

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

Del 1: Litteraturstudium

Marianne Tange Hasholt og Helge Hansen
Teknologisk Institut

Finn Thøgersen
Vejdirektoratet, 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.

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
1 INDLEDNING	9
2 GLAS TIL BETONPRODUKTION	11
2.1 GENBRUGSGLAS SOM TILSLAG	11
2.2 GENBRUGSGLAS SOM FILLERMATERIALE	12
2.3 ALKALI/KISEL-REAKTIONER	14
2.3.1 <i>Mekanisme for skadesudvikling</i>	14
2.3.2 <i>Forebyggelse</i>	14
2.4 KRAV TIL MATERIALER	16
2.4.1 <i>Partikelstørrelse</i>	16
2.4.2 <i>Andre krav</i>	16
2.5 POTENTIALE	17
2.5.1 <i>Tilslag</i>	17
2.5.2 <i>Fillermateriale</i>	17
3 GLAS TIL TEGLPRODUKTION	19
3.1 ANVENDELSE I SKÆRV	19
3.1.1 <i>Generelle krav</i>	19
3.1.2 <i>Anvendelse af glas i egentlig tegl</i>	21
3.1.3 <i>Anvendelse af glas i teglignende materialer</i>	23
3.1.4 <i>Specielle glastyper</i>	24
3.2 ANVENDELSE I GLASUR	24
3.3 POTENTIALE	25
4 GLAS TIL VEJBYGNING	27
4.1 UDENLANDSKE ERFARINGER	27
4.1.1 <i>USA</i>	27
4.1.2 <i>UK</i>	32
4.1.3 <i>Irland</i>	34
4.1.4 <i>Andre lande</i>	34
4.2 POTENTIALE	34
5 GLAS TIL PRODUKTION AF GLASULD	37
5.1 FORDELE OG ULEMPER VED AT INDDRAGE GENBRUGSGLAS I PRODUKTIONEN AF GLASULD	37
5.2 KRAV TIL MATERIALER	37
5.3 POTENTIALE	37
6 GLAS SOM SANDBLÆSNINGSMATERIALE	41
6.1 FORDELE OG ULEMPER VED BRUG AF GLAS I FORHOLD TIL ANDRE MATERIALER	41
6.2 POTENTIALE	41
7 SAMMENSTILLING AF MULIGHEDER	43
7.1 RELEVANS AF NYE UDVIKLINGSPROJEKTER	43

7.2	KLASSIFICERING AF MATERIALE	43
7.3	LØNSOMHED	44
8	REFERENCER	49
	Bilag A: Winkler-diagram	53
	Bilag B: Laboratorieundersøgelse af glasmel, N-240	55
	Bilag C: Glasurer baseret på glasmel	63

Forord

Nærværende rapport beskriver første 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.

Denne første fase er en kortlægningsfase. Det betyder, at rapporten primært omfatter et litteraturstudium af mulighederne for at genanvende glas i byggematerialer, dvs. beton, tegl, materiale til vejbygning, glasuld og sandblæsningsmateriale.

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 Thrysoe, Aalborg Portland
- Jan Rømsgaard, Vindø Teglværk

Således er rapporten kommenteret af følgegruppen på et møde den 30.01.2003, og følgegruppens kommentarer er efterfølgende indarbejdet i rapporten.

Sammenfatning og konklusioner

Der er i denne rapport indsamlet erfaringer om genanvendelse af glas til byggematerialer fra såvel ind- som udland. Der kan på den baggrund konkluderes følgende:

Beton

Knust glas kan genanvendes i beton, både som tilslag og som filler. Det største potentiale vurderes at være til stede ved anvendelse af glas som fillermateriale. Det er både her, 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), og her 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.

Tegl

Knust glas kan anvendes til produktion af tegl, både i skærven (selve teglmaterialet) og i glasur. I denne sammenhæng er det især anvendelse i skærven, der er interessant, fordi de mængder, der kan anvendes i glasur, er forholdsvis beskedne. Som magringsmiddel kan erstatning af kvartsholdigt sand med knust glas betyde en teknisk forbedring, fordi det mindsker problemerne med at styre det såkaldte kvartsspring. Anvendelse af knust glas som sintringsmiddel har en yderligere miljøfordel, ud over at det afhjælper et affaldsproblem, nemlig at det sænker den temperatur, hvor der sker en sintring i teglet. Derved kan brændingstemperaturen sænkes, hvilket sparer energi.

Materiale til vejbygning

Knust glas kan anvendes både bundet i asfalt ("glasfalt") eller som ubundet materiale i bærelag og fyld. Det er typisk muligt at erstatte 20-30% af det anvendte sand/sten. Ved brug i ubunden form kan det være en ulempe, at glasset skal blandes med andre materialer, og denne ekstra proces vil i nogle tilfælde gøre det for dyrt at anvende glas. Alfa og omega for glassets anvendelighed til vejbygning er desuden, at det kan tilvejebringes i store og ensartede mængder. Der kan bruges op til 3000 tons glas pr. km vej. Det betyder, at alt det glas, der indsamles i Danmark på årsbasis (120-125.000 tons pr. år) kan bruges til bygning af ca. 40 km vej.

Glasuld

Genbrugsglas kan benyttes til fremstilling af glasuld, når krav til partikelstørrelse og kvalitet kan opfyldes. Produktion af glasuld stiller forholdsvis strenge krav til hvor forurenset, glasset må være. Hos den eneste danske producent af glasuld, *Saint-Gobain Isover a/s*, udgør genbrugsglas 80% af det samlede forbrug af glas, men der er primært tale om andre typer glas end flaskeglas. Det vurderes, at der ikke er potentiale for at afsætte væsentlige mængder flaskeglas til glasuldproduktion i Danmark.

Sandblæsningsmateriale

Knust glas kan anvendes til mekanisk afrensning af overflader ved sandblæsning, hvor det typisk vil kunne erstatte kvartssand som blæsemiddel.

Glasset indeholder imidlertid mindre respirabelt kvarts end sand, hvilket er en (arbejds-)miljømæssig fordel. Erfaringer fra Storbritannien tyder på, at glas som blæsemiddel prismæssigt er sammenligneligt med andre blæsemidler, og at der derfor er et potentiale for at anvende knust glas til dette formål.

På baggrund af litteraturstudiet vurderes det, at de mest lovende perspektiver med hensyn til genanvendelse af farvede glasskår findes på områderne: filler materiale til beton, magringsmiddel til teglproduktion, materialer til vejbygning samt materiale til sandblæsning.

Det er ikke muligt alene på baggrund af litteraturstudiet at vurdere hvilke af disse anvendelser, der er de mest fordelagtige med hensyn til økonomi og miljø. Dette kræver bl.a. at der indhentes konkrete/eksperimentelle erfaringer under forhold svarende til dansk praksis på de pågældende områder.

1 Indledning

Som nævnt i baggrundsnotatet *Udvikling og afprøvning af alternative metoder til genanvendelse af farvede glasskår* [1], indsamles der i øjeblikket mere glas i form af glaseballage end hvad der kan genanvendes ved omsmelting til nyt glas. 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). Det forventes ikke at være miljømæssigt og økonomisk hensigtsmæssigt at eksportere det indsamlede glas længere væk til fx Sydeuropa.

Der er i stedet 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 er refereret i de følgende kapitler (kapitel 2-6) med hensyn til genanvendelse af glas i materialerne: Beton, tegl, vejbygningsmateriale, glasuld og sandblæsningsmateriale.

2 Glas til betonproduktion

Beton består meget forenklet af faststofpartikler i form af tilslag (sand og sten), der bindes sammen af en pasta af cement og vand. Knust glas vil både kunne indgå som tilslag i betonen og som fillermateriale i pastafasen, afhængigt af glassets partikelstørrelse.

2.1 Genbrugsglas som tilslag

Knust glas kan anvendes som tilslag i beton [1]. Det kræver, at betonen har et forholdsvist højt pastaindhold, som det også er kendt fra knust stentilslag. De kantede partikler skal så at sige smøres med pasta, for at den friske beton får en god bearbejdelighed.

Glastilslaget ændrer betonens mekaniske egenskaber. Forsøg refereret i [1] viser, at beton med glastilslag har ca. 25% lavere trykstyrke end en sammenlignelig beton med stentilslag. Desuden er brudtøjningen ca. halveret. Det skyldes, at glastilslaget har en glattere overflade end sten, så vedhæftningen mellem tilslag og pastafase forringes.

Tilslaget kan give anledning til skadelige alkali/kisel-reaktioner, se særskilt afsnit herom. Det har ikke været muligt at finde kilder, der omhandler andre holdbarhedsegenskaber, fx frostbestandighed og kloridmodstand, for beton med glas som tilslag. Indtil dette er undersøgt, må det under alle omstændigheder anbefales, at brugen af glas som tilslag begrænses til passivt (indendørs) miljø.

Til gengæld giver glas som tilslag nogle nye arkitektoniske muligheder, hvis tilslaget fritlægges ved fx syrebehandling eller slibning, se Figur 1.



Figur 1: Wiedemann-salen på Steinkjer Rådhus (Norge) med glasmalerier og gulv af beton med glastilslag. Gulvet er slebet for at fremhæve tilslagets blå farve. [2].

2.2 Genbrugsglas som filler materiale

Formalet glas kan også anvendes som filler materiale i beton.

Som nævnt i indledningen, er betonens ene fase en pasta, der i sin simpleste form består af cement og vand. I den friske beton er pastaen blød, og det er bl.a. mængden af pasta, der bestemmer betonens bearbejdelighed: Betonens bearbejdelighed øges med stigende pastaindhold.

Men når pastaindholdet stiger, stiger også cementindholdet. Det fordyrer betonen og kan samtidigt skabe nogle problemer, idet der i forbindelse med cementens hydratisering udvikles varme. Et højt cementindhold kan derfor være en medvirkende årsag til, at der opstår temperaturspændinger i den hærdende beton, der fører til revnedannelse.

Derfor er det allerede almindelig praksis at benytte fillere som en del af pastafasen. De bidrager til pastafasens volumen, uden at bidrage nævneværdigt til varmeudviklingen i betonens tidlige alder. De hyppigst anvendte filler materialer er kalkfiller (Aalborg Portland BASIS[®] cement indeholder ca. 14% kalkfiller), flyveaske og mikrosilica. Kalkfilleren er kemisk inert, mens de to sidstnævnte hører til gruppen af puzzolaner. Det betyder, at de reagerer med calciumhydroxid i betonen og derved danner bindemiddel af samme type som det, der dannes ved cementens hydratisering. Derved bidrager de også til betonens styrkeudvikling.

De kendte filler materialer har også andre positive egenskaber. Fx giver mikrosilica en meget tæt beton, og flyveaske nedsætter kloridindtrængningen ved at binde kloriderne. Samtidigt er brug af et restprodukt som flyveaske med til at løse et miljømæssigt problem, fordi flyveasken så ikke skal deponeres.

Tilsætningen af fillere har imidlertid også nogle ulemper. Eksempelvis øger fillere ofte behovet for tilsætning af kemiske tilsætningsstoffer i betonen i form

af plastificeringsmidler og luftindblandingsmidler. Det stiller også nogle krav til blandedanlægget at kunne håndtere de ekstra materialer (silokapacitet, etc.). Dertil kommer, at forsyningssikkerheden og kvaliteten af fillermaterialer baseret på restprodukter til tider er svingende. Mængden af og prisen på flyveaske og mikrosilica er fx meget afhængig af elprisen i Norge og Sverige.

Den kemiske sammensætning af glas, flyveaske og mikrosilica fremgår af Tabel 1. Tallene er målt for konkrete materialer. Sammensætningen kan derfor variere lidt for fx forskellige flyveasker.

Tabel 1: Kemisk sammensætning (de vigtigste bestanddele) af glas, flyveaske og mikrosilica [1].

	glas	flyveaske	mikrosilica
SiO ₂ (amorf)	73%	41%	97%
Al ₂ O ₃	1%	18%	1%
Fe ₂ O ₃	-	30%	2%
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	74%	89%	99%
Na ₂ O	16%	1%	<1%

Som det ses af Tabel 1, har glas et højt indhold af amorf SiO₂. Dette indikerer, at glasset også kan forventes at have puzzolanske egenskaber. Det samlede indhold af reaktive oxider er dog lavere end for flyveaske og mikrosilica, og derfor har det muligvis en lidt mindre puzzolansk effekt. Men formålet til samme finhed som flyveaske, er det forventeligt, at glasfiller kan benyttes til betonproduktion de samme steder, hvor der i dag anvendes flyveaske.

Anvendelsen af glas som filler i beton er dokumenteret i en række artikler fx [3, 4, 5].

Et gennemgående tema i de kilder, der beskæftiger sig med glas som fillermateriale i beton, er risikoen for skadelige alkali/kisel-reaktioner. Dette emne er beskrevet i særskilt afsnit.

Et andet tema er styrken af beton med glasfiller. Glasfilleren kan ikke blot erstatte cement kg til kg, idet glasfilleren bidrager forholdsvis mindre til betonens styrke end cement (det samme gør sig i øvrigt gældende for flyveaske). Anvendelse af glasfiller behøver dog ikke at betyde en forringelse af betonens styrke, hvis den fx kombineres med anvendelsen af materialer, der bidrager forholdsvis mere til styrken end cement [3, 6].

De fleste kilder på området dækker laboratorieforsøg i forbindelse med videnskabelige undersøgelser. Der haves dog også erfaringer fra kommerciel brug. Fx anvendes glasfilleren *Microfiller*[®] fra Svensk GlasÅtervinning til betonproduktion [7]. Den benyttes bl.a. i Sydsverige, hvor det lokale tilslag har et lavt finstofindhold, og hvor der derfor opnås en bedre partikelgradering og dermed bedre bearbejdelse ved at anvende glasfilleren. Den benyttes også i nogen grad til selvkompakterende beton.

I en hvid beton vil tilsætning af glas som fillermateriale kunne nedsætte fremstillingsprisen. Normalt anvendte hvide fillermaterialer som hvid mikrosilica og hvid slagge er i dag relativt dyre og svære at skaffe. Et billigt fillermateriale i form af nedknust glas vil medvirke til en bredere anvendelse af hvid cement til beton i bygningskonstruktioner.

2.3 Alkali/kisel-reaktioner

2.3.1 Mekanisme for skadesudvikling

Når kisel (amorf SiO_2) kommer i kontakt med en alkaliholdig væske, sker der en kemisk reaktion. Reaktionsproduktet er en hygroskopisk gel, dvs. en gel, der tiltrækker vand og derfor sveller [8]. Hvis reaktionen finder sted i beton, vil alkali/kisel-gelen opbygge et tryk på den omgivende faststofstruktur. Dette tryk kan føre til revnedannelse. I laboratorieforsøg registreres skadelige alkali/kisel-reaktioner som ekspansion af betonens ydre dimensioner.

2.3.2 Forebyggelse

Kisel findes i nogle tilslagstyper, og er desuden en hovedbestanddel i flyveaske og mikrosilica. Det er dog kun reaktivt tilslag, der giver anledning til skader i betonen. Alkali (Na^+ - og K^+ -ioner) stammer fra cementen eller trænger ind i betonen fra omgivelserne, hvis konstruktionen fx er udsat for havvand eller tørsalte.

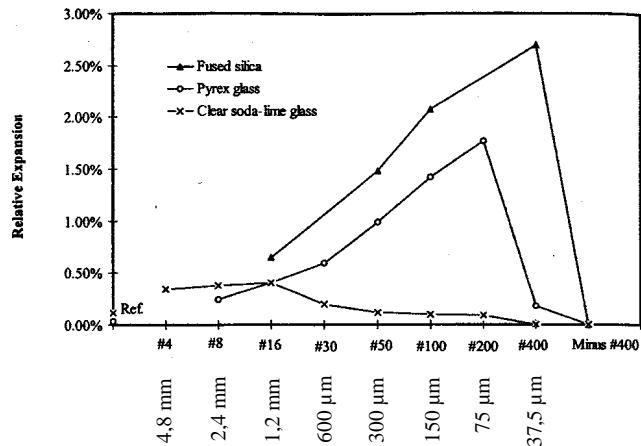
Forebyggelse af alkali/kisel-reaktioner sker ved at sikre, at der *enten* ikke er tilstrækkeligt alkali *eller* tilstrækkeligt kisel til, at alkali/kisel-reaktionerne kan få et skadeligt omfang. Iflg. den danske materialestandard for beton [9] må beton i miljøklasserne M, A og E (Moderat, Aggressiv og Ekstra Aggressiv) ikke indeholde mere alkali end $3,0 \text{ kg/m}^3$ (alkali i mikrosilica og flyveaske ikke indregnet). I konstruktioner, hvor alkaliindholdet forhøjes af indtrængende alkali, må tilslaget kun indeholde en begrænset mængde reaktivt kisel.

Når der tilsættes glas til betonen, enten i form af tilslag eller filler, tilsættes der alkali og kisel samtidigt, og det er således ikke muligt at begrænse indholdet af alkali eller indholdet af kisel. Her må man se på, at udviklingen af en eventuel skade også afhænger af kiselpartiklernes størrelse.

Dannelsen af alkali/kisel-gel sker på de kiselholdige partiklers overflade.

- For *store* partikler er overfladearealet lille i forhold til volumenet. Så selvom der er en stor mængde kisel, er det reelt kun en lille del, der er til rådighed for de reaktioner, der fører til dannelse af alkali/kisel-gel, og derfor bliver mængden af gel lille.
- For *små* partikler er overfladen stor i forhold til volumenet, og derfor vil en forholdsvis stor del af kiselet omdannes. Men selvom der dannes meget gel, er det jævnt fordelt i små portioner i betonens faststofstruktur. De små lokale gelansamlinger er hver for sig for små til at opbygge et stort, skadeligt tryk på deres omgivelser. Det er bl.a. derfor, at alkali i mikrosilica og flyveaske ikke regnes med i betonens alkaliindhold i materialestandarden. Det antages, at det ekstra bidrag til alkaliindholdet mht. risiko for alkali/kisel-skader mere end opvejes af den positive effekt af de mange små partikler.

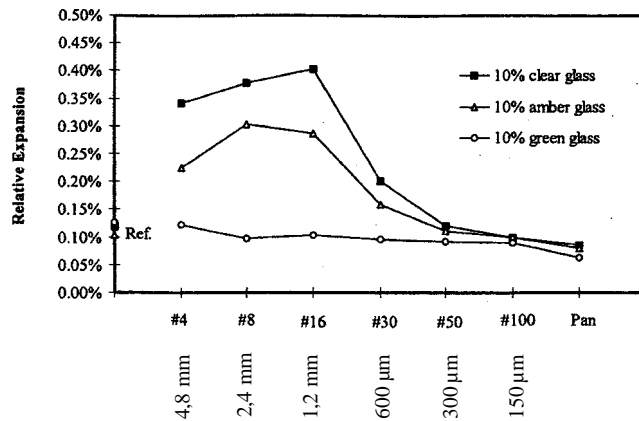
Det betyder, at der et sted mellem *små* og *store* partikler findes en partikelstørrelse, der fører til det største skadesomfang. Denne størrelse kaldes den pessimale størrelse. Den pessimale størrelse af glaspartikler er bl.a. målt af Jin et al. [4], se Figur 2.



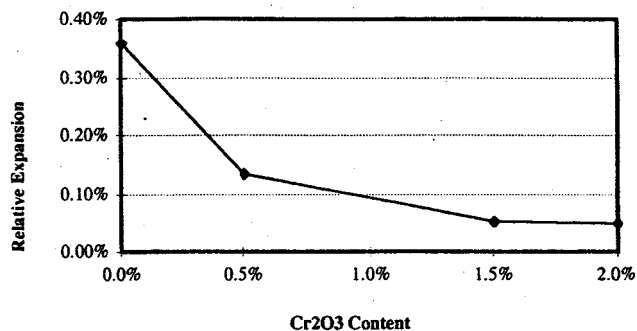
Figur 2: Relativ ekspansion som funktion af partikelstørrelse af tilsat glas [4]. "Clear soda lime glass" svarer stort set til kvaliteten af genbrugsglas fra flasker.

I en betonblanding med både små og lidt større, reaktive partikler, vil alkali primært reagere med de små partikler, fordi de har den største specifikke overflade. Derfor kan tilstedeværelsen af mange små, reaktive partikler undertrykke reaktioner med de lidt større partikler, og på den måde forhindre, at geldannelsen ved de lidt større partikler bliver skadelig.

Størrelsen af ekspansionen afhænger af glastypen. Dette ses både af Figur 2, Figur 3 og Figur 4. Det er bl.a. fundet, at grønt glas giver anledning til mindre ekspansion end glas med andre farver. Ved afprøvning af forskellige typer grønt glas, ses der også en forskel. Det er tilsyneladende det grønne glas' indhold af krom, der hæmmer udviklingen af skader, se Figur 4.



Figur 3: Ekspansionen afhænger af typen af glas [4]. Figuren viser ekspansionsmålinger for glas med forskellige farver.



Figur 4: Ekspansionen afhænger af typen af glas [4]. For grønt glas spiller indholdet af Cr_2O_3 ind.

2.4 Krav til materialer

2.4.1 Partikelstørrelse

Partikelstørrelsen afhænger af, om glasset skal bruges som tilslag eller som filler.

Det vil være nemmest at anvende knust glas som tilslag, hvis det følger samme fraktionering som andet tilslag til betonproduktion, fx:

- 4-8 mm (perlesten)
- 8-16 mm (ærtosten)
- 16-32 mm (nøddesten)

Som fillermateriale skal glasset have en partikelstørrelse, der er så meget mindre end den pessimale størrelse, at der opnås sikkerhed for at skadelige alkali/kisel-reaktioner kan undgås. Samtidigt skal materialet have en størrelse, der gør det velegnet som filler, så det fx bidrager til god bearbejdelighed. Det vil sige, at det skal have partikelstørrelser, der minder om flyveaske og cement. Det betyder at:

- største partikler: $< \frac{1}{4}$ mm
- middel diameter: 10-20 μm
- specifik overflade: 300-500 m^2/kg

Hvad der mere præcist er den mest optimale partikelstørrelse og -gradering, må fastlægges ved forsøg.

2.4.2 Andre krav

Der må stilles krav til glassets renhed, så i mange tilfælde vil det være nødvendigt at rengøre glasset, før det kan anvendes til beton.

Tilstedeværelsen af fx keramiske materialer er ikke noget problem, idet de blot vil optræde som kemisk inaktive faststofpartikler i betonen. Derimod kan madrester og andet organisk materiale være et stort problem. Fx er sukker et af de stoffer, der længst har været kendt og anvendt som retarderende middel i betonblandinger [8]. Selv små mængder af sukker forsinker betonens hærdeforløb.

Desuden bør der stilles krav til glassets kemiske sammensætning, herunder dets tungmetalindhold, idet en ophobning af tungmetaller i betonen er uønsket. En sådan ophobning kan begrænse mulighederne for senere at genanvende betonen. Dog er der noget, der kan tyde på, at kromoxid, Cr_2O_3 , reducerer risikoen for ekspansion forårsaget af alkali-kiselreaktioner, og at et vist indhold af Cr_2O_3 derfor er ønskeligt (eller i hvert fald skal deklareres).

2.5 Potentiale

2.5.1 Tilslag

Ved anvendelse af glas som tilslag i beton er der flere forbehold i relation til holdbarhed og styrke. Beton med glastilslag vil i mange tilfælde være dyrere at producere end beton med stentilslag, fordi det kræver et forholdsvist højt indhold af pasta og dermed af cement. Derfor vil glasset sandsynligvis ikke kunne komme i betragtning som et generelt anvendt betontilslag, men kun i projekter, hvor der ønskes en særlig arkitektonisk effekt. Det er derfor forholdsvist små mængder, der kan anvendes som tilslag.

For at knust glas skal give en ekstra arkitektonisk streng at spille på, vil det kræve en omhyggelig sortering af glasset efter farve. Efterspørgslen vil sandsynligvis være størst for klare farver som rød og blå, hvor mængderne er mindst, mens efterspørgslen vil være mindre for grønt og brunt glas, selvom det i høj grad er dette glas, hvor der er behov for at finde alternative anvendelsesmuligheder.

2.5.2 Fillermateriale

Der produceres årligt mere end 3,4 mio. m³ beton i Danmark. Hver m³ beton indeholder typisk 30-60 kg puzzolansk filler i form af bl.a. flyveaske. Hvis knust glas kan vises at være teknisk lige så god som flyveaske, så den kan erstatte flyveasken, vil der derfor være et stort potentiale for afsætning af genbrugsglas.

Med den nuværende materialestandard for beton, betyder krav til betonens alkaliindhold dog, at der ikke kan tilsættes mere end ca. 10 kg glas pr. m³ beton. Iflg. svensk praksis, der ikke er underlagt de samme regler, benyttes der typisk 20 kg glasfiller pr. m³ beton. Forsøg har vist, at når glasset tilsættes som filler, kan der anvendes endnu større mængder (60-120 kg/m³), uden at det giver anledning til holdbarhedsmæssige problemer [7].

Behovet for fillermateriale vurderes at være stigende. Det skyldes bl.a. at såkaldt *selvkomprimerende* beton vinder frem. Selvkomprimerende beton er beton, der kan indbygges uden brug af vibrationsudstyr, og som derfor har en arbejdsmiljømæssig fordel i forhold til traditionel beton. Den selvkomprimerende beton kræver imidlertid et større pulverindhold end traditionel beton, og for ikke at få et u hensigtsmæssigt højt cementindhold, opnås dette typisk ved at hæve fillerandelen.

Knust glas vil også kunne anvendes som fillermateriale på områder, hvor der ikke i dag anvendes flyveaske. Her tænkes på anvendelsen i hvid beton. Hvid beton fremstilles på basis af hvid cement og lyse tilslagsmaterialer. Det er ikke muligt at anvende flyveaske i hvid beton, da det vil spolere den hvide farve. Der savnes derfor et alternativ til flyveasken, der kan anvendes i hvid beton, herunder også i hvid, selvkomprimerende beton. Knust glas kan være et sådan alternativ, da hverken klart eller farvet glas forventes at have samme negative effekt på betonfarven som flyveaske.

Økonomisk vil det givetvis være mest fordelagtigt at benytte knust glas som filler og i særlig grad som filler til hvid beton, hvor andre, konkurrerende fillermaterialer er relativt bekostelige. Som tilslag skal glasset konkurrere med stenmaterialer, der hører til blandt de billigste bestanddele i beton (pris pr. kg).

3 Glas til teglproduktion

Anvendelsen af farvet glas i tegl opdeles her i to forskellige teknikker:

- Anvendelse i selve teglmaterialet (skærven)
- Anvendelse i glasurer

3.1 Anvendelse i skærv

3.1.1 Generelle krav

Glas vil afhængigt af primært kornstørrelse og smelteegenskaber, kunne forventes at have forskellige virkninger.

Kornstørrelsesfordelingen vil være afgørende for stryge- og tørreegenskaber. Normalt sigter man på danske teglværker efter at have bestemte placeringer i Winkler-diagrammet (bilag A). Knusning og formaling vil kunne bestemme glassets egenskaber her. På danske teglværker er valseværker med spaltevidder ned til 0,8 mm efterhånden almindelige. Så glas, der tilsættes lerblandingen før valseværker, vil blive nedknust til denne størrelse.

Glas vil normalt have lavere smeltepunkt end både lerblandingerne og de enkelte bestanddele af lerblandingerne. Derfor vil glas kunne påvirke sintringsforholdene i tegl. Disse er i forvejen forskellige fra lertype til lertype. Således har rødt dansk tegl et jævnt fortløbende sintringsforløb, hvor længdeændringen starter ved ca. 1000°C og slutter ved ca. 1100°C. Enkelte sydvestjyske lertyper har et højere liggende sintringsinterval, og er modsat normalt rødbrændende dansk ler anvendeligt til produktion af klinker.

Gult dansk tegl begynder først at sintre omkring 1040°C, samtidig med at den gule farve udvikles. Men sintringsintervallet er meget brat, og materialet kan smelte allerede under 1100°C, afhængigt af kalkindholdet.

Der er altså to principielt forskellige sintringsforløb, som glas kan påvirke. Og der kan derfor forventes vidt forskellige virkninger, afhængigt af om glas anvendes i rødbrændende eller i gulbrændende ler.

En yderligere parameter er mængden af glas i forhold til ler.

- Er glas den overvejende bestanddel, kan der blive tale om en form for sinterglas med ler som konsistensmiddel i formgivningsfasen.
- Er ler den overvejende bestanddel, vil der være tale om mere traditionel tegl (eller evt. andet traditionelt keramisk materiale).

For det anvendte glasmateriale kan følgende egenskaber være relevante:

- Kemisk sammensætning på oxid-basis
- Oprindelse og oparbejdning
- Smelteegenskaber og dilatometriske egenskaber: halvkuglepunkt, glastransformationspunkt, vigepunkt

- Opløselighed i vand. Denne burde være omtrent 0% i de aktuelle glastyper, men finformaling kan evt. give øget opløselighed
- Farve
- Krystallisationstendens under afkøling. Køleforløbet er betydelig længere ved teglfremstilling end ved glasfremstilling
- Styrke- og elasticitetstal for glas materialet

For den anvendte lertype karakteriseres om muligt følgende egenskaber:

- Lertype (f.eks. rød- eller gulbrændende)
- Kornstørrelsesfordeling
- Mineralogisk sammensætning
- Normalt anvendelsesområde
- Normal brændingstemperatur

For den færdige blanding angives om muligt:

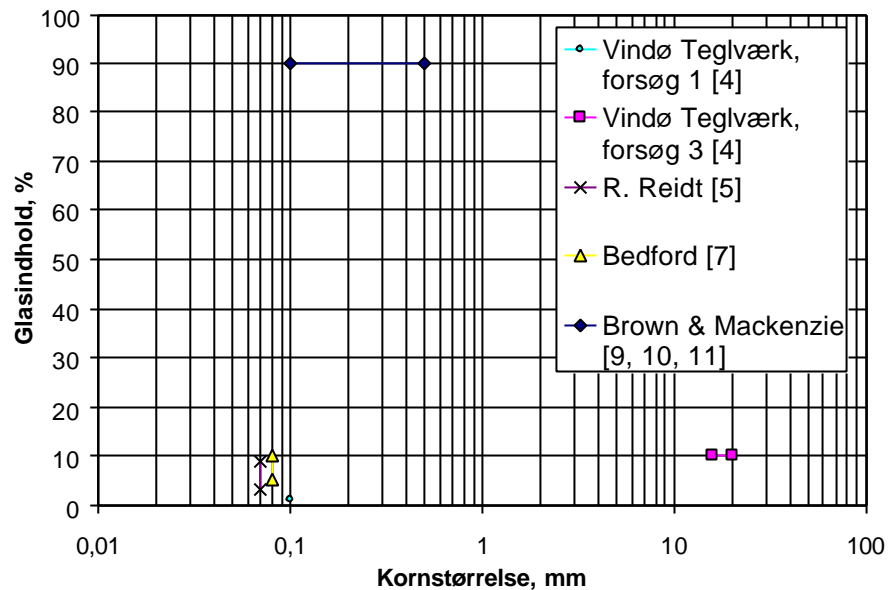
- Blandingsteknologi
- Formgivningsteknologi (strygemetode)
- Tørringsteknologi
- Brændingsteknologi (ovntype, temperaturforløb, ovnatmosfære)

For det færdige produkt angives om muligt:

- Styrke
- Porøsitet, vandoptagelse
- Densitet
- Farve
- Tendens til misfarvning
- Andet udseende
- Tendens til revnedannelse

Der er principielt mange muligheder for at anvende restprodukter ved teglfremstilling [1, 2, 3]. Men pga. kompleksiteten i teglfremstillingen vil der altid være større eller mindre problemer, der oftest har den effekt, at mulighederne ikke bliver udnyttet. I de aktuelle referencer nævnes glas som en af disse muligheder, der faktisk i visse tilfælde udnyttes i praksis.

I det følgende refereres konkrete erfaringer fra et antal kilder. Der er tale om ret forskellige glasmaterialer, der er anvendt i de forskellige undersøgelser, især varierer kornstørrelsen på det anvendte glas. Desuden er det meget forskelligt hvor store mængder glas, der er anvendt. Diagrammet i Figur 5 giver et overblik over de forskellige undersøgelser.



Figur 5: Oversigt over undersøgelser.

3.1.2 Anvendelse af glas i egentlig tegl

Et dansk teglværk har gennemført tre forsøg med anvendelse af glas. Der er tale om principielt meget forskellige forsøg [4].

I det første forsøg blev der anvendt glasmel fra et tysk firma der leverer til brug i klinkerproduktion. Glasmellets kornstørrelse opgives til 0 – 100 μm , med en sigterest på denne sigte på 7%. Den kemiske sammensætning ses i Tabel 2.

Tabel 2: Kemisk sammensætning af glas til forsøg.

SiO ₂	71,2
Al ₂ O ₃	0,35
CaO	9,6
MgO	4,0
Fe ₂ O ₃	0,1
Na ₂ O	14,1
K ₂ O	0,05

Karakteristiske temperaturer for glasset er:

- Transformationstemperatur 527°C
- Vigepunkt 590°C
- Halvkuglepunkt 980°C

Glasmellet blev tilsat i en mængde på 1 vægt% til værkets normale gulbrændende lerblending. Formålet med forsøget var at opnå et mindre porøst klinkerlignende materiale, men der kunne ikke konstateres nogen virkning på stenedes vandoptagelse.

I det andet forsøg blev samme glasmel anvendt, men nu i meget kraftig overdosering. Resultatet var at stenene blev lyserøde på overfladen i stedet for gule, og at overfladen efter brændingen var dækket med saltudfældninger.

Værket undersøgte derpå vandopløseligheden af glasmelet. 1 kg glasmel blev oprørt i 1 l vand. Vandfasen blev herefter isoleret og inddampet. Den viste sig at indeholde en hel del opløst materiale.

I det tredje forsøg anvendtes glasaffald fra Holmegårds Glasværk. Det var leveret som 15 – 20 mm store skår i en mængde på 10 t. Glasset blev tilsat til rødbrændende ler i en mængde på ca. 10%. Glasskårene blev tilsat før valseværk. Formålet var at opnå en visuel effekt. Efter brændingen sås at glas materialet havde dannet halvkugleformede udblæringer på overfladerne.

Det førnævnte tyske firma der leverer glasmel til teglproduktion er Robert Reidt Glasmineralwerk. Firmaet markedsfører en række glasprodukter, bl.a. Sintermehl N-Glas til brug i teglindustrien. Ifølge firmaets for tiden gældende datablad [5] har materialet følgende egenskaber, se Tabel 3:

Tabel 3: Kemisk sammensætning af glas til forsøg [5].

SiO ₂	60-65
Al ₂ O ₃	2-4
CaO	1-2
MgO	0,8-1,5
Fe ₂ O ₃	0,08-0,12
Na ₂ O	8-10
K ₂ O	6-8
BaO	7-12
SrO	2-7

Karakteristiske temperaturer:

- Transformationstemperatur ca. 522°C
- Vigepunkt ca. 578°C
- Halvkuglepunkt ca. 920°C

Produktet leveres i forskellige finheder:

- N-220: 0 – 90 µm
- N-230: 0 – 80 µm
- N-240: 0 – 63 µm
- N-300: 0 – 45 µm

Sigterest i alle tilfælde 3%.

Ved indledende laboratorieundersøgelser anbefales tilsætninger på 3, 6 og 9%.

I bilag B ses resultaterne af en laboratorieundersøgelse af N-240.

Ud fra indholdene af BaO og SrO må det antages, at glasmelet er fremstillet ved formaling af fjernsynsskærme el. lign. [6].

I en række forsøg er der til de fem mest anvendte lertyper til teglproduktion i UK tilsat op til 10% fint formalet glaspulver [7]. Der var tale om laboratorieforsøg, som indikerede, at der kan opnås styrker som i normalt tegl, men ved 50°C lavere brændingstemperaturer. Det kan give mulighed for mindre energiforbrug til brænding, til gengæld vil der være et energiforbrug til formaling af glas. Muligheden for at anvende glas i sandstørrelse nævnes. Her

vil der ikke være samme energiforbrug til formaling, men heller ikke nogen væsentlig flusvirkning.

Det vil heller ikke være økonomisk tillokkende pga. de lave priser på normale råmaterialer til tegl. Det nævnes, at fluoridemission evt. kan reduceres, da glas ikke vil være fluoridholdigt. Det skal her bemærkes, at den ovennævnte potentielle sænkning af brændingstemperaturen ved anvendelse af glaspulver kan have samme effekt. Det nævnes, at egentlige produktionsforsøg med 20 ton glas skal sættes i gang, og at det involverede værk er ved at indrette et doseringsanlæg.

I et konkret tilfælde er anvendelse af fint formalet glas ved fremstilling af lerrør (clay pipes) til dræn- og kloakformål undersøgt [7]. Laboratorieforsøg viste, at brændingstemperaturen kunne reduceres, og det ville kunne løse ikke nærmere beskrevne brændingsproblemer. Fuldskala-forsøg stod foran start.

P.t. oplyses at førnævnte forsøg ikke har resulteret i, at nogen teglproducent har anvendt glas, samt at endnu et projekt er sat i gang [8]. Her opstilles yderligere et økonomisk overslag over, hvilke besparelser der kan opnås ved tilsætning af glas, og hvilken pris det må have. De tekniske krav vil være, at glasset skal formales til en kornstørrelse $< 75 \mu\text{m}$. Til gengæld vil de normale glastyper: planglas, flasker og beholdere, farvet eller ufarvet glas alle være anvendelige.

3.1.3 Anvendelse af glas i tegllignende materialer

Brown & Mackenzie [9, 10, 11] har gennemført forsøg med blanding af formalet affaldsglas med ikke nærmere angivet sammensætning og ler (halloysit). Af blandingen blev der presset fliser. Glassets vige punkt opgives til 720°C . Indflydelsen af glassets kornstørrelse og af blandingsforholdet mellem glas og ler på en række keramiske parametre blev undersøgt. Interessante iagttagelser er:

- Råstyrken falder med stigende kornstørrelse for glas
- Råstyrken stiger med stigende lerindhold og dermed faldende glasindhold
- Brændt styrke falder med stigende kornstørrelse af glas
- Brændingsvind stiger med stigende kornstørrelse af glas
- Densiteten falder med stigende kornstørrelse af glas, porøsiteten stiger tilsvarende
- Brændt styrke falder med stigende lerindhold
- Brændingsvind falder med stigende lerindhold
- Densiteten falder med stigende lerindhold, porøsiteten stiger tilsvarende

Brændingsforsøg blev udført på en blanding af 90% glas formalet finere end $353 \mu\text{m}$ og 10% ler (halloysit). Resultaterne var bl.a.:

- Ved opvarmningshastigheder $< 50^\circ\text{C}$ /time opnåedes mindre styrker, svind og densitet og tilsvarende højere porøsitet. Holdetiden var 30 min ved 915°C .
- Med stigende brændingstemperatur opnåedes højere styrker, større densiteter, større svind og lavere porøsiteter, temperaturområdet var $820 - 960^\circ\text{C}$
- Længere holdetid gav større styrke, mens densitet, porøsitet og svind ikke påvirkedes væsentligt

Da der er tale om en principielt anderledes proces end ved teglfremstilling, kan resultaterne ikke bruges direkte, men f.eks. det forhold at en langsom opvarmning giver mindre styrker er interessant. Det forklares med, at der sker en afglasning (devitrification), hvorved der dannes mineralerne devitrit ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$) og cristobalit (SiO_2). Herved påvirkes viscositeten og sintringen hæmmes. Forholdene er interessante, fordi opvarmningshastigheden i en teglværks tunnelovn generelt vil være $< 50^\circ\text{C}/\text{time}$. Tilsvarende vil afkølingshastigheden også generelt være $< 50^\circ\text{C}/\text{time}$, men pga. styrkølningen der hurtigt bringer temperaturen under ca. 600°C må det vurderes, at mulighederne for devitrifikation/afglasning er størst under opvarmningen. Det kan ikke umiddelbart afgøres, hvilke virkninger en sådan afglasning vil have på et teglmateriale indeholdende glas, men f.eks. vil cristobalit have en længdeændring svarende til kvartsspringet, blot kraftigere og ved en anden temperatur ($180 - 230^\circ\text{C}$). Afglasning under opvarmning vil desuden muligvis kunne ophæves ved gensmeltning når temperaturen når højere op.

En række andre undersøgelser følger samme princip, d.v.s. man fremstiller et keramisk materiale med højt glasindhold og relativt lavt lerindhold i forhold til tegl.

En blanding af 50% glas med lerminerale og mineralsk filler kan således formes til fliser der ved brænding til 1095°C får meget lav vandoptagelse [12, 13].

3.1.4 Specielle glastyper

En speciel glastype nævnes af og til som muligt råmateriale til teglfremstilling. Det drejer sig om glas opstået ved forbrænding af affald eller slam ved meget høj temperatur [14, 15].

3.2 Anvendelse i glasur

Glasur er i princippet et glasmateriale der i mere eller mindre forsmeltet (frittet) tilstand påføres et keramisk materiale, hvorefter det ved efterfølgende brænding danner et glaslag på materialets overflade.

Glas er i forvejen et smeltet materiale, og svare dermed til de fritter der i forvejen er afgørende for glasurers anvendelighed til tegl og andre lavtbrændte keramiske produkter.

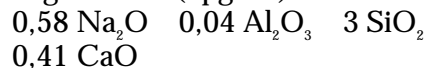
Knust eller formalet glas er derfor et potentielt råmateriale til anvendelse i glasurer. Anvendeligheden kan på forhånd siges at afhænge af følgende forhold:

- Glassets smelteegenskaber
- Dilatometriske egenskaber: glastransformationstemperatur og termisk længdeudvidelse, der vil bestemme tendensen til krakeleringer
- Farve
- Reaktion med skærv
- Krystallisationstendens under afkøling. Her kan være tale om både positive og negative effekter

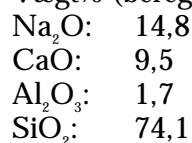
Clifford har udført forsøg med anvendelse af glas i glasurer [16]. Der er anvendt planglas (plate glass), der i USA p.t. ikke har nogen værdi som genanvendelsesmateriale. Materialets relativt høje MgO-indhold kan gøre det attraktivt i glasurer hvor det kan erstatte dolomit og talk. 25 – 50% glas i glasurer til 1200 - 1260°C har været mest vellykket. Derimod har resultaterne ved 1040 - 1100°C været mere skuffende.

Snorre Stephensen har gennemført en række forsøg med anvendelse af forskellige glasursammensætninger på dansk tegl [17]. Formålet var bl.a. at finde alternativer til blybaserede glasurer. I forsøgene blev glasmel anvendt som råvare. Glasmelet havde følgende sammensætning:

Segeformel (opgivet):



Vægt% (beregnet):



Det manglende indhold af farvende oxider (Fe_2O_3 m.fl.) samt prøvernes udseende viser, at der er tale om en farveløs glas. De forskellige glasursammensætninger blev påført forskellige danske tegltyper, som herefter blev brændt på forskellige danske teglværker. Der bliver udvalgt 9 forskellige glasurer som de bedste alternativer til blyholdige glasurer. Glasmel indgår ikke i nogen af disse. Brændte prøver af Snorre Stephensens forsøg er stadig til stede på Teknologisk Institut, Murværk. I bilag C ses mikroskopibilleder af overfladen på glasurprøver hvori glasmel indgår. Det ses at der er tale om meget forskellig tendens til smeltning.

Stefanov & Batschwarov [18] omtaler glasskår som muligt råmateriale til glasurer til tegl og andre keramiske produkter med lignende brændingstemperaturer. En glasur der anbefales til 920 – 960°C har følgende blandingsforhold:

- glasskår 70%
- ler 15%
- kridt 15%

Matthes [19] opstiller grænseformler for glasurer til forskellige brændingstemperaturer. Relevant for tegl vil være borfrie alkaliglasurer og bor – alkaliglasurer. Glasmel skal i givet fald indgå som råmateriale i sådanne glasurer. Ud fra normale glassammensætninger må det forventes at det relevante temperaturområde for glas i glasurer er 1200 – 1240°C, men Matthes omtaler ikke glas som muligt råmateriale. Det samme gælder andre bøger om glasur.

3.3 Potentiale

Anvendelse i skærv, dvs. i selve teglmaterialet og dermed i lerblandingen må betegnes som mest relevant.

Her er der 2 principielt forskellige muligheder:

- Tilsætning som et relativt fint materiale der forventes at have en sintrende effekt og dermed giver mulighed for lavere brændingstemperatur, større styrke eller lavere porøsitet.
- Tilsætning som et relativt groft materiale, der erstatter en del af det anvendte sand.

Da der altid vil være et vist interval for en hvilken som helst kornstørrelsesfordeling, kan de 2 tilfælde ikke helt holdes ude fra hinanden.

Dansk teglindustri anvender ca. 100.000 t sand årligt. Kun forsøg kan afgøre, hvor meget der kan erstattes af glas.

Røde blødstrogne sten vil formentlig være det mest oplagte materiale til forsøg. Her tilsættes ofte meget sand, og der kan direkte være muligheder for forbedring af produktkvaliteten, da glas modsat sand ikke er følsomt over for kvartsspringet ved 572°C. Ved præcis denne temperatur ændrer kvarts dimension. Det udvider sig ca. 1% under opvarmning og trækker sig tilsvarende sammen under afkøling. Da kvarts er et dominerende mineral i dansk teglværksler, er der stor risiko for revnedannelse ved 572°C. Risikoen er størst under afkøling af røde blødstrogne sten. Risikoen kan nedsættes ved at anvende chamotte (knust, brændt tegl) i stedet for sand, der har et højt kvartsindhold. Chamotte er dyrere end sand og det kan være svært at skaffe. Da chamotte er et teglmateriale, indeholder det også kvarts, om end mindre end sand. Derimod indeholder glas slet ikke kvarts.

Nedknusning, formaling og i det hele taget styring af glassets kornstørrelsesfordeling må anses for et afgørende punkt. Fremstilling af glaspulver vil kræve formaling, og dermed udstyr og energiforbrug. Fremstilling af en fraktion i sandstørrelse vil til dels kunne ske i det eksisterende tilberedningsudstyr på teglværker.

Glassets farve forventes ikke at have væsentlig betydning. Ligeledes vil en vis forurening med andre keramiske materialer kunne accepteres.

Fremstilling af sinterglaslignende materialer, f.eks. til fliser med højt glasindhold og tilsvarende lavt lerindhold, er principielt meget forskelligt fra teglfremstilling og vurderes ikke at være relevant.

Glas kan anvendes til fremstilling af glasur, men glasurerne vil ligge i et højere temperaturområde end det der er aktuelt for tegl.

4 Glas til vejbygning

Genbrug af knust glas til vejbygningsformål startede i slutningen af 60'erne i USA. Der har været to hovedanvendelser, nemlig som tilslag i asfalt (Glasphalt) og som ubundet materiale til bærelag og fyld. I det følgende refereres nogle af de mest informative dokumenter som det har været muligt at finde via søgning på Internet og i tidsskriftsdatabaser.

4.1 Udenlandske erfaringer

4.1.1 USA

Federal Highway Administration har i 1997 udgivet *User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction* [1], hvori beskrives anvendelsesmuligheder for alle tænkelige alternative materialer (herunder knust glas) til vejbygning. Der indledes med en generel beskrivelse af indsamlings- og genbrugsprocedurer. I 1994 genereredes ca. 12 mio. tons affaldsglas i USA, hvoraf 77% blev deponeret. Det indsamlede glas bliver sædvanligvis håndsorteret i de tre farvefraktioner klart, brunt og grønt, og derefter nedknust til max. 50 mm for at lette videre transport. Genbrug til produktion af nyt glas begrænses af de høje omkostninger ved farvesorteringen samt den store mængde glas, som går i stykker i forbindelse med indsamling (30-60%), dvs. ender som skår med blandede farver. Det er disse skår som kan genbruges til anlægsformål.

Adskillige stater har nu specifikationer der giver mulighed for at bruge knust glas til vejbygning, primært som tilslag i asfalt.

Der kræves en vis tilgang af glas for at kunne have tilstrækkelig forsyningssikkerhed til tilslagsproduktion, dvs. indsamlingsordninger i mindre samfund har ikke tilstrækkeligt stort volumen.

For at kunne bruges til konstruktionsformål skal glasset nedknuses til en passende kornkurve, og det kan samtidig være nødvendigt at bruge magnetisk separation og luftgennemblæsning for at fjerne metal- og papirrester. Hvis glasset nedknuses tilstrækkeligt nedsættes andelen af flade skarpe partikler, og manuel håndtering bliver mulig. Materialeparametrene er meget afhængig af knusningsgraden, som det fremgår af Tabel 4, som viser typiske værdier for knust glas fra en række genbrugsanlæg.

Tabel 4: Materialeegenskaber afhængigt af knusningsgrad.

Test	knust glas, max. 19 mm	knust glas, max. 6,4 mm
Andel af flade partikler (%)	20-30	1
Vægtfylde (t/m^3)	1,96 - 2,41	2,49 - 2,52
Permeabilitet (cm/s)	0,20	0,06

En typisk kornstørrelsesfordeling for knust glas er vist i Tabel 5:

Tabel 5: Typisk kornstørrelsesfordeling for knust glas.

Sigte (mm)	Gennemfald (%)
25,4 mm	100
12,7 mm	98,7
6,35 mm	86,0
3,18 mm	32,6
0,84 mm	6,4
0,42 mm	3,2
0,21 mm	1,5
0,075 mm	0,6

Andre mekaniske egenskaber for knust glas er vist i Tabel 6:

Tabel 6: Mekaniske egenskaber for knust glas.

Test	Værdi
Los Angeles slidstyrke (%)	30 - 42
Maksimal tørdensitet (kg/m ³)	1800 - 1900
Optimalt vandindhold (%)	5,7 - 7,5
Friktionsvinkel	51 - 53
CBR-værdi (%)	
15% glas	132
50% glas	42 - 125

Glas har desuden lav varmeledningsevne, dvs. belægninger med glas nedkøles ikke så hurtigt, hvilket kan være en fordel i forbindelse med glatføre og med henblik på at reducere frostnedtrængning.

Efter denne gennemgang af de tekniske egenskaber gives i rapporten opsamlinger af de tidlige erfaringer (frem til 1995) med anvendelse dels i asfalt og dels i ubundne bærelag.

En række større byområder har siden 1970'erne brugt knust glas som tilslag i asfaltproduktion. Langt den største anvendelse er sket i New York, hvor 225.000 tons glas blev brugt i asfaltbelægninger i perioden 1990-1995. Der blev brugt glas i 1/3 af vedligeholdelsesprojekterne i byen, og man havde udelukkende positive erfaringer.

Der er udført adskillige andre projekter med Glasphalt, men bortset fra New York, Baltimore og et par andre byer har der oftest været tale om enkeltstående demonstrationsprojekter snarere end egentlig kontinuert brug. Baltimore brugte Glasphalt i 20 projekter fra 1971 til 1988, men stoppede da produktet ikke længere var økonomisk konkurrencedygtigt.

Nogle af de tidlige anvendelser af knust glas oplevede problemer med dårlig friktion og stripping, dvs. at bitumen har tendens til at miste vedhæftning med de glatte tilslagsoverflader af glas. Disse problemer antages nu opstået fordi man brugte for store glaspartikler og for høje glasandele i tilslaget. En række andre konklusioner for glas i asfalt var:

- Ved brug i slidlag skal glasset nedknuses til max. 4,75 mm. I bærelag kan der benyttes partikler op til 10-15 mm.
- Det kan være nødvendigt at bruge klæbeforbedrer pga. glasset glatte overflade, i hvert fald ved brug af større glaspartikler og/eller høje glasandele.
- Glasandelen bør begrænses til 10-15% af det totale tilslag.

- Andelen af fremmedstoffer som papir, metal o.lign. i det knuste glas bør begrænses til 5 vægt-%.
- Asfalt med glastilslag har relativt god stabilitet pga. glassets høje angularitet.
- Blanding, udlægning og kvalitetskontrol af asfalt med glastilslag adskiller sig ikke fra de metoder der bruges ved traditionel asfalt.
- Den største hindring for yderligere brug af produktet er usikker forsyning af knust glas. Som nævnt er glastilslag primært brugt i store byområder med gode indsamlingsordninger og højt flow.

For glas til ubundne bærelag (granular base) fremføres det, at der ikke er fundet eksempler på anvendelser i større skala af dette produkt, men at glas nedknust til max. 4,75 mm som følge af den fordelagtige kornform burde være et godt materiale, der ved blanding med naturligt tilslag kan bruges til bærelag. Endvidere findes følgende specielle konklusioner:

- Indholdet af fremmedstoffer i det knuste glas bør maksimalt være 5%.
- Knust glas bør kun indgå som den fine fraktion i bærelag. Maksimal glasandel anbefales til 15% i granular base og 30% i subbase (svarende til bundsikring).
- Udlægning og kvalitetskontrol af bærelag med glas adskiller sig ikke fra de metoder der bruges ved bærelag med naturmaterialer.

I begyndelsen af 90'erne udførte Clean Washington Center (CWC) et meget omfattende arbejde inden for forskellige muligheder for glasgenbrug, herunder til vejbygning. Dette førte bl.a. til udgivelsen af "A Tool Kit for Using Recycled Glass as a Construction Aggregate", samt en hel række Best Practices in Glass Recycling [2], som alle er tilgængelige på www.cwc.org. En liste over *Best Practises for End Use Applications* relevante for vejbygningsformål er vist i følgende oversigt:

Construction Aggregates

- Studies of Glass in Construction Applications
- Typical Geotechnical Parameters of Glass Aggregate
- Developing Specifications for Recycled Glass Aggregate
- Model Specifications for Glass Aggregate
- The Behavior of Glass Aggregate Under Structural Loads
- State Specifications for Use of Cullet as Construction Aggregate
- Sampling Procedures for Recycled Glass Construction Aggregate
- Visual Inspection for Glass Construction Aggregate
- Safety Measures for Cullet Aggregate at Construction Site
- Compaction of Glass Fill
- Density Testing of Glass Aggregate Using a Nuclear Densometer
- Moisture Content Test of Glass Fill Using a Nuclear Densometer
- Glass Aggregate Dust Control at Construction Sites

Glassphalt

- Recycled Glass in Asphalt
- Preparation and Placement of Glassphalt

Filtration

- Recycled Glass in On-site Wastewater Sand Filters
- Crushed Recycled Glass Media in Slow Rate Filtration

Landscaping

- Landscaping Applications for Recycled Glass

Fra disse Best Practises kan en række tekniske data fremhæves:

- Kornkurven for glastilslag til ubundne anvendelser bør opfylde gennemfaldsprocenterne angivet i Tabel 7:

Tabel 7: Anbefalet kornkurve for glastilslag til ubundne anvendelser, jf. CWC Best Practises.

Sigte (mm)	Gennemfald (%)
19 mm	100
6,35 mm	10-100
1,68 mm	0-50
0,42 mm	0-25
0,075 mm	0-5

- Til base course (nogenlunde svarende til stabilgrus i DK) anbefales maksimalt 15% glastilslag, maksimalt 5% forurening i glastilslaget og en minimums komprimeringsgrad på 95%. Til subbase (bundsikring) gælder de samme anbefalinger, dog tillades op til 30% glastilslag.
- Knust glas har en god permeabilitet (0,05 - 0,25 cm/s). Dette skyldes primært at glas har glatte, ikke-porøse overflader samt at det ikke indeholder fine lerpartikler som tilstopper små hulrum. Dette betyder samtidig at de geotekniske egenskaber for glas er relativt ufølsomme overfor ændringer i vandindhold.
- Densiteten af 100% komprimeret knust glas ligger i området 1500-1700 kg/m³.
- 100% knust glas kan bruges til fyld og anvendelser med let trafiklast. Det bør komprimeres til 90-95% i forhold til Standard Proctor indstampning.
- Ved blanding med naturligt tilslag bruges modificeret Proctor som referenceværdi for densiteten.
- Glasskår over 25 mm størrelse vil normalt være pladeformede og således lettere at knække. Ved over 10% af sådanne større partikler kan materialet ændre kornkurve under transport og indbygning og senere evt. efterkomprimeres under last.
- Friktionsvinklen for knust glas er 38-42 grader.
- Glasindholdet i Glasphalt bør være maksimalt 20% for at krav til Marshall stabilitet etc. kan opfyldes for veje med middel trafik (< 40 mph). Glasstet skal indeholde højst 2 vægt-% fremmedlegemer i form af metal, plastic, træ o.lign. Til slidlag bør den maksimale partikelstørrelse være 10 mm, mens partikler op til 19 mm kan bruges i Glasphalt bærelag.
- Glasphalt anbefales ikke til slidlag på højhastighedsveje, idet friktionen vil være nedsat som følge af at større pladeformede skår kan placere sig overfladeparallelt. Dog angives det, at Glasphalt med højst 10% glas, med glaspartikler mindre end 8 mm vil have friktionsværdier som er sammenlignelige med traditionel asfalt.
- Glasphalt har højere stripping potentiale end asfalt med 100% naturligt tilslag. Det er derfor nødvendigt at bruge klæbeforbedrer som hydratkalk eller calciumhydroxid til forbedre vedhæftningen.

I Texas har Texas Tech University frem til 1995 ligeledes udført en større forskningsprojekt "Use of Glass Cullet in Roadway Construction" [3]. Sammen med TxDOT er der lavet specifikationer og demonstrationsprojekter med glastilslag. Hovedkonklusionen var at knust glas kan være et fremragende materiale til hel eller delvis erstatning af naturligt tilslag til mange anlægsformål.

- Der blev ikke konstateret skadelige effekter på miljøet i form af forureninger eller udvaskning fra knust glasaffald.
- Afhængigt af lokale forhold kan knust glas være konkurrencedygtigt i forhold til naturligt tilslag. Dette er specielt tilfældet omkring større byområder med effektive indsamlingssystemer.
- Brug af glas i asfalt vurderes ikke til at være så attraktiv som andre anvendelser pga. stripping problemet.
- Ligeledes vurderes anvendelse som betontilslag at være problematisk pga. risikoen for alkalireaktioner.

Der blev udviklet specifikationer for Texas med bl.a. følgende krav/anbefalinger:

- Til volde og dæmninger kan iblandes op til 20 vægt-% knust glas, som maksimalt må indeholde 5% forurening af andre stoffer.
- Der kan bruges 100% knust glas til ikke-bærende fyld bag støttemure samt som drænmateriale omkring rør.
- Der kan bruges op til 5% knust glas i asfaltbærelag. Klæbeforbedrer kræves.
- Kornkurveband for knust glas til de førnævnte anvendelser er angivet i Tabel 8:

Tabel 8: Kornkurve for glastilslag jf. Texas specifikationer.

Sigte (mm)	Gennemfald (%)
15,9 mm	100
9,5 mm	90-100
4,75 mm	50-70
1,68 mm	25-50
0,42 mm	10-20
0,075 mm	0-10

En gruppe af statslige DOT's (Department of Transport) fra 14 stater (heraf alle de største som Californien, Florida, Texas og New York) har under ledelse af Recycled Materials Resource Center på University of New Hampshire i 2000 udarbejdet et forslag til AASHTO-standard for "Glass Cullet Use for Soil-Aggregate Base Course" [4], dvs. brug i ubundne bærelag til vejbygning. Her opsamles praktiske erfaringer og specifikationer fra de stater i USA som bruger materialet.

Glasaffaldet skal bestå af knuste flasker og levnedsmiddelbeholdere. Indholdet af porcelæn, keramik og vinduesglas skal være begrænset til 5 vægt-% af glasskårene. Glasskårene skal være nedknust så 100% passerer 9,5 mm sigten. Indholdet af papir, propper, træ og andre forureninger skal være mindre end 1 vægt-%, heraf må højst 0,05 vægt-% være papir. Der må ikke være TV-rør, flourescerende el-pærer o.lign. som kan indeholde miljøfarlige stoffer. Endelig skal indholdet af flade, flisede partikler større end 4,75 mm (bestemt efter prøvemethoden ASTM D 4791) være mindre end 1%. Dette krav er bl.a. stillet

for at sikre at skårene er så afrundede i form at der kun er minimal risiko for at skære sig ved berøring.

Det knuste glas blandes med naturligt tilslag, således at maksimalt 20 vægt-% er glas, og det endelige materiale opfylder kravene til bærelagsmaterialer. De 20% er valgt på basis af erfaringer der siger, at et sådant materiale har egenskaber der ikke afviger fra 100% naturligt tilslag. Såfremt man ønsker at bruge over 20% glas skal der udføres specielle undersøgelser som CBR eller Resilient Modulus til verificering af at det blandede materiale har egenskaber der er sammenlignelige med 100% naturlige materialer.

Ud over de her nævnte dokumenter er der ved litteraturstudiet fundet en lang række andre kilder fra USA, der understøtter de tekniske konklusioner, som er trukket frem i det foregående.

4.1.2 UK

The Waste and Resources Action Programme har i maj 2002 udsendt en rapport med titlen "Recycled Glass Market Study and Standards Review" [6]. Her gennemgås status og markedsmuligheder for glasgenbrug i Storbritannien. De alternative anvendelser som behandles er: Knust glas som tilslag (fyld, beton, vejbygning) filtrering, sandblæsning og som flusmiddel til tegl, keramik.

I øjeblikket vurderes det at der genereres godt 4 mio. tons glas pr. år i Storbritannien. Heraf indsamles og genbruges ca. 915.000 tons (23%). Det overordnede mål for WRAP er at øge genbrugsandelen til 35% i 2004. Et af delmålene er at øge genbrug af farvet glas til konstruktionsformål med mindst 200.000 tons.

De faktorer der begrænser det primære glasgenbrug (til produktion af nyt glas) angives til:

1. Glas fra byggeaffald og skrottede biler er ofte for forurenede af andre materialer til at kunne bruges til fremstilling af nyt glas.
2. Ved produktion af nyt vinduesglas er kvalitetskravene så høje at potentialet for genbrug er ret begrænset.
3. Indsamlingsprocenten for containerglas er kun omkring 30%.
4. Producenterne af glasemballage i Storbritannien fremstiller primært klart glas (67%), hvorimod det indsamlede glas hovedsageligt er grønt (52%). Der er således et overskud af farvet glas, som ikke kan genbruges til glasproduktion.

Produktionen af tilslag i Storbritannien er ca. 210 mio. tons pr. år. Den totale mængde glas som inden for få år ønskes genbrugt som tilslag udgør altså kun 1,4‰ af det årlige tilslagsforbrug.

Andre restprodukter som overskudsmaterialer fra kulminedrift, skifer- og lerudgravning samt flyveaske o.lign. udgør meget store mængder i forhold til glasaffaldet. Også disse andre restprodukter ønskes anvendt til fyld- og konstruktionsformål.

Målsætningen mht. genbrug af glas i bundne bærelag i vejsektoren er en stigning fra et nuværende niveau på omkring 50.000 tons til 200.000 tons i 2006.

I rapporten gennemgås de forskellige anvendelsesmuligheder for knust glas i vejsektoren, med specielle referencer til de britiske normer. Der trækkes i vid udstrækning på erfaringer fra USA.

Det anføres som en generel kommentar, at vejbygningssektoren er meget konservativ mht. brug af nye materialer som følge af krav til lang levetid for vejanlæggene samt store økonomiske konsekvenser ved svigt. Alternative materialer skal derfor give minimal risiko og samtidig føre til besparelser på anlægsbudgettet.

Med hensyn til fyldmaterialer konkluderes det, der ikke skulle være noget i vejen for at knust glas kan bruges til de fleste formål såfremt det opfylder visse funktionskrav. Heraf er dog undtaget anvendelsesklasser hvor det er specificeret at der skal bruges naturligt tilslag (eksempelvis top lag). Der findes dog kun meget få materialedata for glas som kan relateres til de britiske standarder, og det er således ikke muligt at vurdere hvorvidt funktionskrav faktisk kan opfyldes.

Anvendelse i bundsikringslag er for tiden ikke mulig, da der foreskrives brug af naturmaterialer i de gældende britiske vejbygningsstandarder. En fremtidig anvendelse i ubundne bærelag vurderes som mindre lovende. Der refereres til de amerikanske erfaringer, der tilsiger at opblanding af fine glasfraktioner med naturligt materiale kan fungere, men de britiske tilslagsproducenter er negativt indstillede overfor dette, primært pga. de ekstra omkostninger ved opblandingen.

For bundne bærelag er der gode muligheder for genbrugsglas, idet der her kun stilles funktionskrav til tilslaget. Produktet Glasphalt fra RMC udgør indtil videre den mest lovende anvendelse af knust glas. RMC modtager glasaffald fra glasindsamlingsfirmaet Valpak, nedknuser til en kornstørrelse på max. 20 mm, hvorefter urenheder som tekstiler, metal- og korkpropper, plasticposer og papir sorteres fra ved sigtning. Herefter indgår glasset som 30% af tilslaget i et asfaltbærelagsmateriale, hvor den resterende del af tilslaget er traditionel knust kalksten. I 2000-2001 er der udlagt en række prøvestrækninger som en del af Highways Agencys godkendelsesprocedure for nye materialer. Produkt forventes godkendt til generel anvendelse inden for kort tid. Også andre britiske asfaltfirmaer har lignende produkter (bærelag med vis andel af knust glas som tilslag) undervejs i deres sortiment. Denne anvendelse alene vurderes til at kunne udnytte mange hundrede tusinde tons glasaffald.

Det anføres i rapporten, at knust glas ikke kan bruges til slidlag, da glasset ikke har tilstrækkeligt gode friktionsegenskaber.

Der gives eksempler på firmaer der leverer og bruger knust glas. Valpak (genbrugsfirma) har leveret 50.000 tons knust glas til tilslagsbrug i 2001, og dette tal forventes at stige til 100.000 tons i 2002.

Tilslagsproducenten RMC nedknuser glasaffald til et max 19 mm materiale der udgør 30% af tilslaget i Glasphalt. Dette produkt har angiveligt egenskaber der er næsten identiske med et tilsvarende materiale med 100% naturligt tilslag.

Day Aggregates producerer "sharp paving sand", et fintkornet høj kvalitets sandmateriale der primært bruges som underlag for belægningssten og fyld omkring rør.

4.1.3 Irland

I Irland blev der i 2001 udlagt en 1 km lang prøvestrækning, hvor der blev brugt 10% knust glas (svarende til 1 mio. flasker) i asfaltbærelaget. Det var første anvendelse af denne type materiale i Irland, hvor der er et overskud på 80.000 tons glas pr. år som normalt skal deponeres [7].

4.1.4 Andre lande

Ud over søgning på engelsk er der foretaget søgning på Internet og tidsskriftsbaser med søgeord på fransk og tysk. Dette har dog kun ført til yderst få resultater, herunder oplysning om at 77.000 tons (27%) af det indsamlede glas i Schweiz genbruges som tilslag eller andre sekundær-anvendelser (down-cycling). Glasgenbrugsprocenten i Schweiz er helt oppe på 90%, hvilket angiveligt gør landet til verdensmester i denne disciplin.

Et alternativt produkt som der er fundet enkelte referencer til er skumglas, som er et letvægtsmateriale fremstillet af glasaffald. Det bruges dels til isolering, men kan også finde anvendelse i anlægsarbejder som fyld omkring rør o.lign.

Endvidere bruges genbrugsglas ved produktion af små glasperler, der tilsættes materialer til vejafmærkning (striber).

4.2 Potentiale

Til trods for at der er visse forskelle i materialedata og de konklusioner som bliver draget ud fra de forskellige amerikanske og engelske erfaringer, er der dog ikke tvivl om at knust glas rent teknisk set kan være et glimrende materiale til vejbygningsformål, enten som tilslag til asfaltblandinger eller som bærelags-/fyldmateriale.

Indblanding i asfalt er tilsyneladende den mest gennemprøvede og "højklassede" genanvendelsesform. Anbefalingerne for glasprocenten varierer, men omkring 20% fint knust glassand burde kunne bruges uden tekniske problemer. En eventuel anvendelse i DK vil afhænge af, om asfaltværkerne kan få stabile leverancer af en ensartet kvalitet til konkurrencedygtig pris. Samtidig kan det være tvivlsomt, om der er vilje til at skulle håndtere et supplerende råmateriale.

De udenlandske erfaringer tyder på, at der i ubundne bærelag kan anvendes op til 20-30% knust glas. Ulempen her er, at glasset skal blandes med i forvejen ret billige naturmaterialer, hvilket alt andet lige må fordyre produktet. Ofte vil naturmaterialer dog alligevel blive sammensat af forskellige fraktioner hos grusproducenterne, og her kunne der altså være mulighed for at anvende knust glas sideordnet med andre fraktioner. Der gælder naturligvis de samme forbehold som nævnt for asfaltproduktion, nemlig at der skal findes tilstrækkelige mængder til en rimelig pris.

Til anvendelser som ikke-bærende fyld og dræn omkring rør o.lign. skulle det være muligt at anvende 100% glas. Her vil produktet skulle konkurrere med

andre restprodukter som flyveaske og forbrændingsslagge. Med den nuværende markedssituation, der er opstået efter den nye genanvendelsesbekendtgørelse, tilbydes disse produkter enten gratis eller til meget lav pris til anlægsprojekter. Brug af knust glas vil således kræve, at produktet enten kan leveres på tilsvarende vilkår eller udvise væsentligt bedre tekniske eller miljømæssige egenskaber.

Den angivne mængde overskudsglas i Danmark på omkring 15.000 tons om året udgør en relativt lille mængde i forhold til volumen af andre restprodukter som kulflyveaske (ca. 700.000 tons i 2000) og slagge fra affaldsforbrænding (ca. 500.000 tons i 2000). Dette kan være en fordel idet det vil være relativt let at afsætte hele denne mængde til vejbygning eller fyld hvor der hvert år bruges meget store mængder af tilslag. Samtidig kan den lille mængde dog også være en ulempe, idet det dårligt vil kunne betale sig at opstille systemer for forskellige generelle anvendelser af et materiale med et begrænset volumen.

Til illustration af potentialet for glasgenbrug kan én km to-sporet vej "optage" af størrelsesorden 700 tons i asfaltbærelag, 700 tons i stabilgruslag og 1500 tons i bundsikringslag, i alle tilfælde under forudsætning af at 20% af tilslaget erstattes af knust glas. Til en ren "glasvej", hvor knust glas bruges i alle lag hvor det er teknisk muligt, vil der altså kunne bruges op mod 3000 tons pr. km.

Alternativt vil anvendelse som fyld kunne aftage meget store mængder. I øjeblikket planlægges en ganske vist meget stor dæmning ved Herning, hvor der skal indbygges 2,2 mio. m³, heraf formentlig en meget stor andel af restprodukter som flyveaske og forbrændingsslagge.

En mulig anvendelse, hvor glassets gode drænevne kan udnyttes, er som erstatning for filtergrus omkring drænrør i vejarealer. For et standard motorvejstværsnit med 3 langsgående dræn (i midte og ved hver side) bruges der omkring 500 tons filtergrus pr. km.

I de nuværende danske vejregler er der ikke bestemmelser som direkte umuliggør brug af glas til vejbygning, såfremt forskellige tekniske og miljømæssige egenskaber opfyldes. I de nye fælleseuropæiske normer som træder i kraft i 2004, forventes det heller ikke at der vil være væsentlige hindringer for brug af knust glas.

5 Glas til produktion af glasuld

En stor del af den mineraluld, der anvendes til isolering, er fremstillet af fibreret glas. Dette kaldes også *glasuld*. Glasuld fremstilles ved, at råmaterialer varmes op og smeltes til glas. Den flydende glas bliver spundet til tynde tråde, der limes sammen og presses til mætter.

5.1 Fordele og ulemper ved at inddrage genbrugsglas i produktionen af glasuld

Genbrugsglas kan erstatte en del af råmaterialerne til fremstilling af glasuld og dermed spare naturlige ressourcer (bl.a. sand og kalk).

Dertil kommer, at gensmeltning af glas kræver mindre end halvt så meget energi som fremstilling af nyt glas [1]. Dette betyder både en miljømæssig forbedring og at der er et økonomisk incitament til at inddrage genbrugsglas i produktionen.

5.2 Krav til materialer

Produktionen af glasuld er forholdsvis ufølsom overfor typen af genbrugsglas (farve etc.), når blot leverancen er ensartet fra gang til gang [2].

Produktionen af glasuld er derimod følsom overfor tilstedeværelsen af organisk materiale og keramisk materiale, der ikke smelter som glas og derfor kan tilstoppe produktionsanlægget.

Typiske krav til glas til glasuldsproduktion er [2]:

- partikelstørrelse < 10 mm
- indhold af keramisk materiale < 20 g pr. tons
- indhold af organisk materiale < 12 g pr. tons

5.3 Potentiale

I Danmark fremstilles der ca. 37.000 tons glasuld (2001) [1].

Genbrugsglas kan i teorien erstatte det meste af råmaterialerne, men der kræves i praksis en tilsætning af råmaterialer for at kunne styre egenskaberne af den smeltede glas præcist. Genbrugsglas bruges allerede i vid udstrækning hos den danske producent af glasuld, Saint-Gobain Isover a/s. I 2001 blev der således anvendt 29.500 tons genbrugsglas til produktion af glasuld [1]. Det svarer til, at genbrugsglasset udgør 80% af det færdige produkts vægt.

Det anvendte genbrugsglas stammer primært fra vinduesproducenter og andre kilder, hvor genbrugsglasset er meget rent. Kun en mindre del stammer fra husholdninger (eksempelvis flaskeglas), og den danske producent er generelt ikke særligt interesseret i denne skårtype. Det vurderes derfor, at

mulighederne for at anvende større mængder farvede skår fra husholdningsaffald til fremstilling af glasuld ikke er til stede i Danmark.

6 Glas som sandblæsningsmateriale

Sandblæsning er en ofte anvendt metode til mekanisk afrensning af overflader. Ved denne metode blæses små partikler under tryk mod overfladen, hvorved fx maling og rust slibes af. I Danmark anvendes ofte sand som blæsemiddel – deraf betegnelsen sandblæsning. Men der kan også benyttes andre blæsemidler som fx små kugler af plast, glas eller stål, afhængigt af formålet. I nogle lande benyttes forskellige slaggematerialer.

6.1 Fordele og ulemper ved brug af glas i forhold til andre materialer

Som nævnt findes der mange forskellige blæsemidler. Knust genbrugsglas skal sammenlignes med blæsemidler med tilsvarende egenskaber (samme hårdhed, partikelstørrelse, etc.). Knust genbrugsglas vil typisk kunne erstatte kvartssand som blæsemiddel [1].

Der kan umiddelbart peges på en række fordele ved brug af knust glas til sandblæsning [2]:

- Glaspartiklerne har en kantet geometri, der gør dem effektive til afrensning.
- Glas er et meget rent produkt. Det indeholder ikke salte, der fx kan føre til korrosion, hvis blæsemidlet anvendes på en metalflade. I modsætning til fx blæsemidler baseret på slagge, har glas et lavt indhold af tungmetaller, hvilket især er vigtigt, når materialet benyttes under forhold, der gør det vanskeligt at opsamle blæsemidlet efter brug.
- Der benyttes kvartssand til fremstilling af glas, men under smeltningen omdannes krystallinsk kvarts til amorf kvarts. Omstilling fra brug af kvartssand til brug af knust glas kan derfor være med til at forbedre arbejdsmiljøet, fordi glasset ikke indeholder skadeligt, respirabelt kvarts.

Der er ikke fundet kilder, der nævner nogle specifikke ulemper ved at benytte knust glas frem for andre blæsemidler.

6.2 Potentiale

Det er muligt at købe knust genbrugsglas til sandblæsning i fx USA og Storbritannien [2, 3]. Kundeforsøg har vist tilfredshed med materialet ligesom demonstrationsprojekter er faldet heldigt ud [2]. Kundekredsen for sandblæsningsmaterialer lægger typisk ikke særlig stor vægt på miljøvenlighed og er fx ikke villige til at betale en merpris for et miljøvenligt materiale. I [2] vurderes det imidlertid, at genbrugsglas er konkurrencedygtigt i forhold til andre blæsemidler på det britiske marked.

I Danmark anvendes der 15-18.000 tons engangsblæsemidler om året [4], hvor kvartssand er et af flere midler. Det er ikke umiddelbart muligt at vurdere hvor stor en del af disse blæsemidler, der kan erstattes af knust glas. Det vurderes i øvrigt, at mængden af engangsblæsemidler er faldende (ca. halveret på 5 år [4]).

7 Sammenstilling af muligheder

7.1 Relevans af nye udviklingsprojekter

På baggrund af de foregående kapitlers litteraturstudium vurderes følgende om relevansen af udviklingsprojekter vedrørende alternative anvendelser af skår fra flaskeglas:

- Projekter vedrørende *filler i beton, magringsmidler i tegl, vejbygningsmateriale og sandblæsningsmateriale* vurderes at være meget relevante. Det vurderes at være teknisk muligt at implementere løsninger på de pågældende områder, og at der vil være afsætningsmuligheder for farvede glasskår i tilstrækkeligt store mængder til, at det kan betale sig at beskæftige sig med dem.
- Projekter vedrørende *glasuld* vurderes at være mindre relevante. Dette skyldes, at producenten allerede benytter store mængder genbrugsglas (danskproduceret glasuld indeholder op mod 80% genbrugsglas), men foretrække andre glastyper, der er renere end flaskeglas.
- Projekter vedrørende *tilslag i beton og glasur til keramiske produkter* vurderes ligeledes som værende mindre relevante. Dette skyldes, at de mængder, der kan afsættes til de nævnte formål, er forholdsvis små og derfor ikke vil kunne afhjælpe et affaldsproblem i nævneværdig grad.

7.2 Klassificering af materiale

Fælles for både beton, tegl, vejbygningsmateriale og sandblæsningsmateriale er, at glasset skal være rent, dvs. madrester og lignende skal være fjernet, men de nævnte anvendelser er i øvrigt ikke så påvirkelige af forurening med fx keramiske materialer.

Det, der adskiller kravene til de forskellige anvendelser, er i høj grad kravene til partikelstørrelser, se Tabel 9.

Tabel 9: Krav til glassets partikelstørrelser, afhængigt af anvendelse.

Filler i beton	<ul style="list-style-type: none"> • største partikel: $< \frac{1}{4}$ • middeldiameter: 10-20 μm • specifik overflade: 300-500 m^2/kg
Magringsmiddel i tegl	Enten som skår (hvis knusning er mulig i teglværkets valseværk) eller formalet (største partikel $< 0,8$ mm).
Vejbygningsmateriale	<p>Forholdsvist groft (0-20 mm), se nedenstående figur, hvor de to specifikationer nævnt i kapitel 4 er tegnet ind.</p>
Materiale til sandblæsning	Den optimale størrelsesfordeling afhænger af formålet (som for andre blæsemidler), typisk skal de største partikler være mindre end 1-2 mm.

7.3 Lønsomhed

Det har ikke været formålet med nærværende rapport at udføre en egentlig cost/benefit-analyse for at sammenligne de forskellige muligheder, og på den baggrund at afgøre hvilken, der er den mest lønsomme. Der er derfor ikke gjort noget forsøg på at estimere, hvad omkostningen ved den nødvendige, forudgående bearbejdning af glasset beløber sig til og hvad produkter baseret på genbrugsglas efterfølgende kan sælges til. Tabel 10 giver dog et bud på, hvad priserne er på de produkter, som knust glas i givet flad kan erstatte.

Tabel 10: Oversigt over priser på produkter, som knust glas kan erstatte.

Beton	<i>Tilslag</i> • fx P-sten, 8-16 mm	50-70 kr./tons
	<i>Filler til hvid beton</i> • metakaolin • hvid slagge • hvid mikrosilica	2.000 kr./tons 600-700 kr./tons 5.000-6.000 kr./tons
	<i>Filler til øvrig beton</i> • flyveaske	150 kr./tons
Tegl	<i>Magringsmiddel</i> • sand • chamotte	45 kr./m ³ (incl. transport) 150 kr./tons ¹
	<i>Sintringsmiddel</i>	235 euro/tons ²
Vejbygning	<i>Ubundne lag</i> • 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 ³
	<i>Asfalt⁴</i> • tilslag i asfaltslidlag • tilslag i asfaltbærelag (knust) • tilslag i asfaltbærelag (uknust) • stenmel, 0-2 mm	150-250 kr./tons 80-120 kr./tons 30-100 kr./tons 40-100 kr./tons
Sandblæsning	<i>Engangsblæsemidler</i> • sand • aluminiumsslagge • kobberslagge	180-200 kr./tons 600 kr./tons 465 kr./tons

1. Forudsat fremstilling af chamotte fra teglværkets egne brokker, dvs. prisen dækker knusning og transport.
2. Sintringsmidler anvendes ikke i dansk teglproduktion, men kommercielle produkter forhandles i fx Tyskland.
3. Til anvendelser, hvor der aftages store mængder, kan der i visse tilfælde tilbydes restprodukter som flyveaske og forbrændingsovns slagge ned til en pris på 0 kr.
4. Repræsentant for asfaltindustrien (Anders Kargo, NCC Roads A/S) oplyste til følgegruppemødet den 30.01.2003, at pga. ekstraomkostninger i forbindelse med håndtering af supplerende tilslagsfraktioner, skal knust glas kunne leveres kvit og frit til asfaltværket. I modsat fald forventes det ikke, at man vil bruge knust glas.

En vigtig pointe er prisen for forbehandlingen. Som det fremgår af afsnit 7.2, kræver alle anvendelserne en eller anden form for forbehandling, og en vigtig del af denne er knusning til passende finheder.

Formaling af glasset kræver energi. Formalingen er således både forbundet med en økonomisk udgift og en miljøbelastning, og den er derfor en vigtig faktor ved vurdering af de enkelte anvendelser. Det betyder, at selvom anvendelse af genbrugsglasset som fillermateriale i beton måske er det, der indbringer den højeste pris for glasset, så er det ikke nødvendigvis den bedste

forretning, fordi det samtidigt er denne anvendelse, der kræver den fineste formaling.

8 Referencer

Kapitel 1

- [1] *Udvikling og afprøvning af alternative metoder til genanvendelse af farvede glasskår*, baggrundsnotat, Miljøstyrelsen (maj 2002).

Kapitel 2

- [1] Meland, Inger, & Dahl, Per Arne: *Concrete with Waste Glass Cullets as Aggregates*, proceedings, ed. Dirch H. Bager & Mette Glavind, Nordic Concrete Research Meeting, Helsingør, juni 2002, Norsk Betongforening, pp. 32-34 (2002).
- [2] Dahl, Per Arne: *Glassbetong – dokumentasjon og utførelse*, indlæg på Norsk Betongdag 2000 (gengivet på hjemmesiden: www.glassgjenvinning.no/artikkel.asp?id=141).
- [3] Shao et al.: *Studies on concrete containing ground waste glass*, Cement and Concrete Research, vol. 30, pp. 91-100 (2000).
- [4] Jin, Weihua, Meyer, Christian, & Baxter, Stephen: "Glasscrete" – *Concrete with Glass Aggregates*, ACI Materials Journal, vol. 97, no. 2, pp. 208-213 (2000).
- [5] Shayan, Ahmad: *Value-added Utilisation of Waste Glass in Concrete*, proceedings, IABSE Symposium Melbourne 2002: Towards a Better Built Environment – Innovation, Sustainability, Information Technology, pp. 384-385 (abstract, selve artikel findes på CD, der følger med proceedings) (2002).
- [6] Patent no. WO 01/79131 A1: *Cementitious composition containing glass powder as a pozzolan*, opfinder: Tarig Monawar, dato for offentliggørelse: 25.10.2001.
- [7] *Microfiller® i betong. Produktinformation*. Svensk GlasÅtervinning (2000).
- [8] *Beton-Bogen*, redigeret af Aage D. Herholdt et al., Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor, 2. udgave (1985).
- [9] *DS 481: Beton. Materialer*, Dansk Standard, 1. udgave (1999).

Kapitel 3

- [1] *Additives in the Brick and Tile Industry*, Institut für Ziegelforschung, Essen (1996).
- [2] Stefan Stefanov: *The use of industrial wastes in the brick and tile industry*, Ziegelindustrie International, 3/86 (1986).
- [3] *Kriterier for anvendelse af alternative materialer i tegl- og mørtelprodukter*, Renere Teknologi i Tegl- og Mørtelbranchen (1999).
- [4] Mundtlig beskrivelse ved Jan Rømsgaard, vindø teglværk a/s
- [5] Glas & Mineralmahlwerk Robert Reidt: Datablad for N-Glas, 17/12-2002. Gengivet i bilag B.
- [6] Heinz G. Pfaender: *Schott Guide to Glass* (1996).
- [7] Stan Bedford: *Alternative Uses for Cullet*, Glass, July 1994, p. 256-258.
- [8] WRAP. Recycled Glass, Market Study and Standards Review, May 2002, Section 8

- [9] Brown & Mackenzie: *Process Design for the Production of a Ceramic-like Body from Recycled Waste Glass*, Journal of Material Science 1982, Part 1, The Effect on Fabrication Variables on Green Strength, p. 2164-2170
- [10] Brown & Mackenzie: *Part 2, The Effect of Fabrication Variables on the Physical Properties of the Fired Body*, p. 2171-2183
- [11] Brown & Mackenzie: *Part 3, The Influence of Microstructure and Devitrification Behaviour on the Physical Properties*, p. 2184-2193
- [12] John H. Abrahams: *Recycling Container Glass. An Overview*, Third Mineral Waste Utilization Symposium, March 14-16, 1972, p 144-150, Refereret i [14].
- [13] John Reindl: *Reuse/Recycling of Glass Cullet for Non-Container Uses*, 2002
- [14] som [13]
- [15] Anvendelse af slam i teglproduktion, Arbejdsrapport Nr. 65, Miljøstyrelsen (1993).
- [16] John Clifford, Oregon, USA: Oplysninger pr. mail december 2002. Er oprindeligt refereret i [14]
- [17] Snorre Stephensen: *Bygningskeramik*, Kandidatstipendiatrapport, Arkitektskolen i Aarhus (1970).
- [18] Stefanov & Batschwarov: *Ceramic Glazes* (1988).
- [19] Wolf E. Matthes: *Keramische Glasuren* (1985).

Kapitel 4

- [1] *User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction*, Federal Highway Administration, report FHWA-RD-97-148
- [2] *Best Practises in Glass Recycling*, http://www.cwc.org/glass_bp_list.htm
- [3] *Use of Glass Cullet in Roadway Construction*, ftp://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/gsd/pdf/yrr_feb.pdf
- [4] *Glass Cullet Use for Soil Aggregate Base Course*, <http://www.rmrc.unh.edu/Research/Rprojects/Project13/Specs/p13GC.asp>
- [5] John Reindl: *Reuse/Recycling of Glass Cullet for Non-Container Uses*, Dane County Department of Public Works, Madison, Wisconsin (2002).
- [6] *Recycled Glass Market Study and Standards Review*, http://www.wrap.org.uk/reports_index.asp?ReportID=91&MaterialID=3
- [7] *Glass Recycling Project*, <http://www.monaghan.ie/pdfs/TvaraghRecycle1.pdf>
- [8] *Verwendungsmöglichkeiten von rezykliertem Altglas*, http://l.hsr.ch/skripte/wwwtechnikseiten/bautechnik/materialberichte/lgsc_hwind/glas.pdf
- [9] *Affaldsstatistik 2000*, www.mst.dk
- [10] *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_hm/gl975rpt.htm (1998)

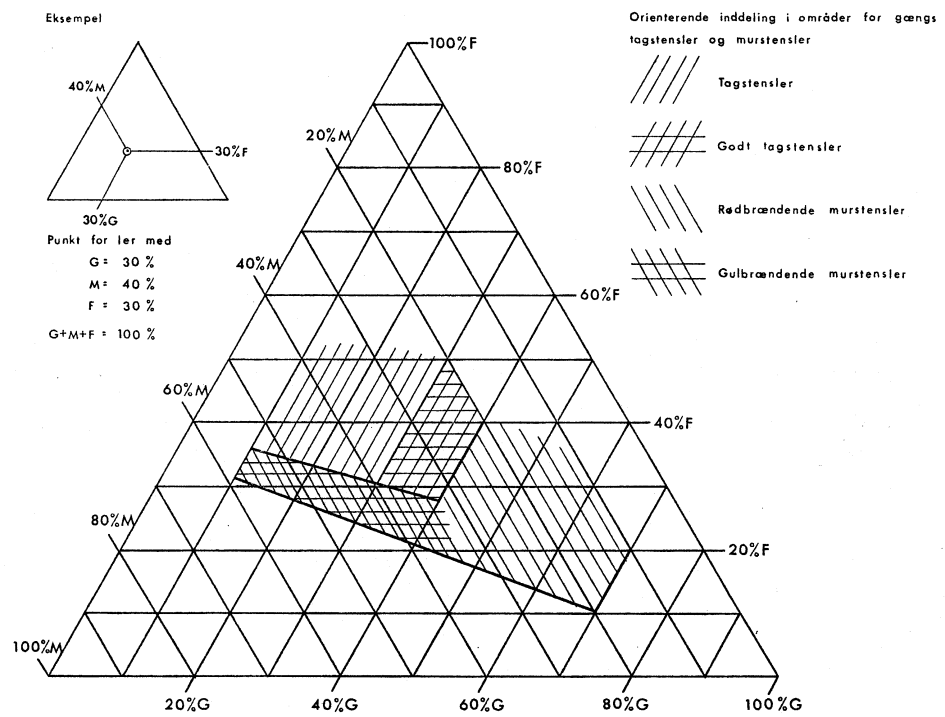
Kapitel 5

- [1] *Sådan fremstilles ISOVER glasuld*. Hjemmeside på www.isover.dk.
- [2] *Fibre glass insulation – the cold facts. WRAP Fact Sheet*. The Waste and Resources Action Programme. Databladet er tilgængeligt på hjemmesiden: www.wrap.org.uk.

Kapitel 6

- [1] *Best Practices in Glass Recycling*. Manual udarbejdet af Clean Washington Centre. Manualen, der løbende opdateres, kan hentes på hjemmesiden www.cwc.org/glass_bp_list.htm.
- [2] *An Introduction to Recycled Glass as an Industrial Abrasive in the UK*. ReMaDe Scotland (Recycling Market Development Scotland) (2001). Rapporten er tilgængelig på ReMaDe's hjemmeside: www.remade.org.uk.
- [3] *Recycled glass – the abrasive facts. WRAP Fact Sheet*. The Waste and Resources Action Programme. Databladet er tilgængeligt på hjemmesiden: www.wrap.org.uk.
- [4] telefonsamtale med Jess Buch Petersen, RGS 90 A/S (den 17. januar 2003).

A Winkler-diagram



Figur 1: Winkler-diagram. Signaturforklaring: F – fint materiale (<1,25 μm). M – mellemfint materiale (1,25– 20 μm). G – groft materiale (> 20 μm).

B Laboratorieundersøgelse af glasmel, N-240

B.1 Indledning

Der er foretaget bestemmelser af densitet, kornform og kornstørrelse af produktet Sintermehl N-240 fra firmaet Robert Reidt. Dette produkt anvendes i Tyskland som tilsætning til lerblandinger på teglværker.

B.2 Prøvemateriale

Fra Robert Reidt er der 19/12-2002 modtaget en prøve af produktet Sintermehl N-Glas N-240. Prøven bestod af ca. 1500 g hvidt pulver.

Beskrivelse og datablade fremgår af afsnit B.6.1.

B.3 Densitet

Materialets densitet blev bestemt efter BS 4550.

Densiteten blev bestemt til 2791 kg/m^3 .

Dette er noget højere end for normalt flaskeglas. Det skyldes givetvis indholdene af BaO og SrO.

B.4 Mikroskopi

Materialet blev undersøgt med polarisationsmikroskop. Pulveret blev først rørt op i propylenglycol.

Mikroskopibilleder ses i Figur 1 og Figur 2 i afsnit B.6.2. De viser kornstørrelser og kornformer. Forstørrelsen er ca. 200x, dvs. billedet svarer til 0,4x0,6 mm. Der kunne konstateres relativt store korn på op til 0,1 mm og en hel del meget mindre korn. Der kunne fokuseres på alle korngrænser samtidigt, hvilket tyder på at alle kornene har en meget flad struktur.

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

B.5 Kornstørrelsesfordeling



Kornstørrelsesfordelingen blev bestemt med Sedigraph. Prøvematerialet blev ikke sigtet på forhånd.

Resultaterne er vist i afsnit B.6.3.

50% fraktil eller median er bestemt til 24 µm.

B.6 Baggrundsmateriale

B.6.1 Datablad

GLAS + MINERALMAHLWERK		ROBERT REIDT <small>GmbH & Co. KG</small>	
<small>Robert Reidt GmbH & Co. KG - Postfach 1746 - 52205 Stolberg</small>		<small>Zweifaller Straße 198 52224 STOLBERG Telefon (02402) 7041-42 Telefax (02402) 75691 www.reidt-gmbh.de info@reidt-gmbh.de Sparkasse Aachen (BLZ 39050000) 1802537 Postgremium Köln (BLZ 37010050) 8128-505 Ust-Ident-Nr.: DE 121738725</small>	
Danish Technological Institute Fax an Herrn Helge Hansen			
<small>Er Zeichen</small>	<small>Ihre Nachricht vom</small>	<small>Unser Zeichen</small>	<small>Tag</small>
-	6.12.	or	17.12.02
 Glasmehl - Sintermehl Sehr geehrter Herr Hansen, wir danken für Ihre Anfrage und reichen Ihnen zunächst die chem. Analyse unseres Sintermehls N-Glas. Dieses Sintermehl hat sich in der Keramik bestens bewährt. Bei Laborversuchen setzt man 3 %, 6 % oder 9 % Sintermehl ein. Ein Muster Sintermehl 240-N, ca. 0-63 µm, senden wir Ihnen sofort per Post zu. Dieses Sintermehl hat einen niedrigen HKP ca. 920°C und hilft deshalb zur Einsparung von Energie. Außerdem erhalten Sie einen dichteren Scherben d.h. geringere Wasseraufnahme und daher frostsichere Keramik. Preis: EUR 235,-/to in Papiersäcken à 25 kg oder Big-Bags. Lieferung: ab Werk Lieferzeit: kurzfristig Zahlung: innerhalb 8 Tagen eingehend ./ 3 % Skonto, " 14 " " netto. Für einen Großversuch stellen wir Ihnen 500 kg Sintermehl 240-N, kostenlos ab hier, zur Verfügung. Zu weiteren Einzelheiten stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung. Mit freundlichen Grüßen Reidt:  Anlage			



Robert Reidt GmbH & Co. KG - Postfach 1746 - 52205 Stolberg

Zweifellos Straße 198
52224 STOLBERG
Telefon (02402) 7041-42
Teletax (02402) 75691
www.reidt-gmbh.de
info@reidt-gmbh.deSparkasse Aachen
(BLZ 39050000) 1802537
Postgarnit Köln
(BLZ 37010050) 8128-505
Ust-Ident-Nr.: DE 121738725

Fr Zeichen

Frei-Nachricht von

Unser Zeichen

Tag

Chemische Analyse N-Glas

Durchschnittsanalyse

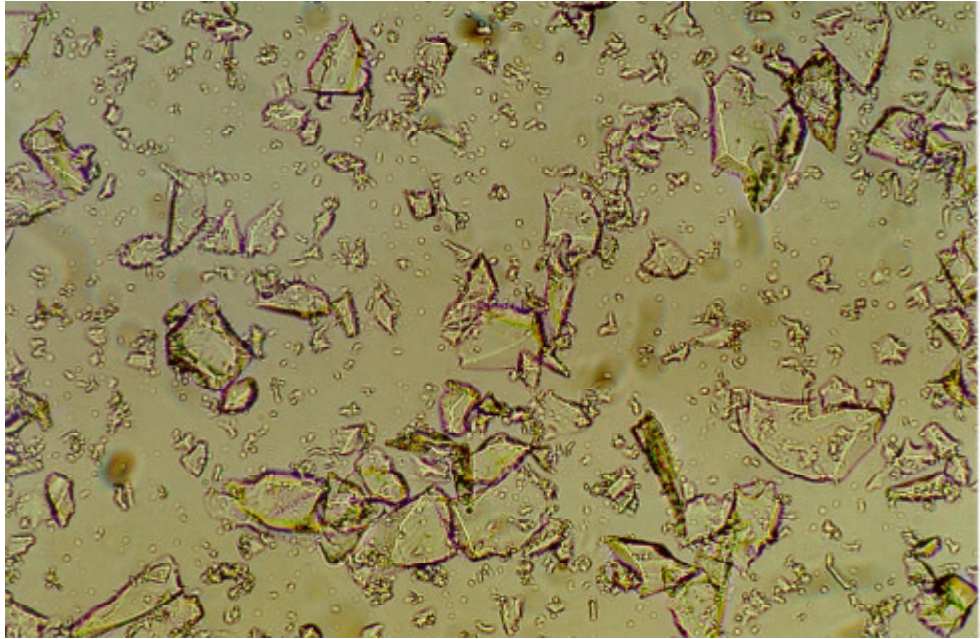
SiO ₂	ca.	60	-	65	%
Al ₂ O ₃	ca.	2	-	4	%
CaO	ca.	1	-	2	%
MgO	ca.	0,8	-	1,5	%
Fe ₂ O ₃	ca.	0,08	-	0,12	%
Na ₂ O	ca.	8	-	10	%
K ₂ O	ca.	6	-	8	%
BaO	ca.	7	-	12	%
SR	ca.	2	-	7	%
Transformationstemperatur	ca.	522° C			
Dilatometrische Erweichungstemperatur	ca.	578° C			
Halbkugelpunkt	ca.	920° C			
Linearer Ausdehnungskoeffizient (20-300°)	ca.	8,9x10 ⁻⁶ grad ⁻¹			

Feinheiten:

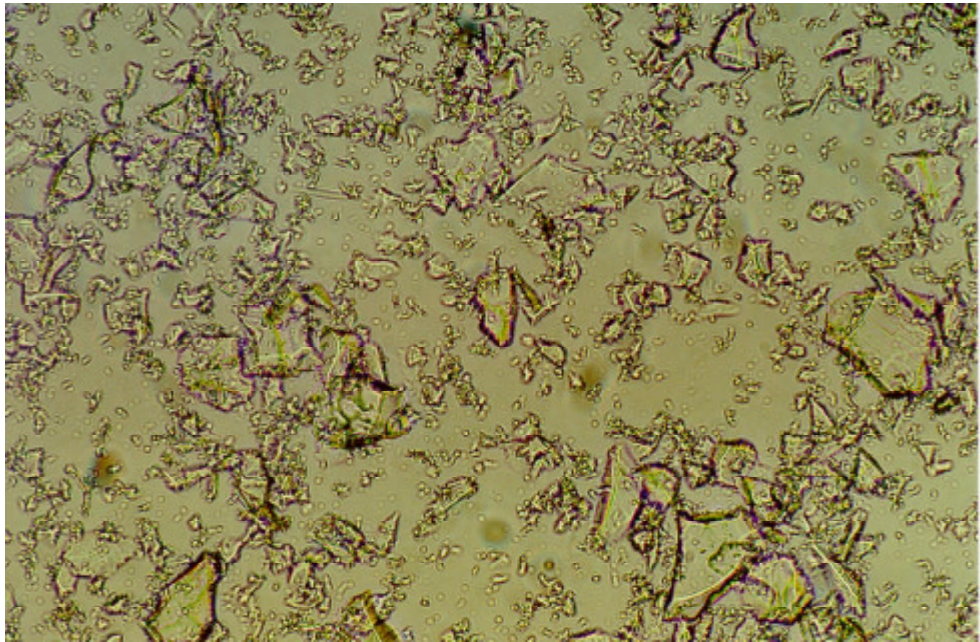
N-220	ca. 0 - 90 my, Siebrückstand ca. 3 %
N-230	ca. 0 - 80 my, Siebrückstand ca. 3 %
N-240	ca. 0 - 63 my, Siebrückstand ca. 3 %
N-300	ca. 0 - 45 my, Siebrückstand ca. 5 %

Andere Feinheiten auf Anfrage

B.6.2 Mikroskopibilleder



Figur 1: Forstørrelse 200x.



Figur 2: Forstørrelse 200x.

B.6.3 Udskrift fra Sedigraph

SediGraph 5100 V3.07

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DIVERSE /28
 SAMPLE ID: 1099531-02;Sintermehl 240-N;17.12.02
 SUBMITTER: MURVAERKSCENTRET
 OPERATOR: bno
 SAMPLE TYPE: sintermehl sigt.v.125
 LIQUID TYPE: 0,8% Na-pyrofosfat-opl.
 ANALYSIS TEMP: 34.2 deg C
 BASELINE/FULL SCALE: 132/ 96 kilocounts/sec

UNIT NUMBER: 1
 START 10:18:33 01/08/03
 REPT 10:44:48 01/08/03
 TOT RUN TIME 0:26:16
 SAM DENS: 2.7910 g/cc
 LIQ DENS: 0.9944 g/cc
 LIQ VISC: 0.7344 cp
 RUN TYPE: High Speed

STARTING DIAMETER: 100.00 μm
 ENDING DIAMETER: 0.20 μm

REYNOLDS NUMBER: 1.80
 FULL SCALE MASS %: 100

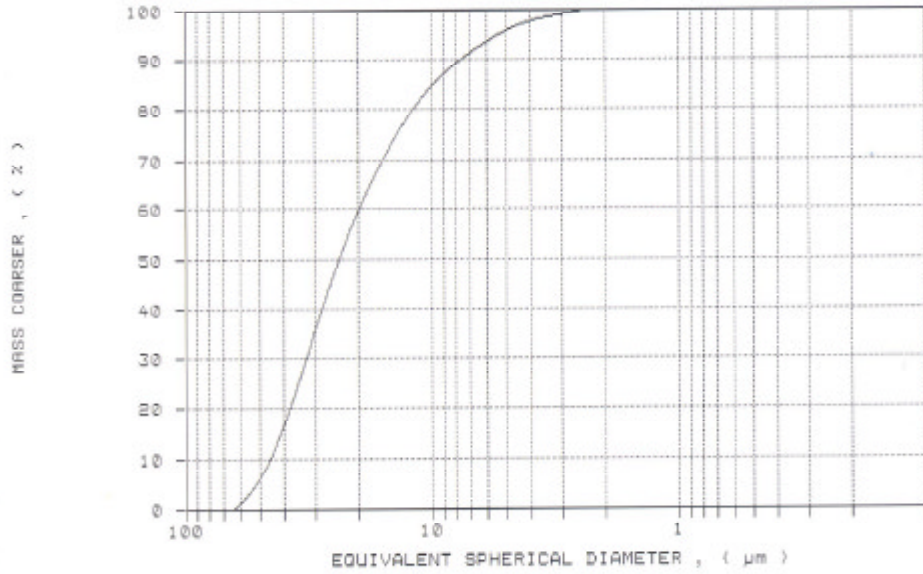
MEDIAN DIAMETER: 24.02 μm MASS DISTRIBUTION MODAL DIAMETER: 31.56 μm

DIAMETER (μm)	CUMULATIVE MASS COARSER (%)	MASS IN INTERVAL (%)
100.00	-4.1	-4.1
80.00	-2.7	1.5
60.00	1.3	4.0
50.00	6.4	5.2
40.00	17.0	10.6
30.00	35.8	18.8
25.00	47.6	11.8
20.00	59.9	12.3
15.00	72.3	12.5
10.00	84.9	12.6
8.00	89.4	4.5
6.00	93.7	4.3
5.00	95.9	2.2
4.00	97.7	1.8
3.00	98.9	1.2
2.00	100.8	1.9
1.50	101.9	1.1
1.00	102.5	0.6
0.80	102.8	0.4
0.60	102.8	-0.0
0.50	103.0	0.2
0.40	105.7	2.7
0.30	115.4	9.7
0.20	131.8	16.4

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DIVERSE /28
SAMPLE ID: 1099531-02;Sintermehl 240-N;17.12.02
SUBMITTER: MURVAERKSCENTRET
OPERATOR: bno
SAMPLE TYPE: sintermehl sigt.v.125
LIQUID TYPE: 0.8% Na-pyrofosfat-opl.
ANALYSIS TEMP: 34.2 deg C
BASELINE/FULL SCALE: 132/ 96 kilocounts/sec

UNIT NUMBER: 1
START 10:18:33 01/08/03
REPT 10:44:48 01/08/03
TOT RUN TIME 0:26:16
SAM DENS: 2.7910 g/cc
LIQ DENS: 0.9944 g/cc
LIQ VISC: 0.7344 cp
RUN TYPE: High Speed

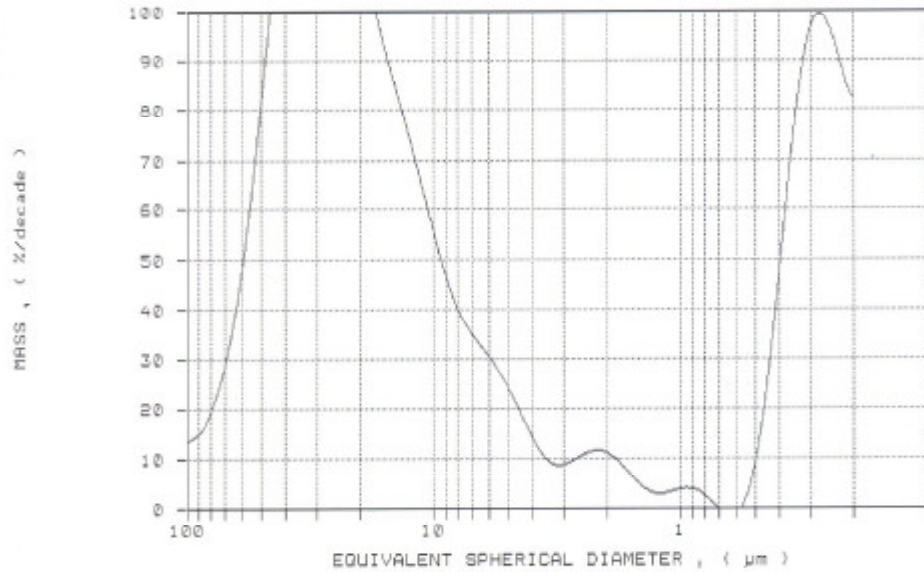
CUMULATIVE MASS PERCENT COARSER VS. DIAMETER



SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DIVERSE /28
SAMPLE ID: 1099531-02;Sintermehl 240-N;17.12.02
SUBMITTER: MURVAERKSCENTRET
OPERATOR: bno
SAMPLE TYPE: sintermehl sigt.v.125
LIQUID TYPE: 0,8% Na-pyrosfosfat-opl.
ANALYSIS TEMP: 34.2 deg C
BASELINE/FULL SCALE: 132/ 96 kilocounts/sec

UNIT NUMBER: 1
START 10:18:33 01/08/03
REPR 10:44:48 01/08/03
TOT RUN TIME 0:26:16
SAM DENS: 2.7910 g/cc
LIQ DENS: 0.9944 g/cc
LIQ VISC: 0.7344 cp
RUN TYPE: High Speed

MASS POPULATION VS. DIAMETER



C Glasurer baseret på glasmel

C.1 Indledning

Der er foretaget undersøgelser med stereomikroskop med måleokkular af overflader på glasurprøver fra Snorre Stephensens projekt "Bygningskeramik", Arkitektskolen i Århus, 1970.

C.2 Prøvemateriale

Der er udvalgt en gulbrændt sten med 5 glasurprøver benævnt 54 A – E. Det gulbrændende ler er fra Slet Teglværk og stenen er brændt på Tilst Teglværk ved 1060 til 1100°C med 3 timers holdetid.

Glasurernes sammensætning er angivet i Tabel 1.

Tabel 1: Sammensætning af glasur (vægt-%).

	54A	54B	54C	54D	54E
Fritte J	50				12,5
Fritte F		50			12,5
Borax			50		12,5
Kryolit				50	12,5
Glasmel	50	50	50	50	50

Fritterne er borfritter. Der er tale om glasurerne med størst indhold af glasmel.

Glasurerne vurderes således af Snorre Stephensen:

54A: mælkehvid halvsmeltet

54B: mælkehvid halvsmeltet

54C: usmeltet

54D: ikke angivet

54E: hvid halvsmeltet

C.3 Mikroskopiundersøgelser

Glasuroverfladerne er undersøgt visuelt med det blotte øje og med stereomikroskop med måleokkular.

Mikroskopifotos er gengivet i 30x forstørrelse i afsnit C.5.

54A, Alkalifritte:J glasmel, 1:1

Visuel bedømmelse: Glasuren er hvidlig og tildels smeltet

Mikroskopi (se Figur 1 og Figur 2):

Glasuren er smeltet uden synlige krystaller

Glasurens overflade er glinsende og glat
Der er mange, til dels bristede luftbobler, op til 0,5 mm
Glasuren er krakeleret

54B, Alkalifritte F: glasmel, 1:1

Visuel bedømmelse: Glasuren er hvidlig og til dels smeltet

Mikroskopi (se Figur 3 og Figur 4):

Glasuren er til dels smeltet, den er ikke så jævn som 54A

Der ses store til dels bristede luftbobler

Glasuren er krakeleret, og der ses krakeleringer nede i glasuren

54C, natriumborat: glasmel, 1:1

Visuel bedømmelse: Glasuren er ikke smeltet, farven er lys violet

Mikroskopi (se Figur 5 og Figur 6):

Glasuren er gennemsat af svindrevner

Strukturen ligner glaskorn overtrukket med en krystallinsk fase

Mulig smeltefase ses kun sporadisk i overfladen

Overfladen er hårdere end stål

54D, Kryolit: glasmel, 1:1

Visuel bedømmelse: Glasuren er ikke smeltet, den er mat og lidt brunlig

Mikroskopi (se Figur 7 og Figur 8):

Glasuren består af hvide sammensintrede krystaller, størrelse ca. 0,1 mm

54E, Glasmel : Fritte J : Fritte F: natriumborat : kryolit, 4:1:1:1

Visuel bedømmelse: Glasuren er hvidlig og til dels smeltet

Mikroskopi (se Figur 9 og Figur 10):

Glasuren er blank og glinsende

Glasuren har en ujævn overflade

Oprindelige glasparkler skimtes svagt, størrelse ca. 0,1 mm

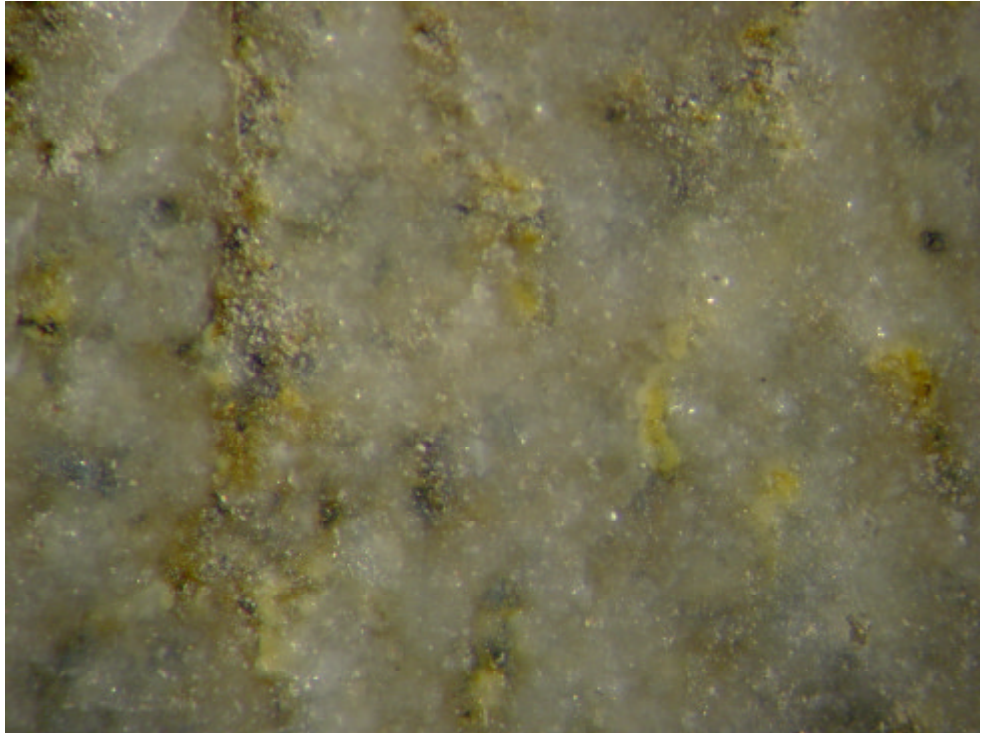
Der ses ingen krakeleringer

C.4 Kommentarer

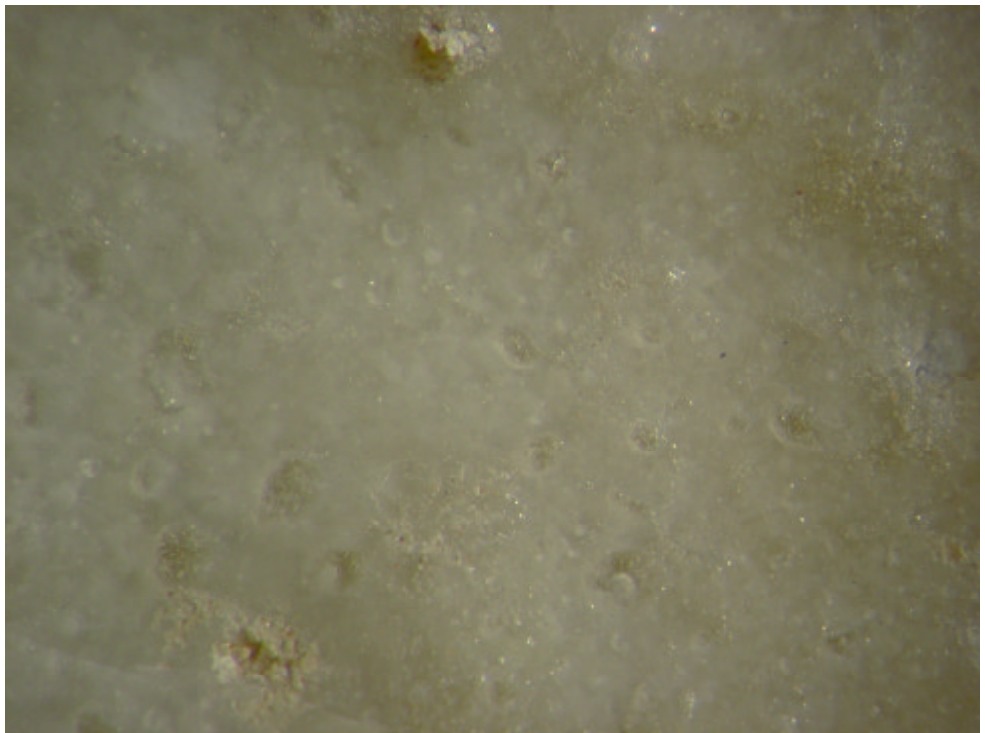
Det er karakteristisk, at der kun er delvis overensstemmelse mellem det visuelle indtryk, og hvad der ses i mikroskopet mht. uds melting. Således er 54E blank i mikroskopet, hvad der ikke er tilfældet ved den visuelle bedømmelse.

Det ser ud til, at glaspulveret kun i begrænset udstrækning opblandes med eller reagerer med de øvrige bestanddele. Det reagerer mest med Fritte J i 54A. I 54E ser det ud til, at alle de øvrige bestanddele danner en glas der omslutter glaspulveret.

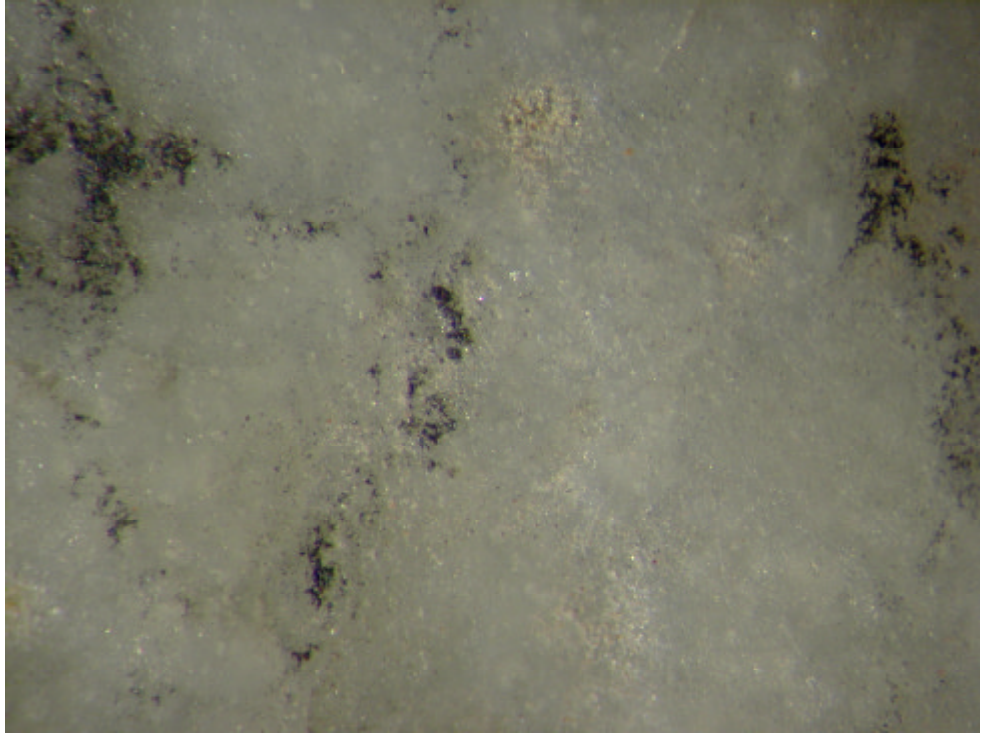
C.5 Mikroskopibilleder



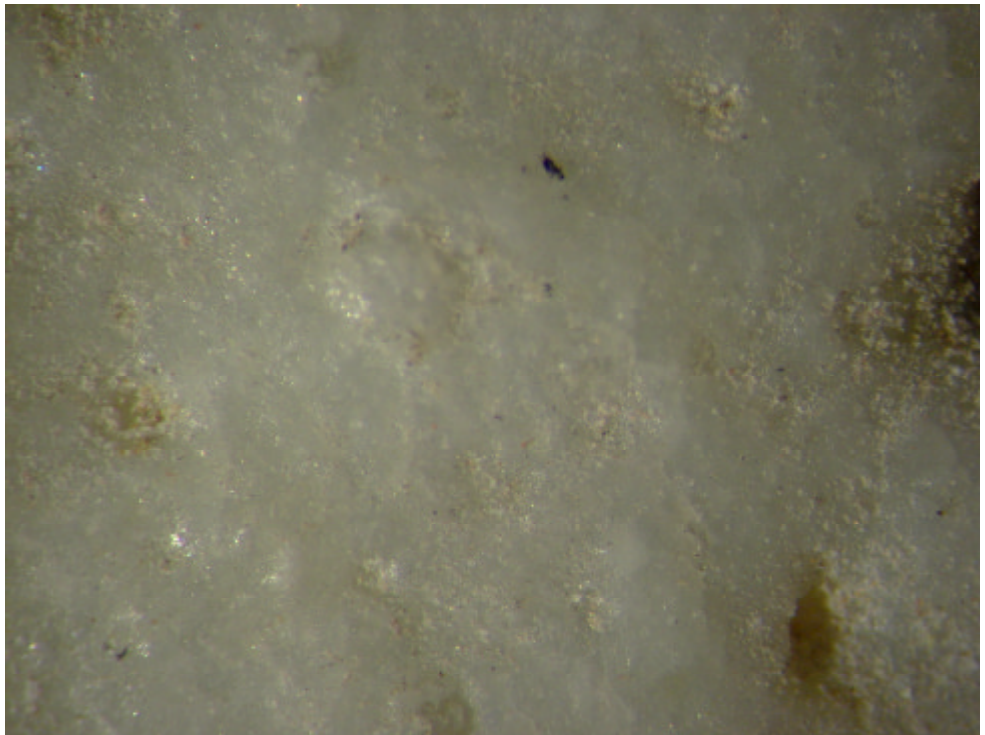
Figur 1: Prøve 54A.



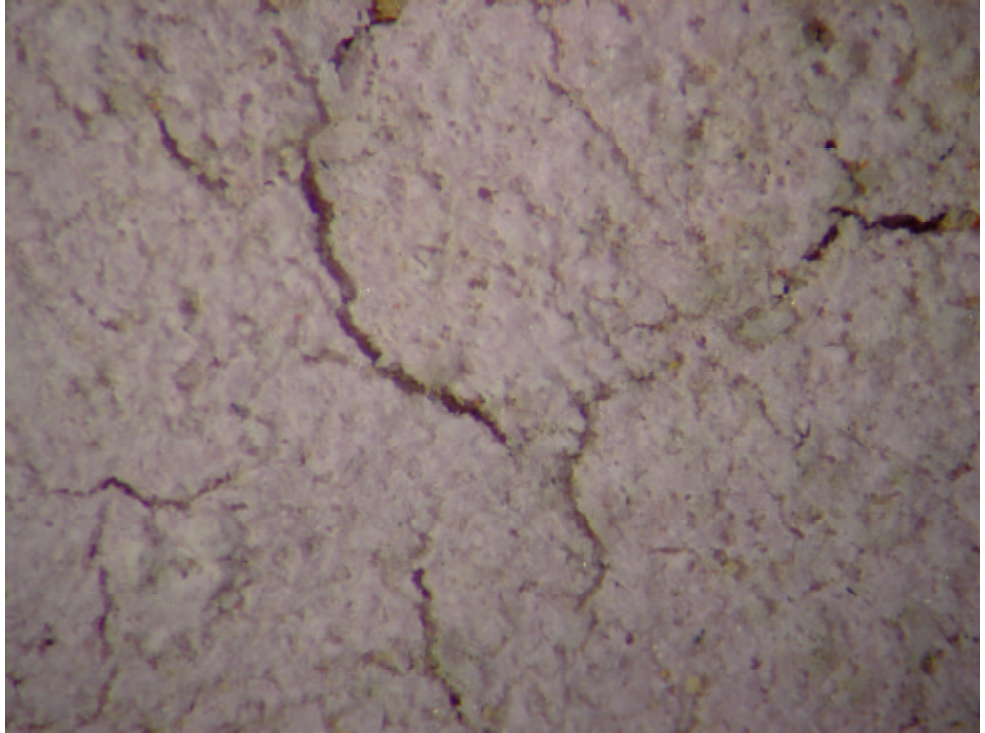
Figur 2: Prøve 54A



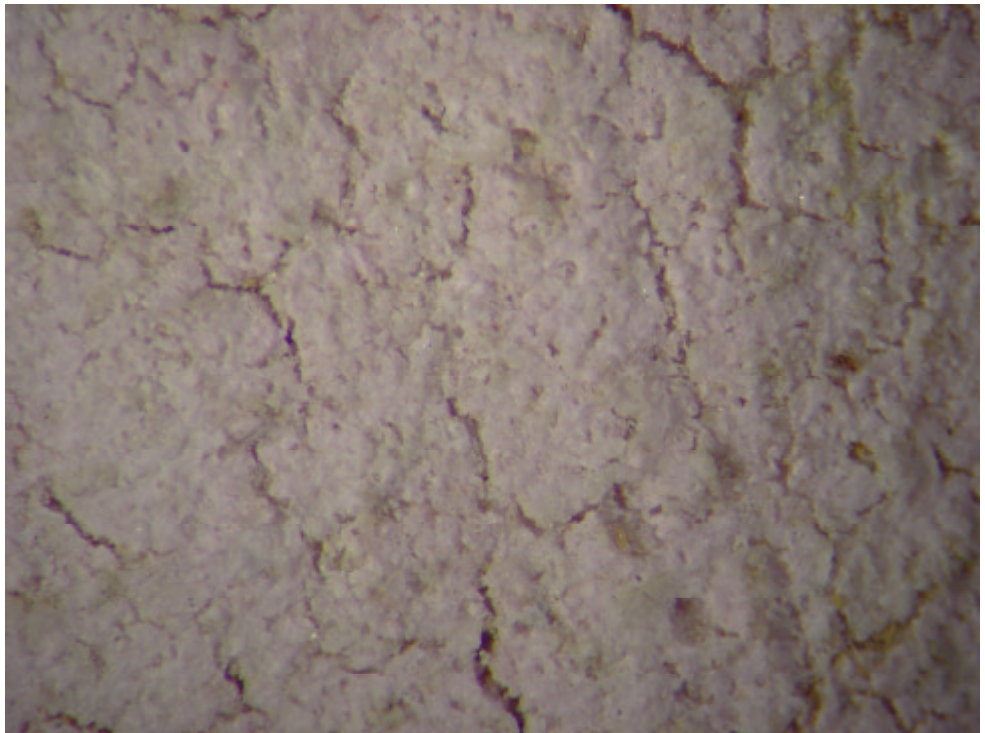
Figur 3: Prøve 54B



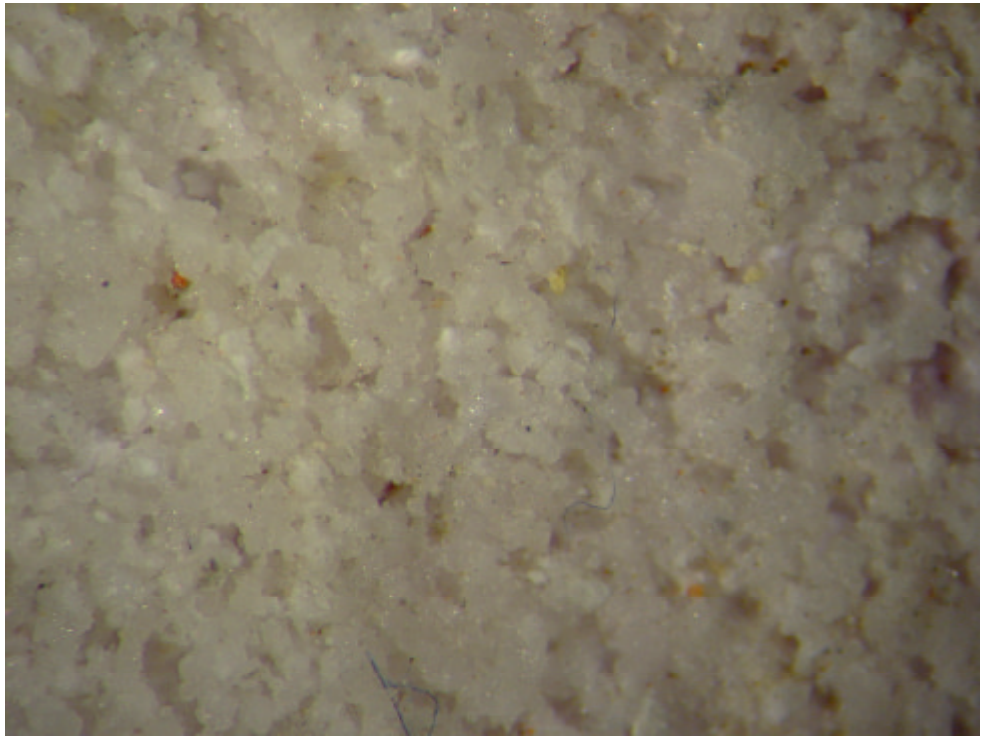
Figur 4: Prøve 54B



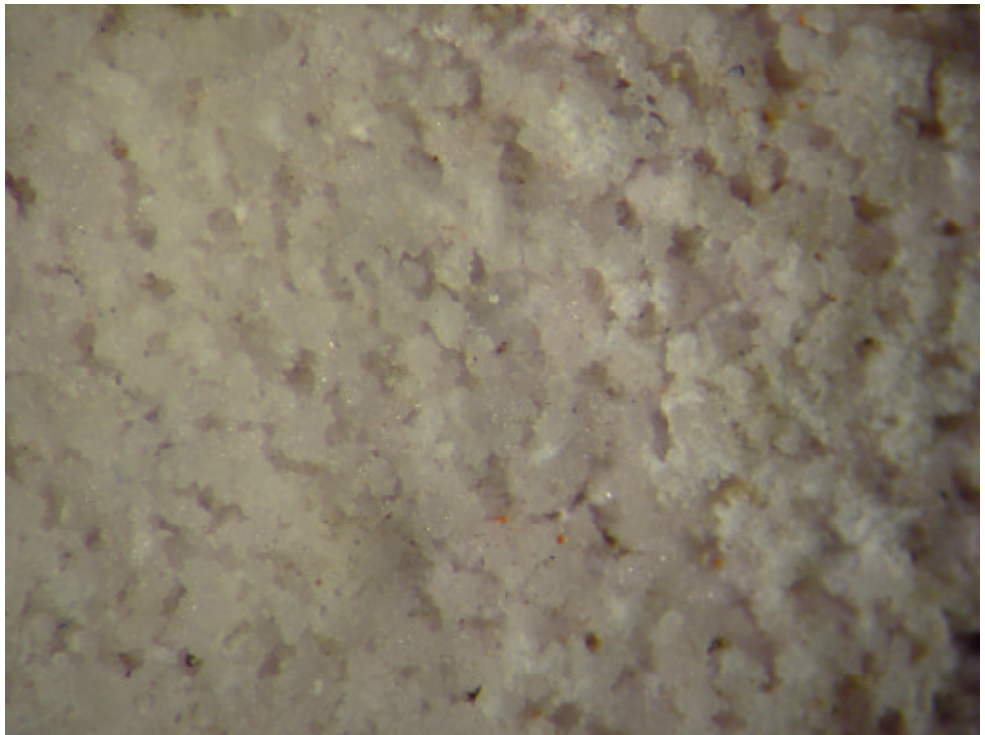
Figur 5: Prøve 54C



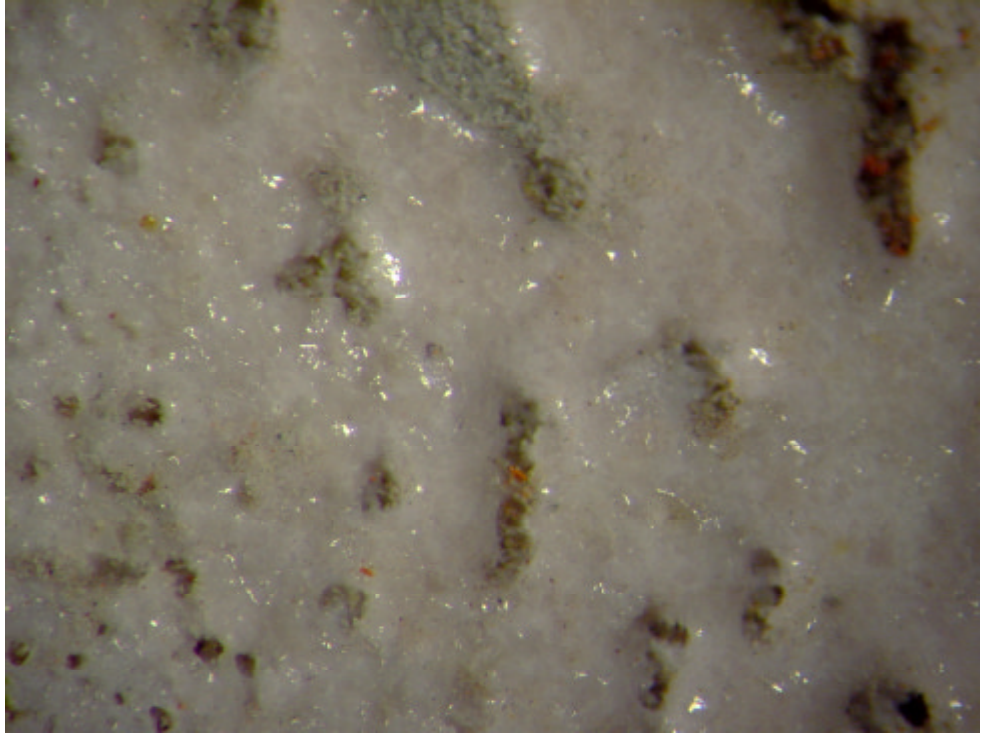
Figur 6: Prøve 54C



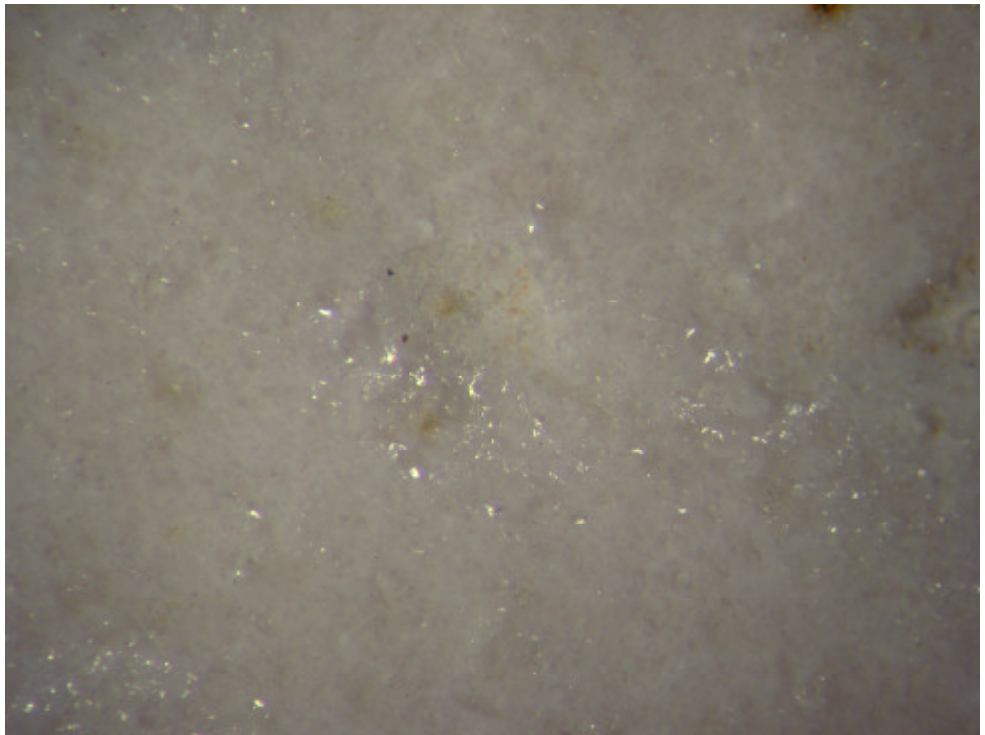
Figur 7: Prøve 54D



Figur 8: Prøve 54D



Figur 9: Prøve 54E



Figur 10: Prøve 54E