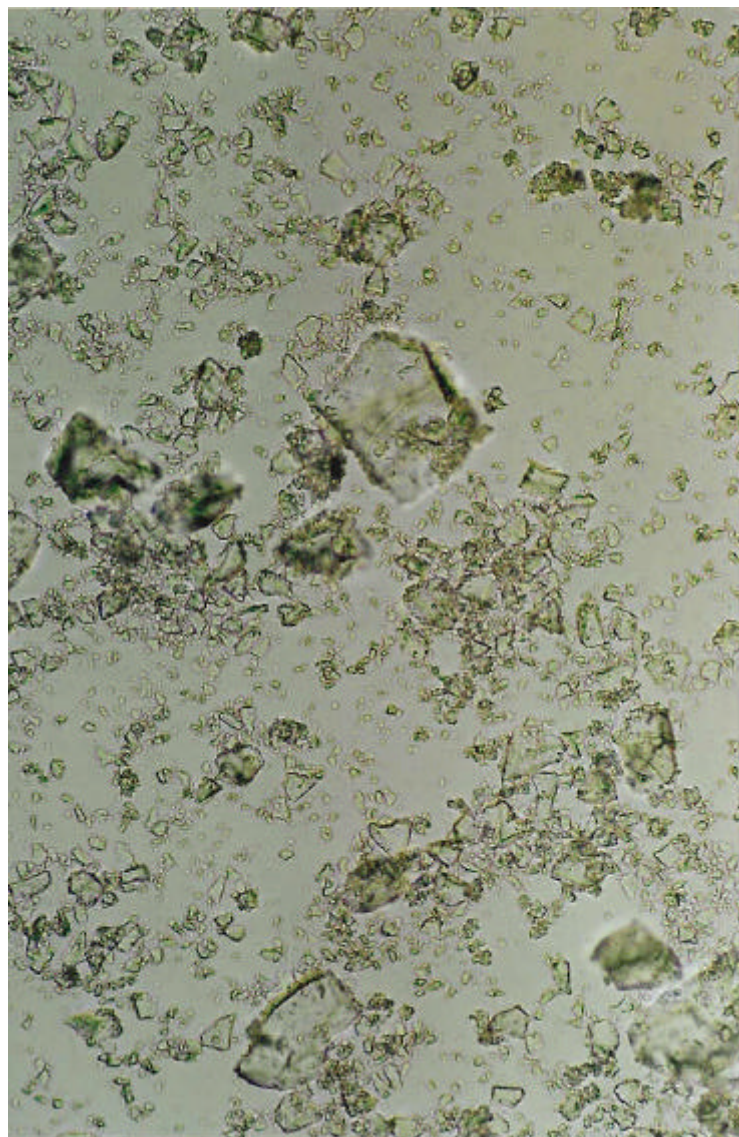
Figur C.5 Glasmei, prøve C 230X



Figur C.6 Glasmel, prøve C 230X



Figur C.7 Glasmel, prøve D, 230X



Figur C.8 Glasmel, prøve D, 230X

D. Recepter til pilotforsøg med beton

Mørtel til måling af styrkeudvikling

Der er blandet i alt 15 forskellige mørtler. Recepterne fremgår af Tabel D.1, Tabel D.2 og Tabel D.3.

Tabel D.1: Mørtler blandet med Norsk Industricement til måling af styrkeudvikling. Alle angivelser er i g (svarende til en mørtelmængde på ca. 0,9 l mørtel).

	NIC ref	NIC G350	NIC G500	NIC K350	NIC K500
Cement, Norsk Industricement	450	337,5	337,5	337,5	337,5
Glasfiller, G350		112,5			
Glasfiller, G500			112,5		
Glasfiller, K350				112,5	
Glasfiller, K500					112,5
Vand	225	225	225	225	225
Sand, kvartssand jf. EN 196-1	1350	1350	1350	1350	1350

Tabel D.2: Mørtler blandet med Lavalkali Sulfatbestandig cement fra Aalborg Portland til måling af styrkeudvikling. Alle angivelser er i g (svarende til en mørtelmængde på ca. 0,9 l mørtel).

	LASF ref	LASF G350	LASF G500	LASF K350	LASF K500
Cement, Lavalkali Sulfatbestandig	450	337,5	337,5	337,5	337,5
Glasfiller, G350		112,5			
Glasfiller, G500			112,5		
Glasfiller, K350				112,5	
Glasfiller, K500					112,5
Vand	225	225	225	225	225
Sand, kvartssand jf. EN 196-1	1350	1350	1350	1350	1350

Tabel D.3: Mørtler blandet med Aalborg White® cement fra Aalborg Portland til måling af styrkeudvikling. Alle angivelser er i g (svarende til en mørtelmængde på ca. 0,9 l mørtel).

	AaW ref	AaW G350	AaW G500	AaW K350	AaW K500
Cement, Aalborg White®	450	337,5	337,5	337,5	337,5
Glasfiller, G350		112,5			
Glasfiller, G500			112,5		
Glasfiller, K350				112,5	
Glasfiller, K500					112,5
Vand	225	225	225	225	225
Sand, kvartssand jf. EN 196-1	1350	1350	1350	1350	1350

Pasta til måling af vandbehov og begyndende afbinding

Nedenfor angives kun pastaens pulverkombination, se Tabel D.4, Tabel D.5 og Tabel D.6. Der tilsættes vand, indtil den ønskede konsistens er opnået, jf. resultater for måling af vandbehov.

Tabel D.4: Pulverkombination med Norsk Industricement til pasta til måling af vandbehov. Alle angivelser er i g.

	NIC ref	NIC G350	NIC G500	NIC K350	NIC K500
Cement, Norsk Industricement	500	375	375	375	375
Glasfiller, G350		125			
Glasfiller, G500			125		
Glasfiller, K350				125	
Glasfiller, K500					125

Tabel D.5: Pulverkombination med Lavalkali Sulfatbestandig cement fra Aalborg Portland til pasta til måling af vandbehov. Alle angivelser er i g.

	NIC ref	NIC G350	NIC G500	NIC K350	NIC K500
Cement, Lavalkali Sulfatbestandig	500	375	375	375	375
Glasfiller, G350		125			
Glasfiller, G500			125		
Glasfiller, K350				125	
Glasfiller, K500					125

Tabel D.6: Pulverkombination med Aalborg White® cement til pasta til måling af vandbehov. Alle angivelser er i g.

	NIC ref	NIC G350	NIC G500	NIC K350	NIC K500
Cement, Aalborg White®	500	375	375	375	375
Glasfiller, G350		125			
Glasfiller, G500			125		
Glasfiller, K350				125	
Glasfiller, K500					125

Mørtel til måling af alkali/kisel-reaktivitet

Recepterne fremgår af Tabel D.7 og Tabel B.8.

Tabel D.7: Mørtler med ikke-reaktivt sand til måling af alkali/kisel-reaktivitet forårsaget af glas.

	HV-G350	HV-K350
Cement, Lavalkali Sulfatbestandig cement fra Aalborg Portland	337,5	337,5
Glasfiller, G350	112,5	
Glasfiller, K350		112,5
Vand	225	225
Plastificeringsmiddel, Melment L10 fra NBK	6	6
Sand, Hvorvadsbro	1350	1350

Tabel D.8: Mørtler med reaktivt sand til måling af glas' eventuelle forebyggende effekt på alkali/kisel-reaktivitet.

	NM ref	NM FA	NM G350	NM G500	NM K350
Cement, Lavalkali Sulfatbestandig cement fra Aalborg Portland	450	337,5	337,5	337,5	337,5
Flyveaske, B4-aske fra Eminent		112,5			
Glasfiller, G350			112,5		
Glasfiller, G500				112,5	
Glasfiller, K350					112,5
Vand	225	225	225	225	225
Plastificeringsmiddel, Melment L10 fra NBK	4	4	4	4	4
Sand, Nymølle	1350	1350	1350	1350	1350

Recepter til betonforsøg

Recepterne fremgår af Tabel D.9. Recepterne er opgivet svarende til 1 m³ beton. I praksis er der blandet 2x50 l af hver recept.

Tabel D.9: Recepter til betonforsøg (kg/m³). Alle mængder undtagen vand og tilsætningsstoffer er angivet i våd, overfladetør tilstand.

	Beton-ref	Beton-G350
Cement, Lavalkali Sulfatbestandig cement fra Aalborg Portland	315	315
Mikrosilica, pulver fra Elkem	20	20
Flyveaske, B4-aske fra Eminent	59	
Glasfiller, G350		59
Sand, Bårse kl. A 0-4 mm	615	615
Sten, Karlshamn kl. E 4-8 mm	220	220
Sten, Karlshamn kl. E 8-16 mm	330	330
Sten, Karlshamn kl. E 16-32 mm	550	550
Vand	154	154
Plastificeringsmiddel, Conplast 212 fra Fosroc	2,4	2,4
Luftindblandingsmiddel, Conplast 316 AEA 1:5 fra Fosroc	2,4	2,4

Recepter til måling af farveændringer

Recepter til beton til måling af glasfillernes indflydelse på betonens farve fremgår af Tabel D.10.

Tabel D.10: Beton til måling af farveændringer. Alle mængder er angivet i kg (alle materialer undtagen vand er forudsat at være i våd, overfladetør tilstand). De angivne recepter svarer til ca. 35 l beton.

	Farve ref	Farve G350	Farve G500	Farve K350	Farve K500
Cement, Aalborg White® cement fra Aalborg Portland	12,71	11,44	11,44	11,44	11,44
Glasfiller, G350		1,27			
Glasfiller, G500			1,27		
Glasfiller, K350				1,27	
Glasfiller, K500					1,27
Vand	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48
Sand, kvarts 0-0,25 mm	4,28	4,28	4,28	4,28	4,28
Sand, kvarts 0,25-1 mm	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54
Sand, kvarts 1-4 mm	12,82	12,82	12,82	12,82	12,82
Sten, søsten 4-8 mm	15,06	15,06	15,06	15,06	15,06
Sten, søsten 8-16 mm	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46

E. Forsøgsresultater fra pilotforsøg med beton (rådata)

I dette bilag findes måledata, der ikke direkte fremgår af rapporten, fx talmateriale, der ligger til grund for optegning af grafer.

Indledende forsøg med pasta og mørtel

Styrkeudvikling

Resultaterne for styrkeudvikling målt på mørtelprismer fremgår af Tabel E.1, Tabel E.2 og Tabel E.3. Den angivne spredning er for prøveemner fra samme støbning. Da der ikke er foretaget en gentagelse af forsøgene, er det ikke på baggrund af resultaterne muligt at inkludere variationen fra støbning til støbning, så den reelle spredning er større end den beregnede værdi. Det er derfor heller ikke muligt at gennemføre en T-test, der giver et reelt billede af, om resultaterne er forskellige.

Tabel E.1: Styrkeudvikling målt for mørtelprismer med Norsk Industricement jf. EN 196-1. Alle styrker er opgivet i MPa.

	NIC ref	NIC G350	NIC G500	NIC K350	NIC K500
28 døgn					
1	56,5	43,9	46,8	45,2	47,2
2	56,0	44,0	44,6	43,8	45,9
3	54,7	45,2	45,6	44,0	46,4
4	55,9	44,0	46,1	43,7	45,3
5	55,7	44,9	45,1	44,1	46,3
6	56,8	43,9	46,0	44,5	45,0
28 døgn, middel	55,9	44,3	45,7	44,2	46,0
28 døgn, spredning	0,73	0,57	0,79	0,57	0,80
28 døgn, variationskoefficient [%]	1,3	1,3	1,7	1,3	1,7
90 døgn					
1	60,7	50,4	55,5	52,8	57,4
2	58,2	51,1	53,3	51,7	55,3
3	57,8	49,7	52,4	51,6	55,5
4	57,7	49,6	52,1	49,9	55,6
5	57,0	50,9	51,9	52,1	55,9
6	56,1	49,4	52,4	50,7	55,4
90 døgn, middel	57,9	50,2	52,9	51,5	55,9
90 døgn, spredning	1,56	0,72	1,37	1,00	0,80
90 døgn, variationskoefficient [%]	2,7	1,4	2,6	1,9	1,4

Tabel E.2: Styrkeudvikling målt for mørtelprismer med Lavalkali Sulfatbestandig cement jf. EN 196-1. Alle styrker er opgivet i MPa.

	LASF ref	LASF G350	LASF G500	LASF K350	LASF K500
2 døgn					
1	17,0	11,1	12,2	11,8	11,1
2	17,0	11,5	12,1	11,5	11,5
3	17,0	11,2	12,2	11,8	11,4
4	17,2	11,4	12,4	11,9	11,5
5	17,0	11,4	12,1	12,0	11,4
6	16,9	11,7	12,3	11,8	11,8
2 døgn, middel	17,0	11,4	12,2	11,8	11,5
2 døgn, spredning	0,10	0,21	0,12	0,15	0,20
2 døgn, variationskoefficient [%]	0,6	1,8	1,0	1,2	1,8
28 døgn					
1	56,8	39,7	44,7	41,2	43,8
2	58,4	40,8	44,1	41,2	44,3
3	56,5	39,2	45,1	41,5	44,2
4	56,8	40,7	43,9	41,9	44,3
5	57,2	39,0	45,2	41,9	44,9
6	58,0	39,8	44,5	41,7	44,4
28 døgn, middel	57,3	39,9	44,6	41,6	44,3
28 døgn, spredning	0,75	0,74	0,52	0,32	0,36
28 døgn, variationskoefficient [%]	1,3	1,9	1,2	0,8	0,8

Tabel E.3: Styrkeudvikling målt for mørtelprismer med Aalborg White® cement jf. EN 196-1. Alle styrker er opgivet i MPa.

	AaW ref	AaW G350	AaW G500	AaW K350	AaW K500
2 døgn					
1	32,7	22,6	24,7	22,5	22,8
2	33,4	22,8	24,7	23,2	23,2
3	31,7	22,6	24,6	23,0	23,2
4	33,1	22,5	24,9	22,4	23,6
5	32,3	22,5	24,9	22,5	23,3
6	33,3	22,5	25,2	22,5	23,4
2 døgn, middel	32,7	22,6	24,8	22,7	23,2
2 døgn, spredning	0,67	0,13	0,22	0,31	0,27
2 døgn, variationskoefficient [%]	2,1	0,6	0,9	1,4	1,1
28 døgn					
1	72,9	49,8	54,3	52,6	53,2
2	73,4	51,3	55,7	52,3	53,3
3	72,9	50,5	54,4	51,8	53,9
4	72,7	51,0	55,6	50,6	53,7
5	73,2	51,2	54,8	52,3	53,9
6	71,5	51,0	56,7	52,5	54,5
28 døgn, middel	72,8	50,8	55,2	52,0	53,7
28 døgn, spredning	0,67	0,56	0,95	0,73	0,47
28 døgn, variationskoefficient [%]	0,9	1,1	1,7	1,4	0,9

Vandbehov og tid til begyndende afbinding

De registrerede vandbehov fremgår af Tabel E.4.

Tabel E.4: Vandbehov for forskellige kombinationer af cement og glasfiller. Vandbehovet er angivet som den mængde vand i forhold til pulvervægten, der er nødvendig for at opnå en på forhånd fastsat konsistens. Alle angivelser er i %.

	ref	G350	G500	K350	K500
Norsk Industricement (NIC)	33,1	30,1	30,9	30,8	30,8
Lavalkali Sulfatbestandig cement (LASF)	24,5	25,0	25,5	25,6	25,6
Aalborg White® cement (AaW)	29,0	29,0	29,6	29,8	29,4

De målte tider frem til begyndende afbinding fremgår af Tabel E.5.

Tabel E.5: Tidspunkt for begyndende afbinding. Alle angivelser er i minutter.

	ref	G350	G500	K350	K500
Norsk Industricement (NIC)	120	120	110	150	140
Lavalkali Sulfatbestandig cement (LASF)	135	155	145	150	140
Aalborg White® cement (AaW)	100	105	110	120	110

Alkali/kisel-reaktivitet

Alle prismer blev målt umiddelbart efter afformning og igen efter 28 dage efter støbning. I den mellemliggende periode var prismerne vandlagret ved 20°C. Der kunne ikke konstateres nogen længdeændring i denne periode før selve forsøgsperioden.

Nedenstående data, se Tabel E.6 og Tabel E.7: Ekspansion målt for prismer med reaktivt sand (Nymølle), vedrører selve forsøgsperioden, hvor prøveemnerne lagres i en mættet NaCl-opløsning ved 50°C.

Tabel E.6: Ekspansion målt for prismer med ikke-reaktivt sand (Hvorvadsbro).

		Initialmåling		Tid i uger					
		[mm] ¹	[µm] ²	2	4	8	12	16	20
HV-G350	1	174,6	5985	5949	5955	5974	5968	5941	5955
	2	174,5	5777	5740	5742	5761	5756	5731	5739
	3	174,6	5802	5777	5781	5800	5792	5768	5786
HV-K350	1	175,2	6423	6394	6372	6388	6378	6356	6354
	2	175,3	6484	6530	6463	6481	6469	6433	6441
	3	175,1	6298	6274	6236	6252	6245	6217	6213

1. Målt med skydelære (incl. tappe)
2. Målt ved indsættelse i referencebænk med mikrometerskrue

Tabel E.7: Ekspansion målt for prismer med reaktivt sand (Nymølle).

		Initialmåling		Tid i uger					
		[mm] ¹	[µm] ²	2	4	8	12	16	20
NM-ref	1	175,9	7113	7240	7534	7783	7794	7772	7772
	2	175,6	6835	6927	7262	7409	7413	7412	7427
	3	175,1	6332	6417	6733	6876	6877	6861	6872
NM-FA	1	175,9	7112	7078	7081	7109	7099	7064	7069
	2	175,8	6972	6941	6945	6969	6962	6926	6929
	3	175,2	6467	6439	6453	6463	6453	6423	6433
NM-G350	1	176,2	7422	7393	7398	7422	7421	7383	7390
	2	176,0	7198	7184	7175	7204	7197	7158	7166
	3	176,3	7508	7489	7481	7507	7503	7468	7476
NM-G500	1	176,2	7456	7412	7425	7452	7439	7417	7423
	2	176,5	7696	7657	7666	7689	7679	7657	7666
	3	176,4	7627	7596	7607	7630	7644	7599	7615
NM-K350	1	175,6	6846	6858	6845	6960	6969	6949	5953
	2	176,2	7425	7420	7427	7561	7592	7580	7645
	3	175,8	7031	7011	7025	7114	7126	7171	7196

1. Målt med skydelære (incl. tappe)
2. Målt ved indsættelse i referencebænk med mikrometerskrue

Betonforsøg

Måleresultater fra betonforsøg fremgår af Tabel E.8-Tabel E.13.

Tabel E.8: Friskbetonegenskaber.

	Beton-ref			Beton-G350		
	1	2	middel	1	2	middel
Sætmål [mm]	140	150	145	150	160	155
Densitet [kg/m ³]	2228	2270	2249	2188	2214	2201
Luftindhold ¹ [%]	7,7	5,9	6,8	9,7	8,6	9,2
Temperatur [°C]	26	26	26	26	25	25,5

1. Beregnet på baggrund af densitet og receptoplysninger.

Tabel E.9: Trykstyrkeudvikling (alle styrker er opgivet i MPa).

	Beton-ref			Beton-G350		
	1	2	middel	1	2	middel
2 døgn	14,2	-	14,2	10,1	-	10,1
7 døgn	26,7	-	26,7	22,1	-	22,1
28 døgn	46,2	44,1	45,2	33,5	33,7	33,6
56 døgn	50,8	50,0	50,4	38,0	37,4	37,7

Tabel E.10: Chloridmigrationskoefficienter målt jf. NT BUILD 492 (alle værdier er opgivet i 10⁻¹² m²/s).

Beton-ref				Beton-G350			
1	2	3	middel	1	2	3	middel
4,0	2,2	3,0	3,1	2,6	2,4	2,6	2,5

Tabel E.11: Luftporefordeling (% af betonens volumen).

Diameter [μm]	Beton-ref			Beton-G350		
	1	2	middel	1	2	middel
0-10	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
10-20	0,05	0,05	0,05	0,09	0,09	0,09
20-30	0,08	0,11	0,10	0,19	0,13	0,16
30-40	0,21	0,19	0,20	0,33	0,25	0,29
40-50	0,36	0,29	0,33	0,56	0,43	0,49
50-60	0,56	0,57	0,56	0,86	0,70	0,78
60-80	0,99	1,04	1,01	1,46	1,24	1,35
80-100	1,54	1,53	1,54	2,21	1,63	1,92
100-120	2,29	2,08	2,18	2,87	2,19	2,53
120-140	2,75	2,60	2,67	3,43	2,56	2,99
140-160	3,28	2,99	3,13	3,99	3,10	3,54
160-180	3,48	3,16	3,32	4,58	3,25	3,92
180-200	3,59	3,60	3,60	4,83	3,58	4,21
200-220	3,99	3,61	3,80	5,00	3,90	4,45
220-240	4,03	3,83	3,93	5,28	3,97	4,62
240-260	4,31	4,01	4,16	5,32	4,20	4,76
260-280	4,47	3,96	4,22	5,75	4,22	4,98
280-300	4,59	4,29	4,44	5,72	4,33	5,02
300-350	4,81	4,28	4,55	5,79	4,46	5,13
350-400	4,91	4,46	4,69	6,05	4,53	5,29
400-450	4,92	4,51	4,72	6,10	4,71	5,41
450-500	5,01	4,62	4,82	6,27	4,81	5,54
500-1000	5,19	4,83	5,01	6,54	4,92	5,73
1000-1500	5,21	4,84	5,03	6,54	5,01	5,77
1500-2000	5,09	4,89	4,99	6,62	5,01	5,82
2000-2500	5,36	4,70	5,03	6,59	4,96	5,77
2500-3000	5,53	5,13	5,33	6,76	4,85	5,80
3000-4000	5,53	5,13	5,33	6,76	5,33	6,04

Tabel E.12: Parametre bestemt på baggrund af luftporeanalyse.

	Beton-ref			Beton-G350		
	1	2	middel	1	2	middel
Totalt luftindhold, vol. %	5,8	5,4	5,6	7,1	5,6	6,4
Specifik overflade, mm^{-1}	50	52	51	55	54	55
Afstandsfaktor, mm	0,09	0,09	0,09	0,07	0,09	0,08
Mikroluftindhold, vol. %	4,6	4,3	4,5	5,7	4,3	5,0

Tabel E.13: Afskalning under frostprøvning jf. SS 13 72 44. Alle værdier er opgivet i g/m^2 .

	1	2	3	4	middel	Akk. Afsk.
Beton-ref.						
7 døgn	14,4	9,7	14,1	21,2	14,8	14,8
14 døgn	6,2	9,0	8,0	12,6	8,9	23,8
28 døgn	24,0	22,8	32,2	30,4	27,4	51,1
42 døgn	11,0	11,0	13,4	11,3	11,7	62,8
56 døgn	8,9	9,0	2,0	4,0	6,0	68,8
Beton-G350						
7 døgn	23,4	18,8	19,8	19,2	20,3	20,3
14 døgn	8,2	7,7	6,8	7,5	7,6	27,9
28 døgn	4,1	4,2	4,1	5,5	4,5	32,3
42 døgn	16,5	20,2	24,6	26,0	21,8	54,2
56 døgn	13,1	9,0	11,6	16,4	12,5	66,7

Måling af farveændring

Resultaterne af farvemålinger på betonfliser fremgår af Tabel E.14

Tabel E.14: Farvemålinger på betonfliser.

	Refleksion (Hunters L-værdi)			Rød/grøn-balance (Hunters a-værdi)			Gul/blå-balance (Hunters b-værdi)		
	1 d.	14 d.	28 d.	1 d.	14 d.	28 d.	1 d.	14 d.	28 d.
Farve-ref	78,42	81,95	82,38	-0,29	-0,16	-0,17	4,02	3,49	3,43
Farve-G350	76,59	82,09	82,29	-0,33	-0,52	-0,48	4,06	3,58	3,55
Farve-G500	78,00	81,95	82,44	-0,47	-0,41	-0,47	3,69	3,11	3,08
Farve-K350	77,20	82,69	82,78	-0,10	-0,29	-0,22	3,55	3,11	3,06
Farve-K500	79,32	82,90	83,51	-0,25	-0,17	-0,23	3,70	3,25	3,23

På de fem forskellige betoner, der er benyttet til farvemålinger, er der tillige foretaget målinger af trykstyrke 2 og 28 døgn efter støbning, se Tabel E.15.

Tabel E.15: Styrkeudvikling målt for betoncylindre. Alle styrker er opgivet i MPa.

	Farve ref	Farve G350	Farve G500	Farve K350	Farve K500
2 døgn	34,6	30,5	33,1	31,3	32,5
28 døgn	62,9	59,5	59,0	58,5	60,2
Aktivitetsfaktor ¹ for glasfiller beregnet på baggrund af 28 døgn styrker	-	0,58	0,51	0,45	0,66

1. Se nedenstående forklaring.

Forklaring på beregning af aktivitetsfaktoren

Den såkaldte "Bolomeys formel" anvendes ofte til at beskrive sammenhængen mellem betons trykstyrke og betonens forhold mellem vand og cement. For beton uden andre pulvere end cement ser Bolomeys formel således ud:

$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/c} - a \right)$$

hvor

- f_c er betonens trykstyrke
- v/c er forholdet mellem betonens vandindhold og cementindhold (mængder angivet ved deres vægt)
- K er en faktor, der afhænger af cementtypen (jo større cementens styrkepotentiale er, jo højere er K -værdien)
- a er en faktor, der ved beregning af betonens 28 døgn styrke sættes til 0,5

Ved tilsætning af puzzolanske materialer som fx flyveaske, er det nødvendigt at udvide Bolomeys formel

$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/(c + \sum k_i \cdot P_i)} - a \right)$$

hvor

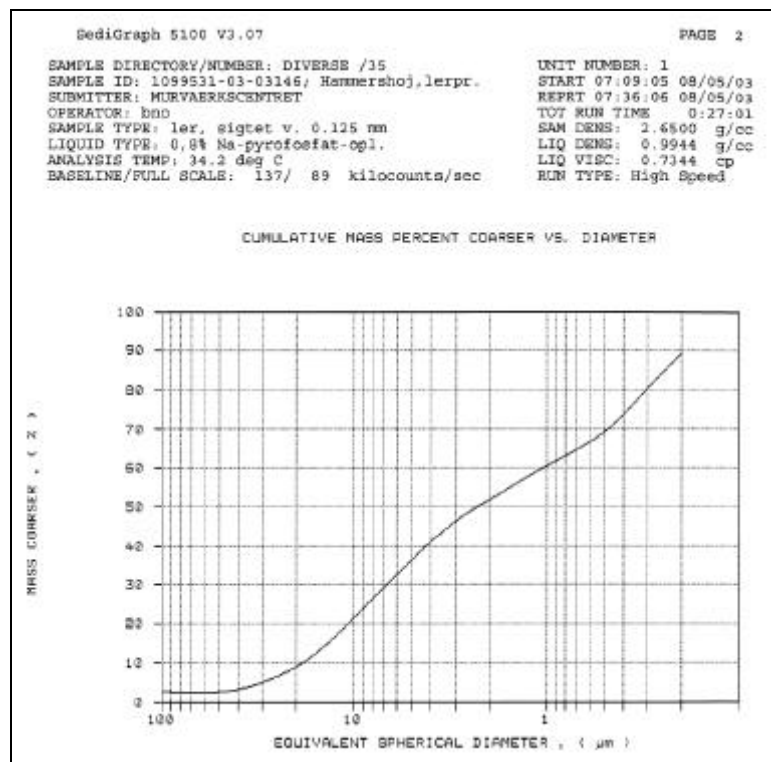
- K og a er uændrede i forhold til Bolomeys formel for beton, hvor cement er det eneste pulver
- P_i er mængden af det i 'te puzzolanske pulver, fx flyveaske, mikrosilica eller glasfiller
- k_i er det i 'te pulvers aktivitetsfaktor. $k_i \cdot P_i$ er den ækvivalente cementmængde, der kan erstatte det i 'te pulver, uden at styrken ændres.

Ved måling af styrke for to betoner, hvor den ene kun indeholder cement og den anden indeholder samme cement samt et puzzolansk pulver (og hvor alle øvrige parametre vedr. tilslag med mere er uændrede), kan der opstilles to ligninger med to ubekendte: K og k_i . Det er disse to ligninger, der er løst, for at finde aktivitetsfaktorene (k_i -værdierne) for de forskellige glasfillere i Tabel E.15. Ved anvendelse af mere end to pulvere, fx tre-pulver-kombinationer, kræves der tilsvarende flere blandinger for at kunne beregne de ubekendte.

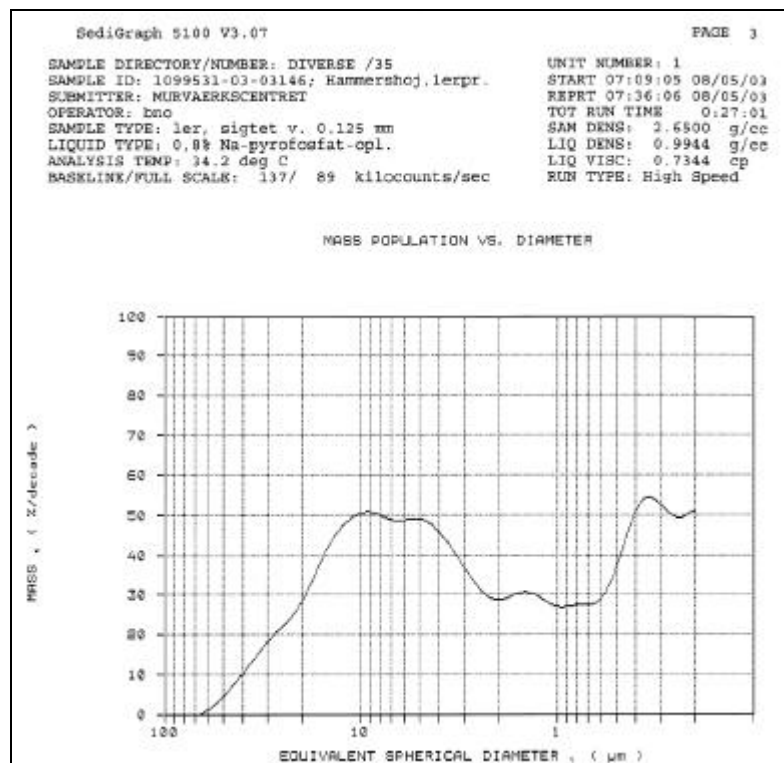
F. Kornstørrelsesfordeling lerblandinger

SediGraph 5100 V3.07			PAGE 1
SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DIVERSE /35			UNIT NUMBER: 1
SAMPLE ID: 1099531-03-03146; Hammershøj, lerpr.			START 07:09:05 08/05/03
SUBMITTER: MURVAERKSCENTRET			REPT 07:36:06 08/05/03
OPERATOR: bno			TOT RUN TIME 0:27:01
SAMPLE TYPE: ler, sigtet v. 0.125 mm			SAM DENS: 2.6500 g/cc
LIQUID TYPE: 0.8% Na-pyrophosphat-opl.			LIQ DENS: 0.9944 g/cc
ANALYSIS TEMP: 34.2 deg C			LIQ VISC: 0.7344 cp
BASELINE/FULL SCALE: 137/ 89 kilocounts/sec			RUN TYPE: High Speed
STARTING DIAMETER: 100.00 µm			REYNOLDS NUMBER: 1.66
ENDING DIAMETER: 0.20 µm			FULL SCALE MASS %: 100
MASS DISTRIBUTION			
MEDIAN DIAMETER: 2.32 µm		MODAL DIAMETER: 0.35 µm	
DIAMETER (µm)	CUMULATIVE MASS COARSER (%)	MASS IN INTERVAL (%)	
100.00	2.5	2.5	
80.00	2.3	-0.2	
60.00	2.2	-0.1	
50.00	2.4	0.2	
40.00	3.1	0.7	
30.00	4.9	1.8	
25.00	6.5	1.6	
20.00	8.9	2.4	
15.00	13.3	4.4	
10.00	21.6	8.3	
8.00	26.5	4.9	
6.00	32.7	6.1	
5.00	36.5	3.9	
4.00	41.2	4.6	
3.00	46.3	5.2	
2.00	51.9	5.5	
1.50	55.6	3.7	
1.00	60.7	5.1	
0.80	63.3	2.6	
0.60	66.8	3.5	
0.50	69.3	2.6	
0.40	73.7	4.3	
0.30	80.4	6.7	
0.20	89.3	8.9	

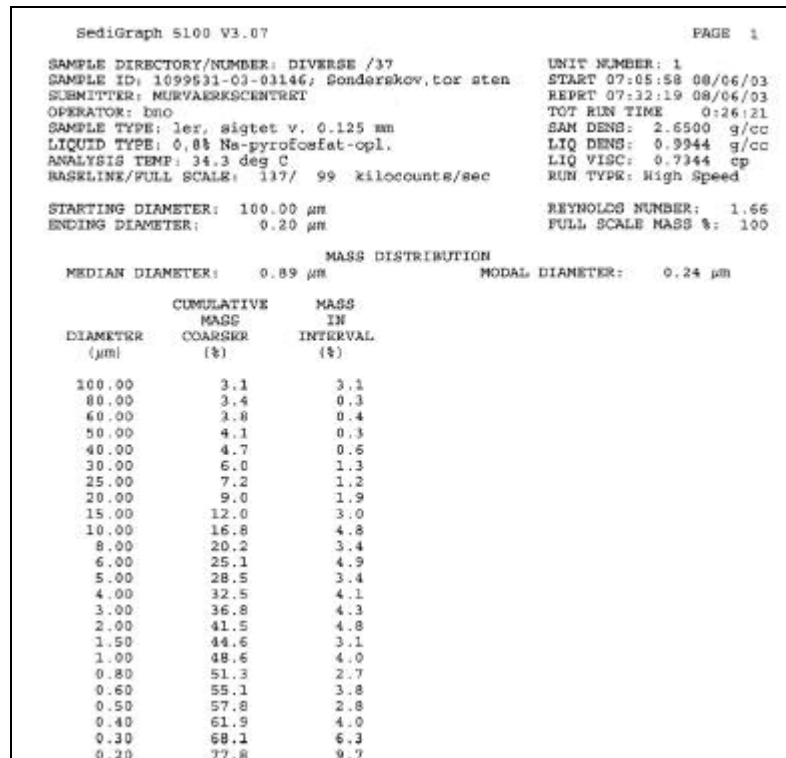
Figur F.1 Kornstørrelsesfordeling lerblandinger. Hammershøj Teglværk.



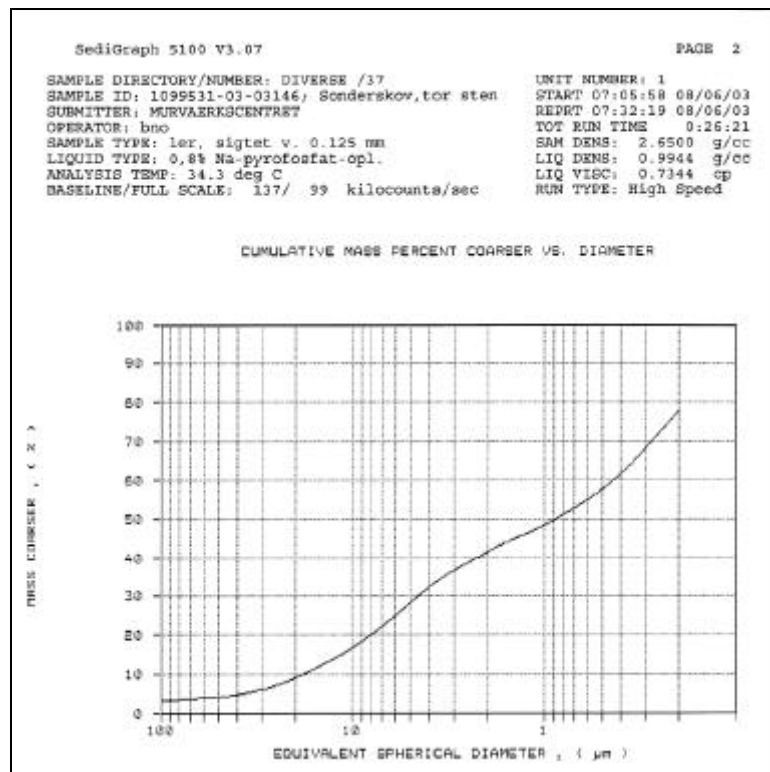
Figur F.2 Kornstørrelsesfordeling lerblanding. Hammershøj Teglværk.



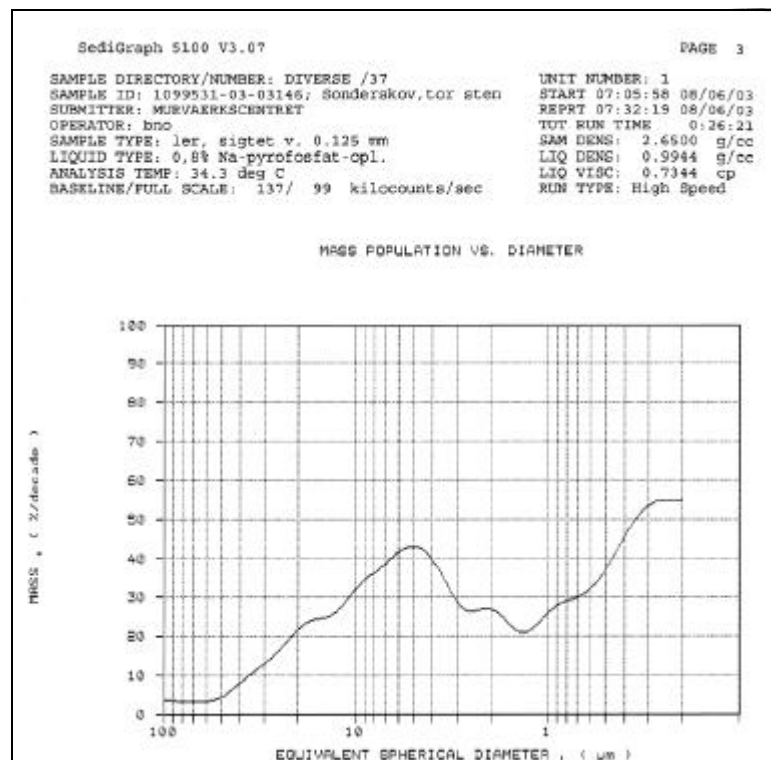
Figur F.3 Kornstørrelsesfordeling lerblanding. Hammershøj Teglværk.



Figur F.4. Kornstørrelsesfordeling, Strygeler, Sønderkov Teglværk



Figur F.5. Kornstørrelsesfordeling, Strygeler, Sønderkov Teglværk



Figur F.6. Kornstørrelsesfordeling, Strygeler, Sønderkov Teglværk

G. Mikroskopibilleder af teglblandinger



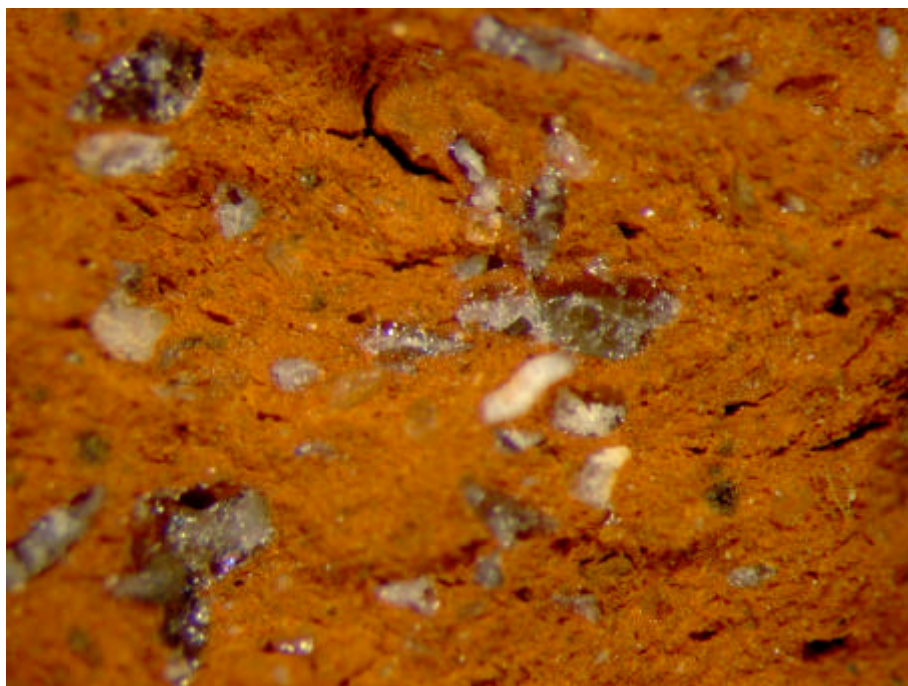
Figur G.1 Prøve A Hammershøj - glassand 975°C. Synsflade – Forstørrelse 24x



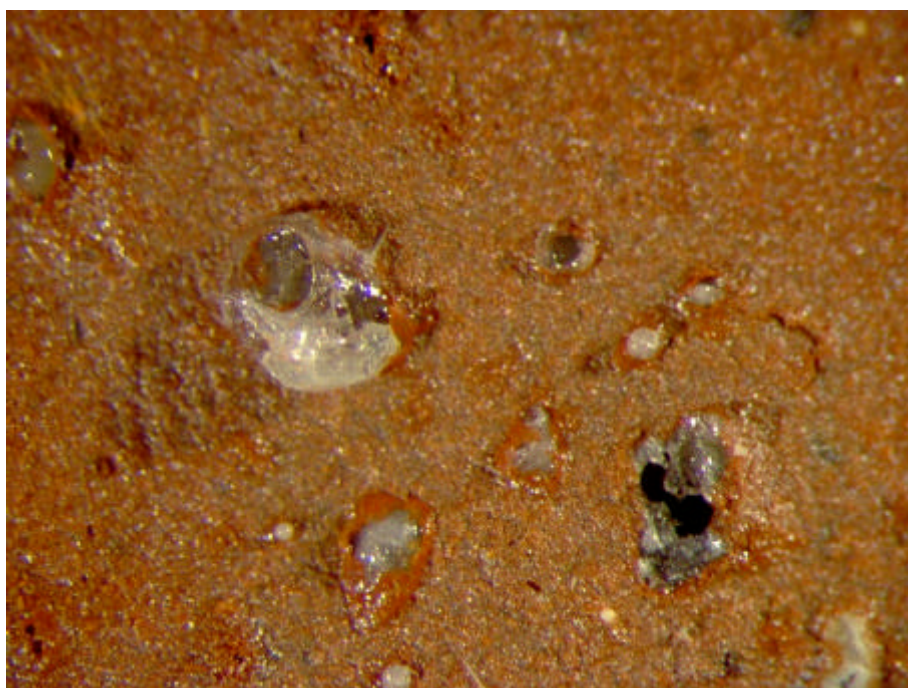
Figur G.2. Prøve A Hammershøj – glassand 975°C Brudflade – Forstørrelse 24x



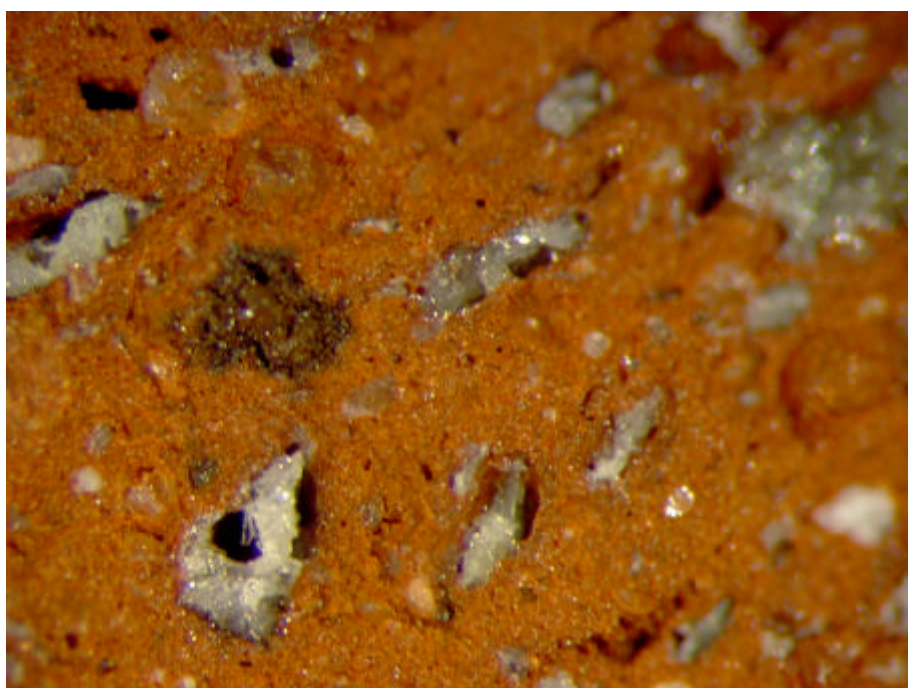
Figur G.3. Prøve A Hammershøj – glassand 1000°C Synsflade – Forstørrelse 24x



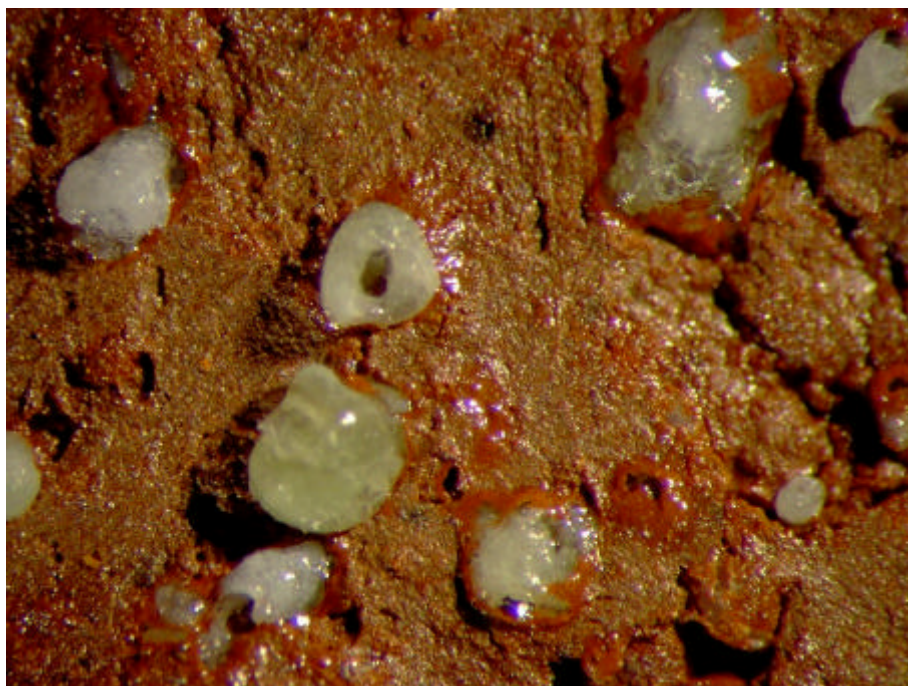
Figur G.4. Prøve A Hammershøj – glassand 1000°C Brudflade – Forstørrelse 24x



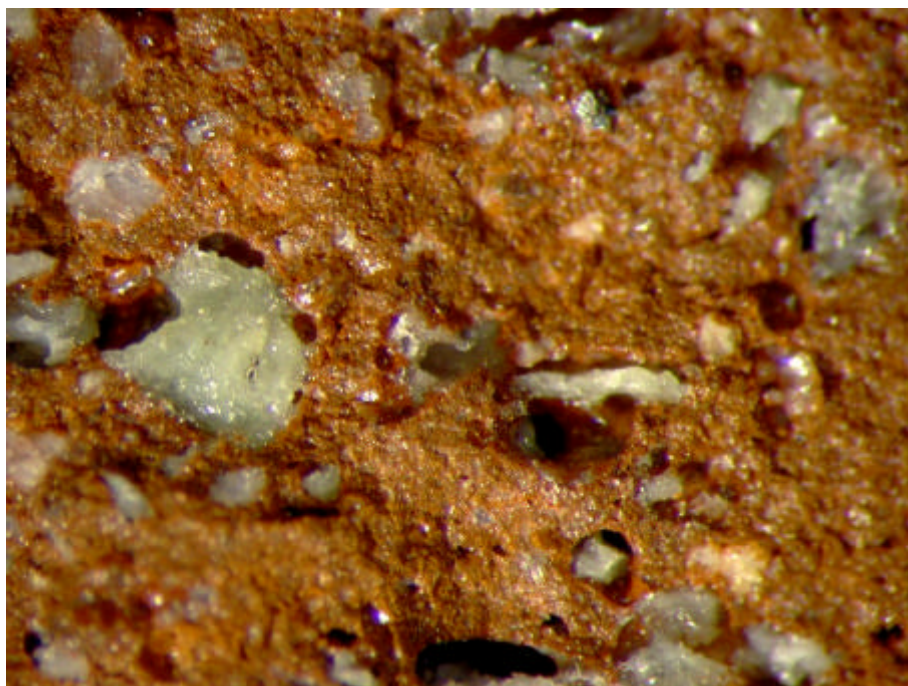
Figur G.5. Prøve A Hammershøj – glassand 1025°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.6. Prøve A Hammershøj – glassand 1025°C Brudflade – Forstørrelse 24x



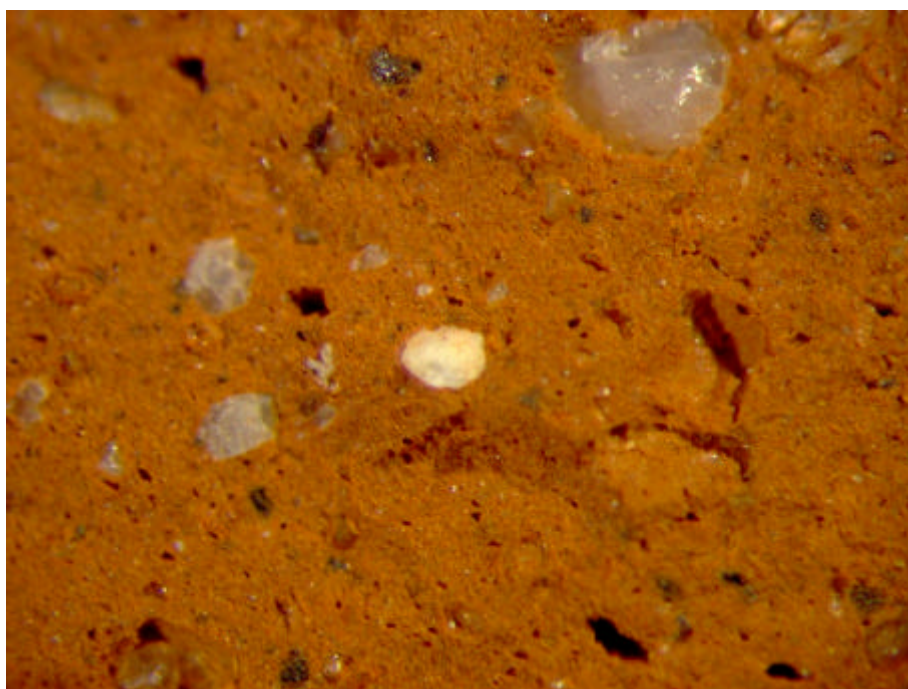
Figur G.7. Prøve A Hammershøj – glassand 1050°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.8. Prøve A Hammershøj – glassand 1025°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.9. Prøve B Hammershøj – glasmel 975°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.10. Prøve B Hammershøj – glasmel 975°C Brudflade – Forstørrelse 24x



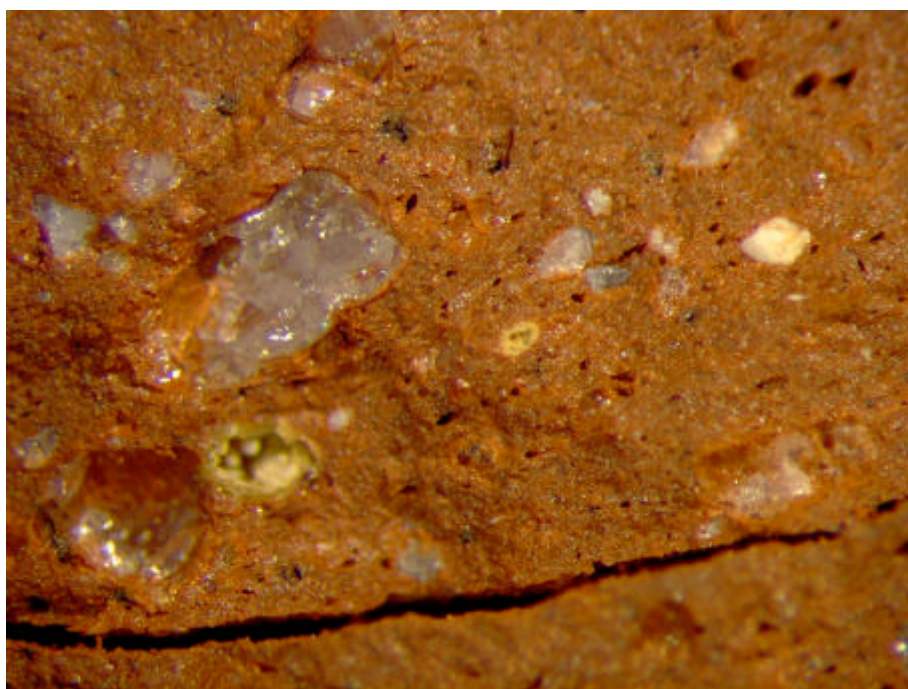
Figur G.11 Prøve B Hammershøj – glasmel 1000°C Synsflade – Forstørrelse 24x



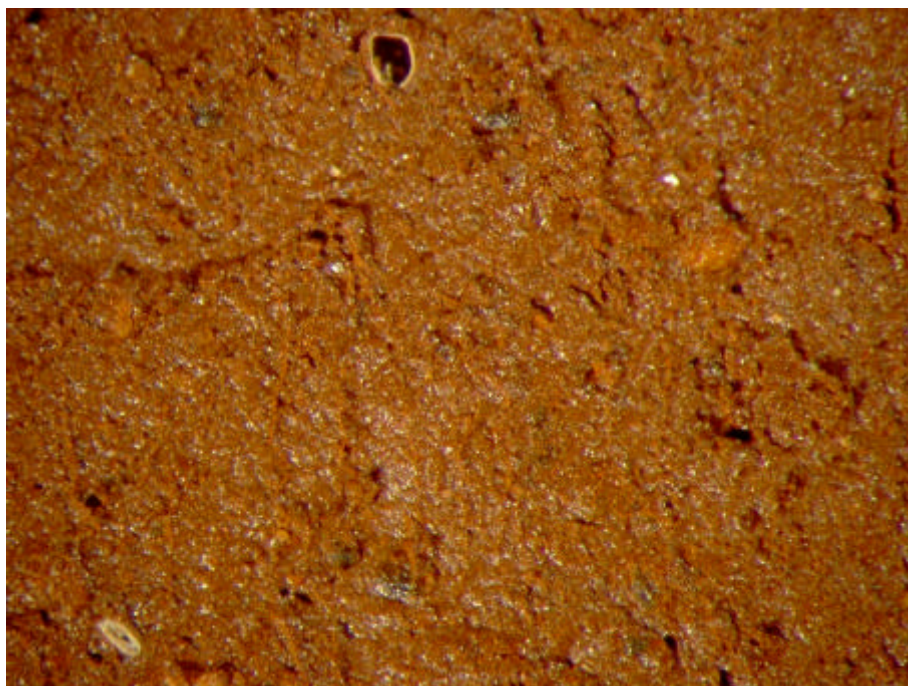
Figur G.12. Prøve B Hammershøj – glasmel 1000°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.13. Prøve B Hammershøj – glasmel 1025°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.14. Prøve B Hammershøj – glasmel 1025°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.15. Prøve B Hammershøj – glasmel 1050°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.16. Prøve B Hammershøj – glasmel 1050°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.17. Prøve C Hammershøj – reference 975°C Synsflade –
Forstørrelse 24x



Figur G.18. Prøve C Hammershøj – reference 975°C Brudflade –
Forstørrelse 24x



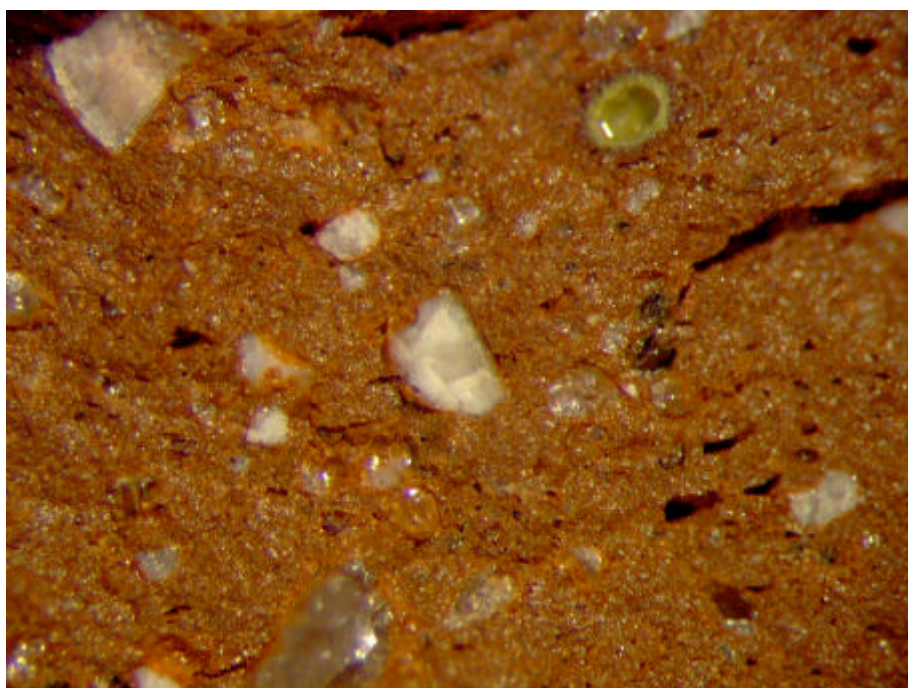
Figur G.19. Prøve C Hammershøj – reference 1000°C Synsflade – Forstørrelse 24x



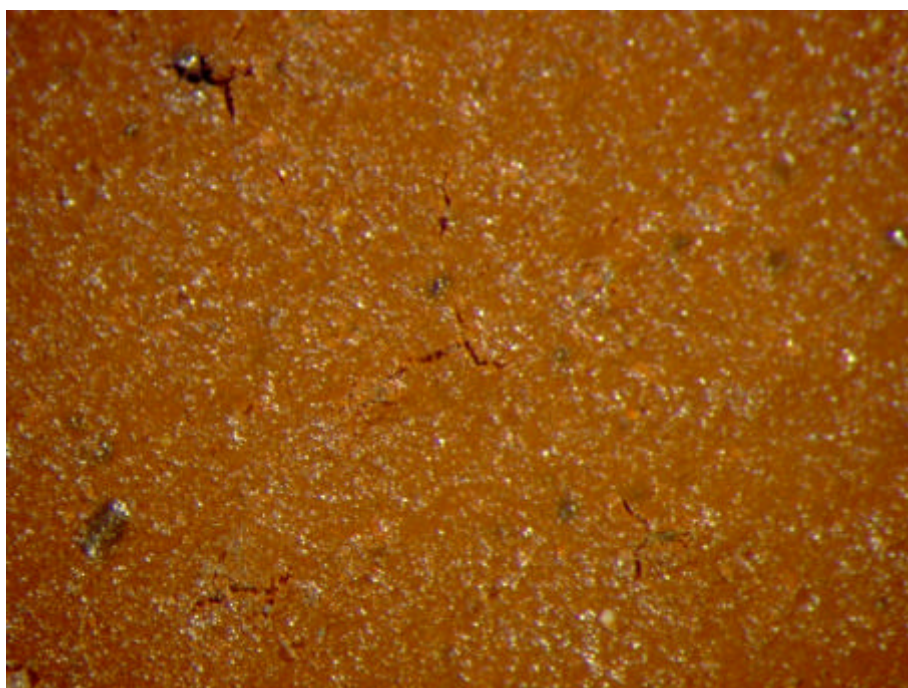
Figur G.20. Prøve C Hammershøj – reference 1000°C Brudflade – Forstørrelse 24x



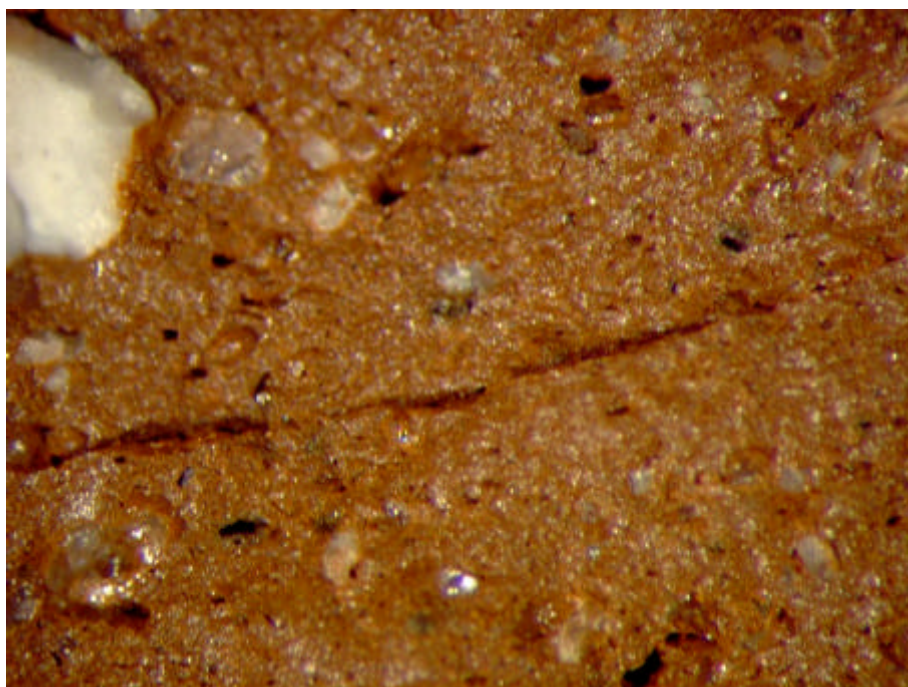
Figur G.21. Prøve C Hammershøj – reference 1025°C Synsflade –
Forstørrelse 24x



Figur G.22. Prøve C Hammershøj – reference 1025°C Brudflade –
Forstørrelse 24x



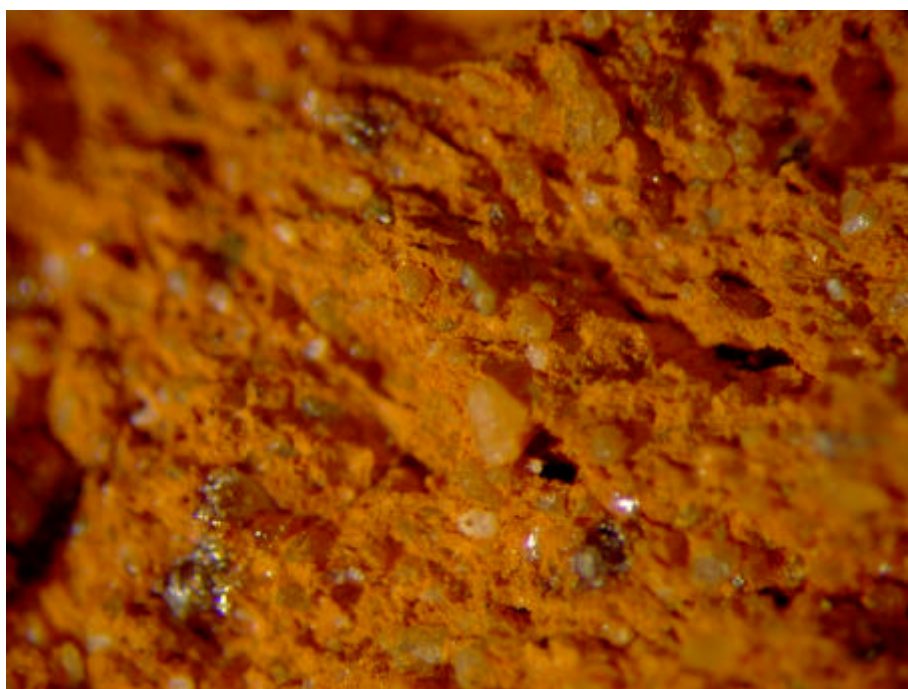
Figur G.23. Prøve C Hammershøj – reference 1050°C Synsflade – Forstørrelse 24x



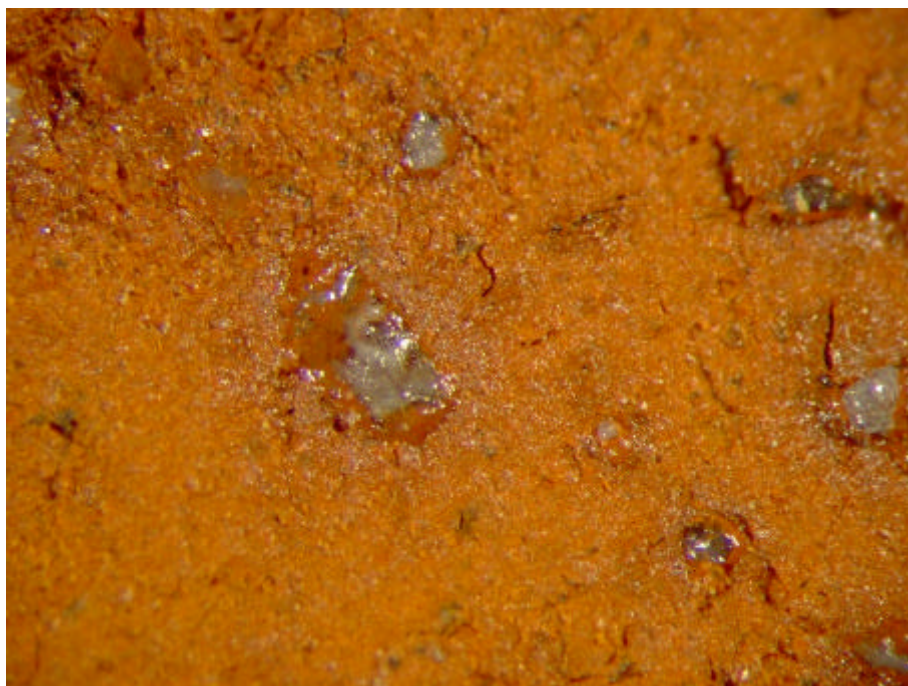
Figur G.24. Prøve C Hammershøj – reference 1050°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.25. Prøve D Sønderkov – glassand 975°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.26. Prøve D Sønderkov – glassand 975°C Brudflade – Forstørrelse 24x



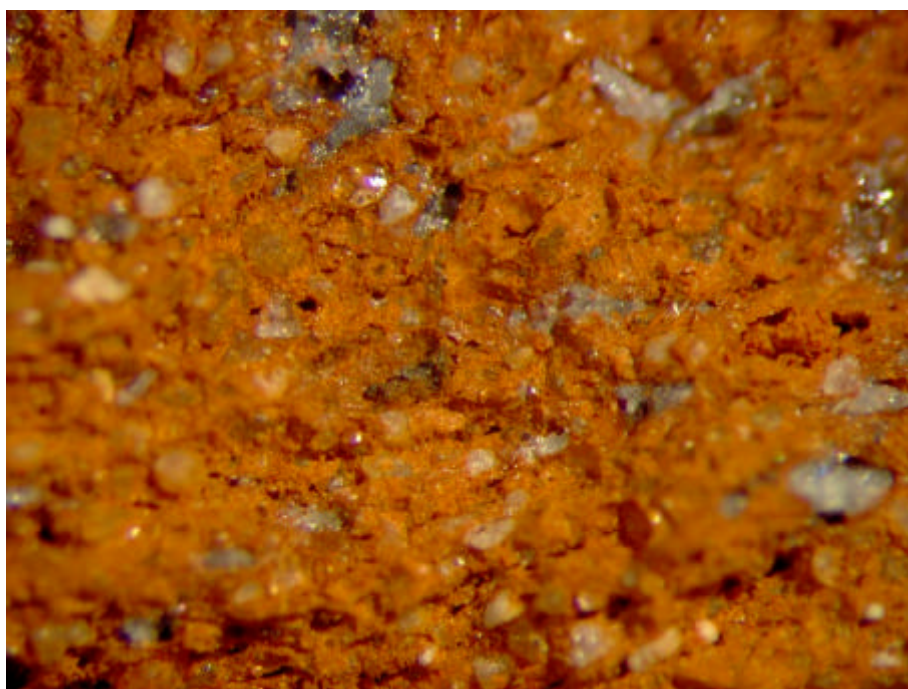
Figur G.27. Prøve D Sønderskov – glassand 1000°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.28. Prøve D Sønderskov – glassand 1000°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.29. Prøve D Sønderkov – glasmel 1025°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.30. Prøve D Sønderkov – glasmel 1025°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.31. Prøve D Sønderkov – glassand 1050°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.32. Prøve D Sønderkov – glassand 1050°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.33. Prøve E Sønderkov – glasmel 975°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.34. Prøve E Sønderkov – glasmel 975°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.35. Prøve E Sønderkov – glasmel 1000°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.36. Prøve E Sønderkov – glasmel 1000°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.37. Prøve E Sønderkov – glasmel 1025°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.38. Prøve E Sønderkov – glasmel 1025°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.39. Prøve E Sønderkov – glasmel 1050°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.40. Prøve E Sønderkov – glasmel 1050°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.41. Prøve F Sønderkov – reference 975°C Synsflade – Forstørrelse 24x



Figur G.42. Prøve F Sønderkov – reference 975°C Brudflade – Forstørrelse 24x



Figur G.43. Prøve F Sønderkov – reference 1000°C Synsflade –
Forstørrelse 24x



Figur G.44. Prøve F Sønderkov – reference 1000°C Brudflade –
Forstørrelse 24x



Figur G.45. Prøve F Sønderskov – reference 1025°C Synsflade –
Forstørrelse 24x



Figur G.46. Prøve F Sønderskov – reference 1025°C Brudflade –
Forstørrelse 24x



Figur G.47. Prøve F Sønderskov - reference 1050°C Synsflade –
Forstørrelse 24x



Figur G.48. Prøve F Sønderskov - reference 1050°C Brudflade –
Forstørrelse 24x