



Udvikling af oparbejdnings- teknologier og genanvendelses- løsninger til mineraluld MUDP-projekt

MUDP Rapport

August 2025

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Thilde Fruergaard Astrup, Teknologisk Institut

Anders Bank Blichfeld, Teknologisk Institut

Bjørn Malmgren-Hansen, Teknologisk Institut

Per Sigaard Christensen, Teknologisk Institut

Jette Bjerre Hansen, Norrecco A/S

Mona Ammitzbøll Rasmussen, Saint-Gobain Denmark A/S

ISOVER

ISBN: 978-87-7564-022-5

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. 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.

Må citeres med kildeangivelse.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
[MUDP's hjemmeside](#)

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	6
Sammenfatning	7
1. Introduktion	9
1.1 Baggrund	9
1.2 Projektets formål	10
2. Klassificering af mineraluld	11
2.1 Fakta om mineraluld	11
2.2 Produktion af mineraluld	12
2.3 Historisk gennemgang af mineralulds klassificering	14
2.3.1 Lungernes rensfunktion	14
2.3.2 Udvikling af bioopløselige fibre	15
2.4 Klassificering af mineraluld	16
2.4.1 Klassificering af mineraluld som produkt	17
2.4.2 Klassificering af mineraluld som affald	18
2.5 Håndtering af mineraluld som affald	18
2.6 Hvilken betydning har det, at mineraluld produceret før 1997 klassificeres som farligt affald?	19
2.7 Relevante tests og analyser	19
2.7.1 Udvikling af mindre biopersistente mineraluldsfibre	20
2.7.2 Anvendelse af tests og analyser til vurdering af mineralulds klassificering	21
2.7.2.1 Kemisk sammensætning	21
2.7.2.2 In-vivo og in-vitro tests	21
2.8 Konklusion og anbefalinger i forhold til klassificering af mineraluldsaffald	22
3. Arbejdsmiljø	24
3.1 Mineraluldsbekendtgørelsen	24
3.2 Leverandørbrugsanvisninger	24
3.3 Konkrete anvisninger for projektet	25
4. Materialekrav for genanvendt mineraluld i asfalt, tegl og glasuld	26
4.1 NCC	26
4.2 Strøjer Tegl	27
4.3 ISOVER	28
4.4 Oversigt over materialekrav for produktspecifik genanvendelse	29
4.5 Produktspecifik oparbejdning af mineraluld	30
5. Oparbejdning og karakterisering af neddelt mineraluld	31
5.1 Forsøg med basiskarakterisering	32
5.1.1 Indledende forsøg med neddeling af mineraluld hos Norrecco	32
5.1.2 Indledende forsøg med neddeling af mineraluld ved Nordic Waste	33
5.1.3 Resultat af basiskarakterisering	34
5.2 Undersøgelse: Omklassificering af neddelt mineraluld ift. CLP-forordningens Note R	35

5.3	Sortering og håndtering af mineraluld til genanvendelse	38
5.4	Udvikling af neddelingsteknologi	39
5.4.1	Udviklingsforsøg med hammermølle ved Nordic Waste	40
5.4.2	Udviklingsforsøg med skruekomprimatorer ved Norrecco	42
5.4.2.1	Type 1: Skruekomprimator fra Hansek Maschinenbau	42
5.4.2.2	Type 2: Skruekomprimator fra Runi	45
5.4.2.3	Type 3: Skruekomprimator fra Retec	46
5.4.3	Evaluering af udviklingsforsøg hos Nordic Waste og Norrecco	47
5.5	Evaluering af resultater fra forsøg i forhold til anvendelser	47
5.5.1	Vurdering af genanvendelse i tegl	47
5.5.2	Vurdering af genanvendelse i asfalt	48
5.5.3	Vurdering af genanvendelse i ny glasuld	48
6.	Konklusion	49
7.	Referencer	50
Bilag 1.Modtagelse og oparbejdning af mineraluld hos Norrecco og Nordic Waste		51
Bilag 2.Detaljeret resultat af basiskarakterisering		53
Bilag 2.1	Glødetab og tørstof indhold	53
Bilag 2.2	Bestemmelse af partikelstørrelsesfordelinger med sigtetårnsanalyser og analyser med Mastersizer	54
Bilag 2.3	1D-partikelstørrelsesfordelinger – Mastersizer	57
Bilag 2.4	Morfologi	59
Bilag 2.5	Analyser af mineralsammensætning	66
Bilag 2.6	Forsøg med vandmætning	66
Bilag 2.7	Bestemmelse af binderindhold med termogravimetrisk analyse	67

Forord

Projektet 'Udvikling af oparbejdningsteknologier og genanvendelsesløsninger til mineraluld' blev gennemført i perioden 1. januar 2021 til 1. september 2022.

Formålet med projektet var at udvikle oparbejdningsteknologier til behandling af mineraluldsaffald, så affaldet ikke deponeres, men i stedet genanvendes. Gennem projektet er der blevet arbejdet med udvikling af neddelingsteknologier til mineraluldsaffald. Der er ligeledes arbejdet med karakterisering og vurdering af teknologierne i forhold til genanvendelse af mineraluld i asfalt, teglprodukter eller nye glasuldsprodukter uden at forringe muligheden for senere at genanvende de nye produkter.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem Norrecco A/S, Nordic Waste A/S, Saint-Gobain Denmark A/S, ISOVER, Strøjer Tegl A/S, NCC Industry A/S og Teknologisk Institut. Projektet blev støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP), som administreres af Miljøstyrelsen.

Projektets primære deltagere var:

- Jette Bjerre Hansen, Norrecco A/S
- Jan Christensen, Norrecco A/S
- Christian Bruun Nielsen, Nordic Waste A/S
- Mona Ammitzbøll Rasmussen, Saint-Gobain Denmark A/S, ISOVER
- Asbjørn Bruun, Strøjer Tegl A/S
- Bjarne Bo Lund-Jensen, NCC Industry A/S
- Thilde Fruergaard Astrup, Teknologisk Institut
- Anders Bank Blichfeld, Teknologisk Institut
- Bjørn Malmgren-Hansen, Teknologisk Institut
- Per Sigaard Christensen, Teknologisk Institut.

Projektets styregruppe har bestået af:

- Karsten Ludvigsen, Norrecco A/S
- Christian Bruun Nielsen, Nordic Waste A/S
- Mona Ammitzbøll Rasmussen, Saint-Gobain Denmark A/S, ISOVER
- Asbjørn Bruun, Strøjer Tegl A/S
- Jonas Kildegaard Iversen, NCC Industry A/S
- Sofie Kastbjerg, Teknologisk Institut
- Thilde Fruergaard Astrup, Teknologisk Institut.

Sammenfatning

I Danmark produceres der i dag betydelige mængder af mineraluldsaffald. Der indsamles hvert år omkring 21.000 tons mineraluldsaffald i de danske kommuner, hvoraf næsten halvdelen bliver deponeret. Både miljømæssigt og økonomisk er deponering en omkostningstung affære, der bør begrænses til et minimum. Den nyeste EU-handlingsplan for cirkulær økonomi (COM/2020/98) nævner specifikt, at isoleringsmaterialerne i bygge- og nedrivningsaffald kræver særlig opmærksomhed.

I dag kan ren stenuld genanvendes i nye isoleringsprodukter, men der er ikke etableret robuste genanvendelsesløsninger med tilstrækkelig kapacitet for den store mængde af blandet sten- og glasuldsaffald, der ikke lever op til renhedskravene for returordningen. Tilsvarende er der i dag (2022) ikke en direkte genanvendelsesløsning for glasuld til produktion af ny glasuld.

Formålet med projektet har været at udvikle en oparbejdningsteknologi, der muliggør etablering af nye robuste og veldokumenterede genanvendelsesløsninger, så mineraluld (henholdsvis stenuld og glasuld samt en blandet fraktion) kan neddeles, omklassificeres og genanvendes uden miljø- eller sundhedsmæssig risiko.

En vigtig forudsætning for, at mineraluld kan genanvendes, er, at de oparbejdede kvaliteter imødekommer krav til de specifikke anvendelser. I projektet er der udarbejdet materialekrav til genanvendelse af oparbejdet mineraluld i hhv. tegl, asfalt og ny glasuld. Der er gennemført en række forsøg med oparbejdning af mineraluld, og genanvendelsespotentialer for de opnåede fraktioner er blevet vurderet til brug i fremstilling af asfalt, teglprodukter eller nye glasuldsprodukter. En vigtig forudsætning for genanvendelse i tegl og asfalt har vist sig at være omklassificering af affald fra mineraluld produceret før 1997 (gammel mineraluld) fra farligt affald til ikke-farligt affald. Projektet har belyst mulighederne for omklassificering i affaldshåndteringsleddet og fandt, at opfyldelse af CLP-forordningens Note Q eller alternativt Note R er afgørende for berettigelse af en mulig omklassificering.

En grundig gennemgang af grundlaget for klassificering af mineraluld har vist, at det ikke er muligt på operationelt niveau at omklassificere mineraluldsaffald fra farligt affald til ikke-farligt affald, jf. Note Q. Samtidig har en række forsøg med forskellige neddelingsteknologier vist, at selv med de bedste, tilgængelige neddelingsteknologier kan betingelsen for omklassificering, jf. Note R, heller ikke opfyldes. Det betyder, at genanvendelsesmulighederne for mineraluldsaffald i tegl og asfalt er begrænsede, idet man hverken hos asfaltindustrien eller på teglværkerne ønsker at anvende mineraluld, der er klassificeret som farligt affald, som råvare. For at modvirke den nuværende deponering og sikre genanvendelse af den blandede mineraluldsfraktion betyder det, at danske myndigheder med basis i WHO/IARC2002 bør undersøge muligheden for at omklassificere mineraluldsaffald (se nærmere herom i kapitel 2).

For at kunne sikre en datering og deraf følgende klassificering af affald af mineraluld produceret efter 1997 (ny mineraluld) undersøgte projektet efterfølgende muligheden for genanvendelse af mineraluldsaffald fra nybyggeriet. Gennem en udsorteringsindsats for en ren mineraluldsfraktion fra byggepladser blev det fundet, at der skal ske enten en ekstraordinær indsats på byggepladserne for at sikre tilstrækkelig rene, kildesorterede fraktioner eller en eftersortering på et modtageanlæg, før renhedskravene for genanvendelsen kan imødekommes. Der er i projektet ikke arbejdet videre med udvikling af løsninger til sortering af mineraluld.

Det blev eftervist, at genanvendelse af mineraluld i tegl er udfordret af manglende tilgængelighed af en velsorteret og ensartet mineraluldsfraktion med et minimumindhold af stenuld på

85%. Ligeledes forudsætter genanvendelsen af mineraluld til ny glasuld en velsorteret mineraluldsfraktion af glasuld. Foruden klassificering som farligt affald blev genanvendelsen af blandet mineraluldsaffald i asfalt fundet at være udfordret af mineraluldsaffaldets fugtegenskaber i samspil med asfalten, hvilket ifølge tidligere test indikerer en forringelse af asfaltens bestandighed overfor vandpåvirkning. Dette er dog ikke undersøgt til bunds i nærværende projekt.

Blandt projektets deltagende virksomheder er det vurderet, at såfremt man på nationalt plan ønsker at reducere mængden af mineraluldsaffald, som afsættes til deponi, anbefales det, at undersøge muligheden for at ændre på den nuværende lovgivningspraksis, for klassificering af mineraluldsaffald, og at der udarbejdes tilhørende klare retningslinjer og incitamentsstruktur til sortering og genanvendelse af mineraluld.

1. Introduktion

Hvert år bliver der indsamlet omkring 21.000 tons mineraluldsaffald i de danske kommuner, hvoraf næsten halvdelen bliver deponeret. I projektet er målet at udvikle nye teknologier, så mineraluldsaffaldet i stedet kan oparbejdes og genanvendes.

1.1 Baggrund

Mineraluld, der er en samlet betegnelse for isoleringsmaterialer af stenuld eller glasuld, anvendes til isolering i bygninger og installationer. I Danmark produceres der i dag betydelige mængder af mineraluldsaffald. Der indsamles hvert år omkring 21.000 tons mineraluldsaffald i de danske kommuner, hvoraf næsten halvdelen bliver deponeret.

Både miljømæssigt og økonomisk er deponering en omkostningstung affære, der bør begrænses til et minimum. Derudover er deponeringskapaciteten i Danmark både begrænset og faldende, og det er meget udfordrende at etablere nye deponeringsanlæg. Netop isoleringsmaterialerne er særligt uønskede på deponeringsanlæggene pga. materialernes ringe komprimeringsegenskaber, da man deponerer store volumener luft pga. mineraluldens meget lave massefylde. En estimeret volumenbetragtning, hvor mineraluld har en massefylde omkring 0,15 tons/m³ mod det øvrige deponeringsaffalds gennemsnitlige massefylde omkring 1,5 tons/m³, indikerer, at der optages et volumen, som er en faktor 10 gange større ved deponering af mineraluld sammenlignet med typisk øvrigt deponeringsaffald. Dog sker der en kompaktering af affaldet på deponeringsanlægget efter modtagelsen.

Genbrug og genanvendelse af bygge- og anlægsaffald står højt på den miljøpolitiske dagsorden, hvilket bl.a. er udtrykt i regeringens strategi for cirkulær økonomi fra 2018, og senest er håndtering af isoleringsmaterialer som bygge- og nedrivningsaffald fremhævet af EU-Kommisjonen i handlingsplanen for cirkulær økonomi (COM/2020/98). I dag kan ren stenuld genanvendes i nye isoleringsprodukter (fx gennem Rockwools returordning, RW_2020). Det fremgår af en rapport fra Rambøll (Rambøll_2020), at Rockwool i 2019 modtog ca. 8.600 tons stenuld til genanvendelse, og Leca modtog ca. 4.000 tons mineraluld til genanvendelse i produktionen af Lecanødder. Det fremgår endvidere af rapporten, at det ikke har været muligt at afdække, hvor store mængder der hhv. er genanvendt, nyttiggjort til andre formål eller deponeret. Rapporten viser, at der er en betydelig uigennemsigthed i, hvordan mineraluld håndteres og disponeres – uanset om det er til genanvendelse, nyttiggørelse eller deponering.

På trods af eksisterende løsninger er der ikke etableret robuste genanvendelsesløsninger med tilstrækkelig kapacitet for den store mængde stenuldsaffald, der ikke lever op til renhedskravene for returordningen, eller for glasulden. Særligt er den meget store mængde blandet sten- og glasuldsaffald i dag uden genanvendelsesmulighed. Udover kapacitetsbegrænsninger i de nuværende løsninger er genanvendelsen udfordret af, at mineraluld produceret før 1997 i dag er klassificeret som farligt affald, da visse mineraluldsfibre af historiske årsager (som gennemgås i kap. 2.3) fortsat er klassificeret som 'muligvis kræftfremkaldende', skønt dette sidenhen er statistisk og lægefagligt modbevist af WHO/IARC (WHO/IARC2002). Sikkerheden og opfattelsen af klassificeringen omkring genanvendelsen er således vigtige barrierer at overkomme, idet disse har afsmittende virkning på opfattelsen af fraktioner af nyt mineraluldsaffald, eftersom denne fraktion kan være svær at skelne fra, og ofte er blandet sammen med, klassificerede fraktioner.

1.2 Projektets formål

Formålet med dette projekt er at udvikle en oparbejdningsteknologi, der muliggør etablering af nye robuste og veldokumenterede genanvendelsesløsninger, så mineraluld (henholdsvis sten- og glasuld) kan neddeles og genanvendes uden miljø- eller sundhedsmæssig risiko. Gennem projektet udvikles og analyseres neddelte mineraluldsfraktioner til brug i fremstilling af asfalt, teglprodukter eller nye glasuldsprodukter uden at forringe muligheden for senere at genanvende disse. Dette stiller krav til både partikelstørrelser, fiberlængder, indhold af urenheder, mineralsammensætning og fiberkemi i de neddelte fraktioner, samt at neddelingen kan foretages i storskala for også at gøre genanvendelsen økonomisk rentabel.

Projektets mål er:

- **Udvikling og opskalering af oparbejdningsteknologi med de ønskede outputfraktioner**
Fraktioner skal overholde kravspecifikationer fra aftagere, ikke være klassificerede som farlige og kunne opskaleres til almindelig drift.
- **Dokumentation af tekniske samt miljø- og sundhedsmæssige egenskaber af materialer og produkter**
Der foreligger klar dokumentation for materialeegenskaber til vurdering inden for gældende rammebetingelser.
- **Udvikling og storskalaframstilling af tegl og asfalt tilsat neddelt mineraluld. Vurdering af genanvendt råvare til fremstilling af ny glasuld**
Nye produkter skal overholde nuværende krav og kunne indgå i eksisterende produktionsflow. (Dette arbejde blev ikke gennemført i projektet, da der ikke var teknisk grundlag for at gennemføre disse forsøg - se afsnit 5.5).
- **Sikring af arbejdsmiljø ved håndtering af mineraluld gennem hele oparbejdningsprocessen**
Mineraluld kan neddeles, oparbejdes og genanvendes med tilfredsstillende sikkerhed og arbejdsmiljø.

Nærværende projekt er et udviklingssamarbejde mellem store aktører i den danske byggeindustri og affaldshåndteringsbranche. Udviklingen af oparbejdningsteknologi og -processer vil foregå hos affaldshåndteringsvirksomhederne Norrecco og Nordic Waste sammen med GTS-instituttet Teknologisk Institut, som også er projektleder for projektet. Genanvendelsesløsninger for oparbejdet mineraluld til fremstilling af nye tegl- og asfaltprodukter vil blive udviklet og demonstreret af hhv. Strøjer Tegl og NCC Industry. Endelig vil glasuldsproducenten Saint-Gobain Denmark A/S, ISOVER vurdere de tekniske muligheder for cirkulær genanvendelse af neddelt mineraluld til fremstilling af ny glasuld og desuden tilføre projektet vigtig viden om mineralulds materialekemi, fremstilling, regulering etc.

2. Klassificering af mineraluld

Genanvendelse af mineraluld i nye produkter forudsætter, at rammebetingelserne for anvendelsen opfyldes. Men hvilken klassificering er gældende, og hvilke betingelser skal være opfyldt, for at mineraluld kan klassificeres som ikke-farligt affald?

2.1 Fakta om mineraluld

Mineraluld består af en undergruppe af menneskeskabte fibre (MMVF – man-made vitreous fibres), som er sammenfiltrede og ikke-kontinuerlige fibre. MMVF er endvidere uorganiske og ikke-krystallinske fibre fremstillet af glas, sten, slagge eller andre forarbejdede materialer. De mest almindelige typer af MMVF er isoleringsuld (glas- og stenuld).

Glas-/stenfibrener mineralske sammensætning opgøres i oxider, idet grundminerallerne dog er bundet direkte sammen i fibermatricen uden oxidernes oxygen. SiO_2 indgår som den største delkomponent af de fleste typer MMVF. Mindre mængder af andre oxider såsom Al_2O_3 , TiO_2 og ZrO_2 bruges som stabilisatorer. Disse oxider øger fibrener kemikalie- og varmebestandighed. 'Modifiers' (eller fluxer) såsom CaO , MgO , BaO , Na_2O , K_2O og Li_2O nedsætter fibrener holdbarhed. I 1990'erne ændredes fiberkompositionerne til mere bioopløselige fibersammensætninger (MST_2013). Dette beskrives nærmere i kapitel 2.7.1.

Typiske værdier for sammensætning og dimensioner af glas- og stenuld produceret før 1997 ses i henholdsvis TABEL 1 og TABEL 2. **Dertil indeholder TABEL 5 i afsnit 2.7.1 eksempler på glasuld og stenuld fremstillet hhv. før og efter 1997.**

TABEL 1. Typisk kemisk sammensætning af mineraluld produceret før 1997 (tallene er angivet i vægtprocent) (Guldberg_2000).

Mineral	Glasuld	Stenuld
SiO_2 (%)	60-70	43-50
Al_2O_3 (%)	3-7	6-15
TiO_2 (%)	<0,1	0,5-3,5
FeO (%)	<0,5	3-8
CaO (%)	5-13	10-25
MgO (%)	0-5	6-16
Na_2O (%)	13-18	1-3,5
K_2O (%)	0-2,5	0,5-2
B_2O_3 (%)	3-7	<1
P_2O_5 (%)	<0,1	<1

TABEL 2. Typiske dimensioner for mineraluld produceret før 1997 (MST_2013).

	Glasuld	Stenuld
Typisk diameter (µm)	3-10	2-6
Længde (µm)	De fleste fibre >3	-
Gennemsnit (LWD)*	0,6-7,7	2,4-5,3
Shots** indhold (w%)	0-5	16-55
Materialdensitet (g/cm ³)	2,4-2,6	2,7-2,9

* LWD: Længdevægtet diameter.

** Shots er afrundede partikler med en diameter på ca. 60 µm, som dannes i produktionsprocessen.

En almindelig anvendt parameter til at skelne mellem stenuld og glasuld er forholdet i vægtprocent mellem alkali-oxider, R₂O (fx Na₂O, K₂O) og jordalkali-oxider, RO (fx CaO, MgO), idet:

R₂O/RO>1: Glasuld

R₂O/RO<1: Stenuld

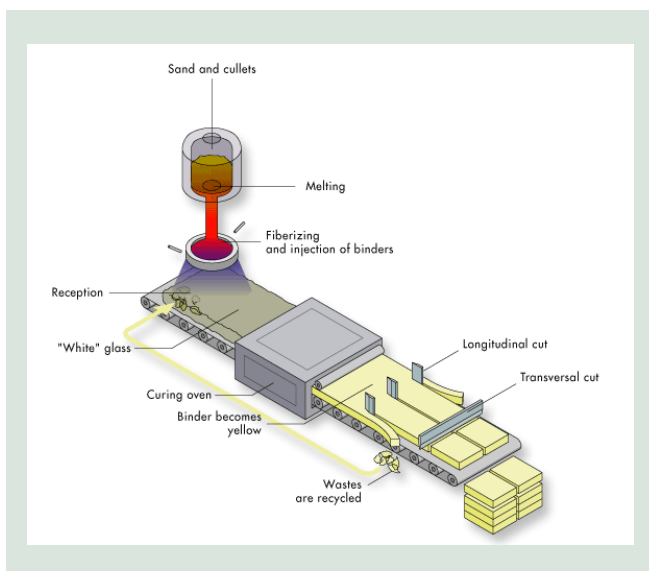
(Guldborg_2000)

2.2 Produktion af mineraluld

Mineraluldsfibre stammer fra to fremstillingsmetoder med tilhørende råvarer: glasuld og stenuld.

Glasuld fremstilles af op til 80 % sekundære råvarer i form af 'genbrugsglas', dvs. indsamlet glasaffald bestående af fx brækageglas fra vinduer og bilruder samt rene returglasfraktioner, fx emballageglas uden keramik, stentøj og porcelæn. Brækageglas udgør de største mængder. Dertil tilføjes primære råvarer (kalk, sand og soda) for regulering af samlet indhold i glasmatricen, så det overholder krav til smelteprocessen og slutproduktets bioopløselighed. Fordelingen mellem sekundære og primære råvarer afhænger af leverancemulighederne, men der indgår typisk omkring 70 % sekundære råvarer i glasuld produceret hos ISOVER.

Temperaturen i smelteovnen, hvor råvarerne smeltes, er 1250 °C. Fremstillingsprocessen er illustreret på FIGUR 1.

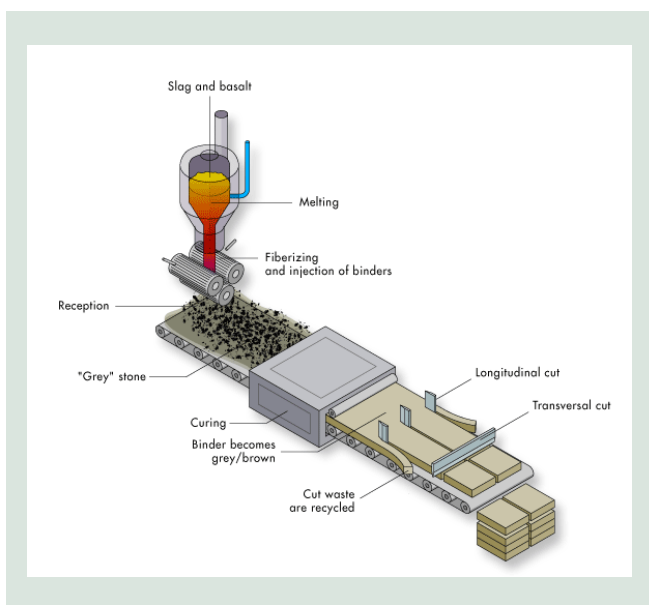


FIGUR 1. Fremstilling af glasuld - Illustration: EU-RIMA.org.

Stenuld fremstilles af primære råvarer såsom sten, bauxit, ler, kalksten og cement og af sekundære råvarer i form af spildprodukter fra øvrige industrier såsom aluminiumssilikat fra jernindustrien, slagger fra stålværker og filterstøv fra cementindustrien. En mindre andel af de sekundære råvarer udgøres af brugt stenuld fra renoverings- og nedrivningsaktiviteter. De sekundære råvarer udgør omkring 25 % af inputmaterialerne, men kan i visse produkter og lande udgøre op til 75 % (RW_2020 s. 20 og 31).

Temperaturen i smelteovnen (kupolovn el. cyklonovn), hvor råvarerne til stenulden smeltes, er 1500-2000 °C.

Fremstillingsprocessen er illustreret på FIGUR 2.



FIGUR 2. Fremstilling af stenuld - Illustration: EU-RIMA.org.

Ved produktion af såvel glasuld som stenuld slynges/blæses den smeltede råvare (melting) ud i tynde tråde/fibre (fiberizing) under påsprøjtning af et bindemiddel. Bindemidlet, der sikrer, at mineraluldsfibre holdes sammen, består oftest af bakelit (phenolresin/harpiks), i de senere år modificeret med organisk stivelse. Forskellige fordelinger af samme grundkomponenter i binderresinen har været anvendt gennem årene. De senere år er også biobaserede bindemidler introduceret i produktionen af glasuld, eksempelvis inert polymer baseret på organisk stivelse. Udover bindemiddel tilsættes mineralisk olie, som anvendes til støvbinding og fugtafvisning. Mængden af bindemiddel udgør omkring 2-8 % af den færdige mineraluld afhængigt af produkttype.

Hærdning (curing) sker ved ca. 200 °C, hvorefter produkter tilskæres og pakkes/palleteres før transport.

2.3 Historisk gennemgang af mineralulds klassificering

I 1997 klassificerede EU mineraluld som kræftfremkaldende (97/69/EC) og indførte samtidig de undtagelsesmuligheder, som i dag fremgår af CLP-forordningens Note Q (CLP_1272/2008). I 2008 overførtes denne klassificering til CLP-forordningen, hvor mineraluld er klassificeret som værende mistænkt for at fremkalde kræft (Carc. 2, H351) med Note Q og Note R som undtagelsesmulighed.

EU-klassificeringen i 1997 var kulminationen på 25 års debat om mineralulds mulige farlighed, som havde sit udspring i de mange påviste kræfttilfælde forårsaget af indånding af asbestfibre (GGM_2016). På baggrund af IP-tests¹ og ud fra et forsigtighedsprincip anbefalede den tyske 'MAK-kommission'² i slutningen af 1970'erne, at fibre fra mineraluld skulle klassificeres som mistænkt for at fremkalde kræft; en anbefaling, der blandt andet blev støttet af de tyske myndigheder. I 1980 vedtog MAK-Kommissionen klassificeringen, og i 1987 gjorde det internationale agentur for kræftforskning (WHO/IARC) det samme. I 1997 overtog EU WHO/IARC's klassificering.

Sideløbende med ovennævnte aktiviteter blev det i samme periode drøftet, hvorvidt mineraluld reelt var kræftfremkaldende. Der blev fx stillet spørgsmålstejn ved IP-testens anvendelighed, da denne form for bughule-injektions-test ikke reflekterer den reelle eksponering, som mennesker udsættes for, når de arbejder med mineraluld. Inhaleringstests udført på forsøgsdyr blev vurderet som mere velegnede, men disse tests var i 1980'erne ikke fuldt udviklede. Det blev også drøftet, hvilken betydning fiberstørrelsen havde i forhold til en potentiel kræftisiko. Mineraluldsfibre er generelt tykkere og længere end asbestfibre. Endvidere knækker de amorfe mineraluldsfibre på tværs, hvorimod krystallinske asbestfibre flækker på langs (WHO/IARC2002 s. 33 & 54). Mineraluldsfibre har oftest en gennemsnitlig diameter på 3-10 µm (WHO/IARC2002 s. 55), hvor asbestfibre ved flækning kan komme helt ned på 0,15-0,25 µm.

Mineraluldsfibre er derfor ikke sammenlignelige med asbestfibre, og de nævnte forskelle blev fundet afgørende for, hvorvidt de fibre, der måtte finde vej til bronkierne og alveolerne, kan opfanges af lungernes naturlige rensefunktion/makrofager.

2.3.1 Lungernes rensefunktion

Lungernes rensefunktion foregår ved tre mekanismer. Dels udsættes/nedbrydes fibrenes overflade ved den pH-værdi på 7,4, der optræder i lungevæske. Dels omsluttet fibrene af immu-

¹ IP tests = intra-peritoneal tests. Foregår ved indsprøjtning i bughulen på forsøgsdyr.

² Tysk komite for fastlæggelse af arbejdsbetingede eksponeringsgrænser.

celler/makrofager og nedbrydes/phagocytiseres med pH-værdi på 4,5 i disse celler. Dels skubber fimrehår i bronkiedelen af lungerne partikler (som fibre og makrofager) op til svælget (kaldes mucociliær elevator), hvilket generelt tager mindre end 24 timer (WHO/IARC2002 s.247).

Makrofagerne er meget elastiske og kan strække sig væsentligt, således at fibre længere end en makrofags normale diameter kan blive opfanget og nedbrudt af denne. Mineraluldsfibre længere end 20 µm vil blive delvist omsluttet af flere makrofager og bliver nedbrudt, hvorved de brækkes ned til kortere fibre, som omsluttet af makrofager og dermed renses ud af lungerne (WHO/IARC2002 s. 244, 248, 256, 257).

Man fandt, at det er afgørende, at fibrene er bioopløselige ved disse pH- og makrofag-påvirkninger (WHO/IARC2002 s. 255). Lange, tynde biopersistente fibre som asbest optages ikke af lungernes rensfunktion, men indlejres mellem fimrehår og celler i bronkierne og bevæger sig med tiden ud til lungehinden og kan danne tumorer (WHO/IARC2002, s. 247, 255, 257, 270).

2.3.2 Udvikling af bioopløselige fibre

Påvisningen af vigtigheden af bioopløselighed førte naturligt til udvikling af endnu mere bioopløselige/mindre biopersistente fibertyper i 1990'erne – også selvom mange studier påviste bioopløselighed for mineraluldsfibre i standardbygningisulering fremstillet før 1997 (WHO/IARC2002 s. 257, 260ff). Det er disse nye fibertyper, der bliver benævnt ny mineraluld produceret efter 1997, og som beviseligt overholder CLP-forordningens Note Q.

En central ændring er, at indholdet af alkalioxid og borat er blevet øget i glasuld, og jordalkalioxider er i stenuld blevet erstattet med aluminiumoxid (WHO/IARC2002). Der er samtidig blevet udviklet testprocedurer til at bestemme fibres bioopløselighed i dyreforsøg (in-vivo) ved inhalation eller ved intratracheal instillation. I begge tests bestemmer man fibrenes halveringstid. Det er disse tests, der anvendes, hvis man ønsker at benytte sig af de to første betingelser i CLP-forordningens Note Q. Der pågår stadig en diskussion om, hvilken af fiberlængdetestene der er relevant for de to første betingelser i Note Q. I EU anvender man en grænse på 20 µm, hvorimod man i Tyskland/RAL tager udgangspunkt i en 'WHO-fiber'³ på 5 µm. I praksis vil påvist bioopløselighed gælde begge fiberlængder.

I 2002 udkom et nyt stort studie udført af WHO/IARC, hvor det på basis af en gennemgang og evaluering af en lang række studier, konkluderedes, at isoleringsmateriale som glasuld og stenuld ikke bør betragtes som kræftfremkaldende (WHO/IARC2002). Kun de mest biopersistente materialer såsom ildfaste keramiske fibre anvendt til industrielle formål skal fortsat klassificeres som muligt kræftfremkaldende. Dette medførte, at WHO/IARC ændrede klassificeringen for mineraluld, som stenuld og glasuld, fra: gruppe 2B 'The agent (mixture) is possibly carcinogenic to humans' til: gruppe 3 'The agent (mixture or exposure circumstances) is not classifiable as its carcinogenicity to humans'. Gruppe 3 tildeles, når en grundig undersøgelse ikke har påvist øget kræftisiko.

Tilsvarende har den danske Miljøstyrelse i samarbejde med DTU i 2010-2013 evalueret mineralulds sundhedsmæssige risici og på den baggrund givet forslag til sundhedsbaserede kvalitetskriterier for en virksomheds bidrag til omgivende luft (MST_2013). Konklusionerne er sammenfattet i et datablad for mineraluld.(MST_2010)

Rapporten medførte en nedklassificering af mineraluldsfibre i B-værdivejledningen fra hovedgruppe 1 til hovedgruppe 2, eftersom glasuld/stenuld relativt hurtigt renses ud af lungerne, som følge af opløsning og ved, at fibrene brækker på tværs og som konsekvens må antages at have relativt lav biopersistens (MST_2013 s. 75). Som grundlag er også miljømæssige for-

³ En WHO-fiber opfylder følgende: fiberen er længere end 5 µm, diameteren mindre end 3 µm og længde-til-diameter-radio er større end 3:1.

hold vurderet: 'Mineraluldsfibre kan fjernes fra luften ved nedbrydning af fibre til mindre fragmenter, hvorved fiberkarakteren ødelægges, ved solubilisering, og ved sedimentering fra luften.' 'Disse fibre nedbrydes og solubiliseres lettere end mange andre fibertyper, har lavere grad af biopersistens og dermed udskilles hurtigere.' (MST_2010)

Hovedgruppe 1 - omfatter kemiske stoffer, om hvilke det vides, at de er særligt farlige for sundheden (kræftfremkaldende, mutagene eller reproduktionstoksiske (CMR-stoffer), eller sensibiliserende ved indånding), eller som er særligt skadelige for miljøet.

Hovedgruppe 2 - omfatter alle andre stoffer. Og altså herefter også mineraluld.

(MST_2016)

Der er – så vidt vides – ikke udført en tilsvarende vurdering af affald.

EU har ikke foretaget en tilsvarende revurdering af mineralulds farlighed, formentligt fordi den gamle mineraluld ikke længere fremstilles og sælges på det indre marked og dermed ligger udenfor CLP-forordningens anvendelsesområde. Det betyder, at klassificeringen i EU derfor fortsat er 'mistænkt for at fremkalde kræft', medmindre Note Q er opfyldt, hvilket er tilfældet for mineraluld produceret efter 1997. Mineraluld produceret før 1997 klassificeres til gengæld automatisk som farligt affald i henhold til reglerne for klassificering af farligt affald, som i 2015 blev tilpasset CLP. Det er forfatternes opfattelse, at denne klassificering sker uden at inddrage WHO/IARC's konklusion fra 2002 i den administrative beslutning, om end man kunne argumentere for, at man burde lægge WHO/IARC's konklusioner til grund for klassificeringen, idet WHO/IARC må betragtes som højeste myndighed indenfor viden om kræft.

2.4 Klassificering af mineraluld

I EU – og dermed også i Danmark – klassificeres mineraluld (både som produkt og som affald) med udgangspunkt i CLP-forordningens regler (CLP_1272/2008). Følgende definition anvendes for mineraluld i CLP-forordningens Bilag VI:

"Mineraluld, undtagen sådanne nævnt andetsteds i dette bilag; [Syntetiske glasagtige (silikat) fibre uden bestemt orientering og med et indhold af alkaliske oxider og alkaliske jordarters oxider ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO}$) på over 18 vægtprocent]."

Mineraluld klassificeres Carc. 2, H351, 'Mistænkt for at fremkalde kræft', medmindre Note Q eller Note R i CLP-forordningen er opfyldt.

Note Q

Klassificeringen som kræftfremkaldende kan udelades for stoffer, som opfylder en af følgende betingelser:

- *en kortvarig biopersistensprøve ved inhalation har vist, at fibre, der er længere end 20 μm , har en vægtet halveringstid på mindre end 10 dage*
- *en kortvarig biopersistensprøve ved intratrakeal instillation har vist, at fibre, der er længere end 20 μm , har en vægtet halveringstid på mindre end 40 dage*
- *en hensigtsmæssig intra-peritoneal prøve ikke har vist kræftfremkaldende virkning, eller*
- *en relevant langvarig inhalationsprøve ikke har vist relevante sygdomsfremkaldende virkninger eller neoplastiske forandringer.*

Note R

Fibre med en længdevægtet geometrisk middeldiameter minus to geometriske standardafvigelser på over 6 μm skal ikke nødvendigvis klassificeres som kræftfremkaldende.*

* Da forberedelse af en fiberprøve for måling ved mikroskopi typisk indebærer, at fibre brækkes i kortere stykker, opgøres total længde af fibre i de givne diameterintervaller. Gennemsnitlig diameter fundet herved kaldes længdevægtet (eller akkumuleret længde) middeldiameter (WHO/IARC2002 s. 56).

Det vurderes, at Note R umiddelbart ikke kan opfyldes for mineraluld, da den længdevægtede diameter er 0,6-7,7 µm for glasuld produceret før 1997 og 2,4-5,3 µm for stenuld produceret før 1997, jf. TABEL 2.

2.4.1 Klassificering af mineraluld som produkt

Mineraluld produceret efter 1997 er i EU fritaget for kræftklassifikation, idet mineralulden er produceret af bioopløselige fibre, og dermed opfylder betingelserne i CLP-forordningens Note Q (registreret med EC No. 926-099-9 under REACH_1907/2006).

For at dokumentere at betingelserne i CLP-forordningens Note Q er opfyldt, tester mineraluldsproducenterne en gang ugentligt deres produkter. Hertil benyttes European Certification Board for mineral wool products' (EUCEB's) kriterier for elementsammensætning. EUCEB er et frivilligt non-profit mærkningsinitiativ fra mineraluldsindustrien. Certificeringsordningen er rettet mod en ensartet produktion af mineraluldsfibre, hvor en såkaldt referencefiber godkendes som bioopløselig, jf. Note Q i CLP-forordningen, på baggrund af in-vivo bioopløselighedstest og analyse af elementsammensætning. Certifikatholderen demonstrerer herefter regelmæssigt overensstemmelse med referencefibren ved analyse og evaluering af elementsammensætning.

Der findes i Europa omkring 50 forskellige fibersammensætninger, som er blevet testet for kemisk sammensætning og biopersistens, og som er fritaget for kræftklassifikation. Disse ca. 50 forskellige fibersammensætninger er omfattet af EUCEB-kontrolordningen.

EUCEB har tilknyttet en uafhængig certificeringsmyndighed, BCCA⁴, som garanterer, at produkterne er fremstillet af fibre, som er i overensstemmelse med Note Q i CLP-forordningen.

Producenter af mineraluld skal i henhold til EUCEB samt BCCA's retningslinjer:

- sikre, at en af BCCA godkendt uafhængig tredje part udtager prøver til analyse på laboratorier godkendt af EUCEB og BCCA to gange årligt og hermed dokumenterer, at fibrene overholder kriterier beskrevet i Note Q i CLP-forordningen
- sikre, at hver produktionslinje to gange om året auditeres og kontrolleres af en uafhængig tredje part, som er godkendt af EUCEB og BCCA
- fremvise dokumenteret ugentlig egenkontrol på alle produktionslinjer til uafhængig tredje part og til BCCA.

Produkter, som overholder EUCEB-certificering, er mærket med EUCEB-logo på emballagen (FIGUR 3).



FIGUR 3. EUCEB-logo.

I TABEL 3 opsummeres, hvordan mineraluld klassificeres som produkt i EU afhængigt af produktionstidspunktet.

⁴ Belgian Construction Certification Association (BCCA) er certificerende organ for EUCEB

TABEL 3. Klassificering af mineraluld som produkt i EU.

Produktionstidspunkt	Klassificering af mineraluld som produkt
Før 1997	Carc. 2, H351, 'Mistænkt for at fremkalde kræft'
Efter 1997	Ingen klassificering (skal dog kunne dokumentere overholdelse af Note Q)

2.4.2 Klassificering af mineraluld som affald

I Danmark klassificeres mineraluld produceret før 1997 som farligt affald, når det bliver til affald (MST_2014). Her benyttes EAK-koden 17 06 03 - *Andet isolationsmateriale bestående af eller indeholdende farlige stoffer*.

Mineraluld produceret efter 1997 klassificeres som ikke-farligt affald, såfremt fremstillingstidspunktet efter 1997 kan dokumenteres. EAK-koden er 17 06 04 - *Isolationsmateriale, bortset fra affald henhørende under 17 06 01 og 17 06 03*.

En blanding af mineraluld produceret før og efter 1997 klassificeres som farligt affald. I TABEL 4 opsummeres, hvordan mineraluld klassificeres som affald i Danmark.

TABEL 4. Nuværende klassificering af mineraluld som affald i Danmark (MST_2014).

Produktionstids-punkt	Benævnelse	Klassificering af mineraluld som affald	EAK-kode
Før 1997	Gammel mineraluld	Farligt affald	17 06 03
Efter 1997 (dokumenteret)	Ny mineraluld	Ikke-farligt affald	17 06 04

2.5 Håndtering af mineraluld som affald

Mineraluld produceret før 1997 og blandinger af mineraluld produceret før og efter 1997 klassificeres som farligt affald og skal derfor håndteres som farligt affald.

Miljøstyrelsen skrev i 2014 i et brev til landets kommuner (MST_2014):

Stenuld skal i videst muligt omfang genanvendes, medmindre stenulden er kontamineret med farlige stoffer. Dette gælder uanset stenuldens alder.

Det er vigtigt, at stenuld og glasuld ikke sammenblandes, da det forringer mulighederne for genanvendelse af stenulden.

Pligten til at udsortere stenuld fra bygge- og anlægsaffald følger af § 63, stk. 2, nr. 7 i Affaldsbekendtgørelsen (BEK_2512).

Miljøstyrelsen skrev endvidere i brevet til kommunerne:

Stenuld, der ikke kan genanvendes, skal anvises til deponering i overensstemmelse med deponeringsbekendtgørelsens regler (BEK_1253). Uanset om stenuld er klassificeret som farligt eller ikke-farligt affald, kan det deponeres på enheder for mineralsk affald, under forudsætning af, at affaldet lever op til kravene for modtagelse af affaldet i deponeringsanlæggets miljøgodkendelse.

Potentialet for at genanvende glasuld har hidtil været betragtet som begrænset, og derfor indeholder den gældende version af affaldsbekendtgørelsen ikke krav om udsortering af glasuld fra bygge- og anlægsaffald [BEK_2512]. Der eksisterer i dag kun begrænsede muligheder for genanvendelse af blandet mineraluld i nye produkter.

I en rapport fra Rambøll (Rambøll_2020) fremgår det, at Rockwool i 2019 modtog 8.600 tons stenuld (rent afskær, indsamlet fra byggepladser og fra genbrugsstationer) til genanvendelse, og Leca modtog ca. 4.000 tons blandet mineraluld til genanvendelse. Både Rockwool og Leca har godkendelse til modtagelse af mineraluld som farligt affald.

Ud over klassificeringen af mineraluldsaffald som farligt affald ligger en af de helt store udfordringer i indsamlings- og håndteringsleddet, i forhold til genanvendelse, i at holde mineralulden dels tilstrækkelig ren, dels adskilt i stenuld og glasuld, således at modtagernes kvalitetskrav kan overholdes.

2.6 Hvilken betydning har det, at mineraluld produceret før 1997 klassificeres som farligt affald?

Som nævnt skal mineraluld produceret før 1997 og blandinger af mineraluld produceret før og efter 1997 håndteres som farligt affald. Mineraluld produceret efter 1997 bliver dog ofte også klassificeret og håndteret som farligt affald, eftersom det i praksis ikke anses som muligt at se forskel på, om mineralulden er produceret før eller efter 1997.

Farligt affald må ikke blandes med ikke-farligt affald, men da det ikke umiddelbart er muligt at se forskel på mineraluld produceret før og efter 1997, anbefaler Miljøstyrelsen, at mineraluld bliver håndteret samlet, dvs. at man ikke forsøger at adskille eventuelt nyt og gammel mineraluld (MST_2014). Dog understreges det, at det er vigtigt, at stenuld og glasuld ikke sammenblandes, da det forringer mulighederne for genanvendelse af stenulden.

For utrænede aktører er det dog svært at skelne stenuld fra glasuld, og i praksis indsamles stenuld og glasuld oftest i samme container, fx på landets genbrugsstationer.

Klassificeringen som farligt affald har medført en ikke uvæsentlig berøringsangst for at igangsætte yderligere genanvendelsesinitiativer hos markedets aktører. Der er forskellige årsager hertil. En væsentlig årsag er frykten for, at de nye produkter, der bringes på markedet, skal klassificeres som farlige og/eller vil indeholde farlige stoffer, som kan blive spredt i miljøet, når det nye produkt engang i fremtiden bliver til affald. En anden væsentlig årsag er usikkerheden forbundet med den fremtidige håndtering af produkter, der i dag kan genanvendes, når de bliver til affald. Det ønskes ikke, at genanvendelsesmulighederne ødelægges ved, at der tilføres fibre, der potentielt kan være farlige, eller at der vedtages nye regler, som kan være en hindring for genanvendelsen. For nogle virksomheder kan det være en barriere, at virksomheden skal være godkendt til at håndtere farligt affald. Det spiller formentligt også en rolle, at man som virksomhed ikke ønsker at blive associeret med farligt affald – selvom klassificeringen som farligt affald ikke er ensbetydende med, at mineraluld ikke kan eller må genanvendes eller nyttiggøres. Desuden kan klassificeringen af den gamle mineraluld 'smitte af' på den nye, så også mineraluld produceret efter 1997 betragtes som farligt affald, eksempelvis hvis emballage eller anden datering ikke følger affaldet. Og endelig kan indsamlere m.fl. være nervøse for at håndtere mineraluldsaffald grundet dets klassificering.

2.7 Relevante tests og analyser

I dette projekt, hvor også affald af mineraluld produceret før 1997 tænkes indsamlet og genanvendt i nye produkter, kan det være afgørende at kunne omklassificere mineralulden fra at være født som farligt affald til at være ikke-farligt affald. Til det formål er det relevant at belyse, hvilke metoder der blev udviklet og anvendt til at dokumentere mineraluldsfibrener biopersistens eller bioopløselighed.

I 1990'erne gennemførte mineraluldsindustrien et udviklingsarbejde, som havde til formål at udvikle mineraluldsfibre med lavere biopersistens og højere bioopløselighed gennem ændring af mineralsammensætningen i produkterne (den kemiske sammensætning) (se også afsnit 2.3.2).

I den forbindelse blev der også udviklet in-vivo testmetoder til at evaluere fibrenes biopersistens ved korttidsinhalation eller intratracheal instillation til opfyldelse af kravene i CLP-forordningens Note Q. Samtidig pågik der et arbejde med udvikling af in-vitro bioopløselighedstest ved to pH-værdier (pH 7,4 og pH 4,5), som repræsenterer de forskellige miljøer, som fibrene udsættes for i lungerne (Guldborg_2000). Man arbejdede således med tre tilgange til at evaluere fibrenes egenskaber:

- In-vivo korttidsbiopersistentstests (inhalation eller intratracheal instillation) som involverer dyreforsøg
- In-vitro opløselighedstest, som simulerer fibrenes bioopløselighed i lungerne ved pH 7,4 og 4,5
- Fibrenes kemiske sammensætning.

Der findes i litteraturen flere undersøgelser, som har belyst sammenhængen mellem biopersistens, bioopløselighed og fibrenes kemiske sammensætning.

2.7.1 Udvikling af mindre biopersistente mineraluldsfibre

Ved udvikling af en mindre biopersistent (dvs. mere bioopløselig) glasuldsfiber reduceredes indholdet af aluminium i glasuld. Forholdet mellem Al^{3+} og $(Al^{3+}+Si^{4+})$ blev sænket til ca. en tredjedel af værdien for glasuld fra før 1997. Ved in-vivo tests er det eftervist, at fibre med lavt aluminiumindhold og øget borindhold har øget bioopløselighed (Guldborg_2000).

Udviklingen af mindre biopersistente stenuldsfibre gik i to forskellige retninger. Som for glasuld blev indholdet af Al_2O_3 ⁵ sænket til under 3-4 % i den ene type af mere bioopløselige stenuldsfibre. I den anden type af bioopløselige stenuldsfibre blev indholdet af Al_2O_3 hævet til over 17-18 %, og indholdet af SiO_2 ⁶ blev sænket til under 42-43 %. Begge typer af fibre har ved in-vivo studier udvist øget bioopløselighed (Guldborg_2000).

TABEL 5 indeholder eksempler på analyse af den kemiske sammensætning af hhv. glas- og stenuld fra før 1997, efter forbedret bioopløselighed (efter 1997) i de to typer af fibre og det relative forhold mellem de enkelte mineraler fra før og efter 1997. For stenuld vises den type fiber, hvor indholdet af Al_2O_3 er blevet reduceret.

TABEL 5. Eksempler på kemisk sammensætning af glasuld og stenuld produceret henholdsvis før og efter 1997⁴.

	Glasuld			Stenuld		
	Før 1997	Efter 1997 ⁷	Efter/før ⁸	Før 1997	Efter 1997 ⁸	Efter/før ⁸
SiO ₂ (%)	63,8	61,30	0,96	45,9	53,80	1,17
Al ₂ O ₃ (%)	3,4	0,80	0,24	13,8	2,62	0,19
TiO ₂ (%)	<0,1	<0,10	1,00	3	0,10	0,03
FeO (%)	0,2	0,10	0,50	6,3	2,13	0,34
CaO (%)	7,4	7,77	1,05	16,5	26,43	1,60
MgO (%)	3,1	3,23	1,04	9,2	8,00	0,87
Na ₂ O(%)	15,1	16,57	1,10	2,6	2,67	1,03
K ₂ O (%)	1,3	0,43	0,33	1,2	0,33	0,28

⁵ Indholdet af Al^{3+} angives ofte som indholdet af det mest stabile mineraluld Al_2O_3 .

⁶ Indholdet af Si^{4+} angives ofte som indholdet af det mest stabile mineraluld SiO_2 .

⁷ Middelværdi af 3 produkter

⁸ Relativt forhold mellem de enkelte mineraler fra før og efter 1997

	Glasuld			Stenuld		
	Før 1997	Efter 1997 ⁷	Efter/før ⁸	Før 1997	Efter 1997 ⁸	Efter/før ⁸
B ₂ O ₃ (%)	7,1	9,10	1,28		0,00	
P ₂ O ₅ (%)	0	0,73		0,1	2,77	27,67
Al/(Al+Si)	0,06	0,02	0,28	0,25	0,05	0,21
opløst ng/cm ² /h pH=7,4	<100	833,3		<100	566,7	
opløst ng/cm ² /h pH=4,5	<100	n.a.		<100	233,3	
f:Na ₂ O+K ₂ O/MgO+CaO	1,56		Glasuld>1	0,15		Stenuld<1

2.7.2 Anvendelse af tests og analyser til vurdering af mineralulds klassificering

2.7.2.1 Kemisk sammensætning

Som indikator for in-vitro bioopløselighed blev der i Tyskland formuleret et karcinogenitets-indeks (KI) baseret på den kemiske sammensætning af mineraluldsfibre (GGM_2016):

$$KI = Na_2O + K_2O + CaO + MgO + BaO + Ba_2O_3 - 2 \cdot Al_2O_3$$

Et KI-indeks på 40 eller derover blev set som bevis for, at fibre er af høj bioopløselighed og derfor ikke udgør en karcinogenrisiko. Guldborg et al (Guldborg_2000) fremhæver dog, at der for stenuld er eksempler på falsk negative og falsk positive klassificeringer, når klassificering af stenuld ud fra KI står alene. Det betyder, at anvendelse af KI-indekset er vanskelig i forhold til klassificering af mineraluld som farligt eller ikke-farligt affald, idet resultaterne for stenuld vil være upålidelige, jf. (Guldborg_2000), sammenholdt med, at glasuld og stenuld ofte indsamles samlet.

EUCEB's kriterier for dokumentation af, at betingelserne i CLP-forordningens Note Q er opfyldt, tager også udgangspunkt i den kemiske sammensætning af mineraluldsfibre (se afsnit 2.4.1). Kriterierne er anvendelige for en ensartet strøm af mineraluld, og EUCEB har givet godkendelse til omkring 50 forskellige fibersammensætninger i Europa med tilhørende snævre grænser for den kemiske sammensætning. Da mineraluldsaffald oftest indsamles som en samlet strøm, kan man ikke benytte EUCEB's kriterier til at klassificere mineraluldsaffald som farligt eller ikke-farligt, da kriterierne er udarbejdet for specifikke mineraluldsrecepter. Endvidere er recepterne for mineraluld produceret før 1997 forskellige fra mineraluld produceret efter 1997, hvilket er endnu en grund til, at EUCEB's kriterier ikke kan anvendes til klassificering af mineraluld som affald.

2.7.2.2 In-vivo og in-vitro tests

Af Guldborg et al (Guldborg_2000) fremgår det, at bioopløseligheden bestemt ved pH 7,4 (in-vitro) falder med stigende værdi af $Al^{3+}/(Al^{3+}+Si^{4+})$, når forholdet er mindre end 0,07 (svarende til et indhold af aluminiumoxid (Al₂O₃) på mindre end 5 %). Tilsvarende mønster ses for stenuld med lavt indhold af aluminium. For stenuld med et højt indhold af aluminium ses bioopløseligheden (in-vitro) ved pH 4,5 at være højere end ved pH 7,4, hvilket indikerer relevansen af at inddrage de forskellige miljøer, der forekommer i lungerne ved evaluering af fibrenes bioopløselighed.

I flere undersøgelser er sammenhængen mellem resultater af in-vivo bioopløselighed og in-vitro bioopløselighed i syntetiske lungevæsker belyst og sammenfattet for forskellige fibermaterialer af Hesterberg et al. (Hesterberg_2012).

Der er stadig ubesvarede spørgsmål i forhold til sammenhængen mellem in-vitro og in-vivo resultater for bioopløselighed. Men det er muligt, at man med standardiserede metoder for bestemmelse af bioopløseligheden ved neutrale og sure pH-værdier kan opnå pålidelige resultater for fibrenes bioopløselighed. Ved en sammenligning med in-vivo resultater for fibre med en tilsvarende kemisk sammensætning er det muligt, at in-vivo tests kunne undgås.

I forhold til mineraluld (glasuld eller stenuld) indsamlet som affald med ukendt oprindelse vil bestemmelsen af bioopløseligheden ved in-vitro tests ikke alene kunne danne grundlag for omklassificering, idet det vil være vanskeligt at relatere resultaterne til in-vivo forsøg for fibre med en bestemt kemisk sammensætning. In-vivo tests vurderes ikke at være praktisk anvendelige i forhold til klassificering, da de involverer dyreforsøg.

2.8 Konklusion og anbefalinger i forhold til klassificering af mineraluldsaffald

I projektet er afdækket to centrale problemstillinger:

- Kan det lade sig gøre at omklassificere mineraluld produceret før 1997 fra farligt affald til ikke-farligt affald, og hvilke betingelser skal i så fald være opfyldt?
- Kan det lade sig gøre at omklassificere neddelt mineraluld produceret før 1997, og hvilke betingelser skal i så fald være opfyldt?

En forudsætning for at kunne omklassificere mineraluld fra farligt til ikke-farligt affald er, at betingelserne i CLP-forordningens Note Q og R er opfyldt (CLP_1272/2008):

Note Q

Klassificeringen som kræftfremkaldende kan udelades for stoffer, som opfylder en af følgende betingelser:

- *en kortvarig biopersistensprøve ved inhalation har vist, at fibre, der er længere end 20 µm, har en vægtet halveringstid på mindre end 10 dage*
- *en kortvarig biopersistensprøve ved intratracheal instillation har vist, at fibre, der er længere end 20 µm, har en vægtet halveringstid på mindre end 40 dage*
- *en hensigtsmæssig intra-peritoneal prøve ikke har vist kræftfremkaldende virkning, eller*
- *en relevant langvarig inhalationsprøve ikke har vist relevante sygdomsfremkaldende virkninger eller neoplastiske forandringer.*

Note R

Fibre med en længdevægtet geometrisk middeldiameter minus to geometriske standardafvigelser på over 6 µm skal ikke nødvendigvis klassificeres som kræftfremkaldende.

Mineraluld produceret efter 1997 opfylder betingelserne i Note Q pga. ændrede recepter, som sikrer, at mineraluldsfibrene er mere bioopløselige. Mineraluld produceret før 1997 skal derimod opfylde mindst én af betingelserne i Note Q eller opfylde Note R for at kunne klassificeres som ikke-farligt affald.

Der eksisterer to testtilgange til at evaluere, om betingelserne i Note Q er opfyldt:

- In-vivo korttidsbiopersistentest (inhalation eller intratracheal instillation), som involverer dyreforsøg
- In-vitro opløselighedstests, som simulerer fibrenes bioopløselighed ved pH 7,4 og 4,5.

Da in-vivo tests involverer dyreforsøg, vurderes de ikke at være praktisk anvendelige i forhold til klassificering, hverken i nærværende projekt eller generelt.

I forhold til in-vitro tests er der stadig ubesvarede spørgsmål, hvad angår sammenhængen mellem in-vitro og in-vivo resultater for bioopløselighed. I forhold til mineraluld indsamlet som affald med ukendt oprindelse vil bestemmelsen af bioopløseligheden ved in-vitro tests ikke

alene kunne danne grundlag for omklassificering, idet det vil være vanskeligt at relatere resultaterne til in-vivo forsøg for fibre med en bestemt kemisk sammensætning. Det vurderes derfor, at det på nuværende tidspunkt ikke er praktisk muligt at udføre biopersistenstests, der kan anvendes til at omklassificere mineraluldsaffald fra farligt til ikke-farligt affald.

Det er i projektet også undersøgt, om viden om mineralulds kemiske sammensætning kan anvendes til klassificering i lighed med den tilgang, man har til ny mineraluld, hvor mineraluldsproducenterne på ugentlig basis skal dokumentere, at EUCB's kriterier er opfyldt. Det er vurderet ikke at være muligt, da kriterierne kun er anvendelige for en ensartet strøm af mineraluld, og mineraluldsaffald oftest indsamles som en samlet, blandet strøm.

Note R vurderes på baggrund af litteraturdata ikke umiddelbart at kunne opfyldes for mineraluld produceret før 1997. Det er derfor også i projektet undersøgt, om Note R, som er knyttet til fibrenes størrelse, kan opfyldes gennem fysisk påvirkning (neddeling/knusning) for mineraluldsaffald (se afsnit 5.2). Det skal nævnes, at det ikke i projektet har været muligt at finde eksempler på anvendelse af Note R i forbindelse med klassificering.

Det er derfor konkluderet, at det ikke inden for projektets rammer er muligt at omklassificere mineraluldsaffald produceret fra før 1997 fra farligt til ikke-farligt affald.

Ovennævnte konklusion tager afsæt i EU's klassificering af mineraluld fra 1997 som farligt affald ('mistænkt for at fremkalde kræft'). Denne klassificering sker uden at inddrage 2002-konklusionen fra WHO/IARC, hvor agenturet på basis af en gennemgang og evaluering af en lang række studier konkluderede, at isoleringsmateriale som glasuld og stenuld ikke bør betragtes som kræftfremkaldende. Tilsvarende har Miljøstyrelsen i samarbejde med DTU i 2013 evalueret mineralulds sundhedsmæssige risici og på den baggrund givet forslag til sundhedsbaserede kvalitetskriterier for luft. Rapporten medførte en nedklassificering af mineraluldsfibre i B-værdivejledningen fra hovedgruppe 1 til hovedgruppe 2. Der er – så vidt vides – ikke udført en tilsvarende vurdering af affald. Det anbefales på baggrund af denne rapport, at Miljøstyrelsen foretager en sådan vurdering, særligt fordi klassificering af mineraluldsaffald produceret før 1997 som farligt affald er den største barriere for genanvendelse af affaldet.

En anden central anbefaling er at sikre en større grad af sporbarhed og renhed af mineraluldsaffald, da en af de store udfordringer for genanvendelse – ud over klassificeringen af mineraluldsaffald som farligt affald – er knyttet til indsamlings- og håndteringsleddet. Da potentielle genanvendelsesløsninger ofte kræver mineraluld adskilt i enten glasuld eller stenuld, er det vigtigt, at de to strømme ikke sammenblandes.

3. Arbejds miljø

Arbejde med mineraluld stiller krav til håndteringen.

3.1 Mineraluldsbekendtgørelsen

Bekendtgørelse om arbejde med montering og nedrivning af isoleringsmaterialer med indhold af syntetiske mineralfibre fra 1988, BEK nr. 344 af 09/06/1988, blev opdateret til BEK nr. 1399 af 25/06/2021 og erstatter dermed de hidtidige arbejdsmiljøregler fra 1988. De nye regler bringer reglerne for håndtering af mineraluldsisolering op på niveau med reglerne for andre isoleringsmaterialer. I bekendtgørelsen skelnes mellem ny og gammel mineraluld, idet ny mineraluld (fremstillet efter 1997) opfylder Note Q i CLP-forordningen. Bekendtgørelsen beskriver, hvilke regler der gælder for arbejdet med montering og nedrivning af mineraluld, herunder planlægning af arbejdet, arbejdspladsvurdering, forebyggelsesprincipper, tilrettelæggelse af arbejdet, indretning af arbejdsstedet og foranstaltninger med hensyn til rengøring og personlige værnemidler samt oplæring og instruktion. Alt med henblik på at mindske støveksposeringen i forbindelse med arbejdet.

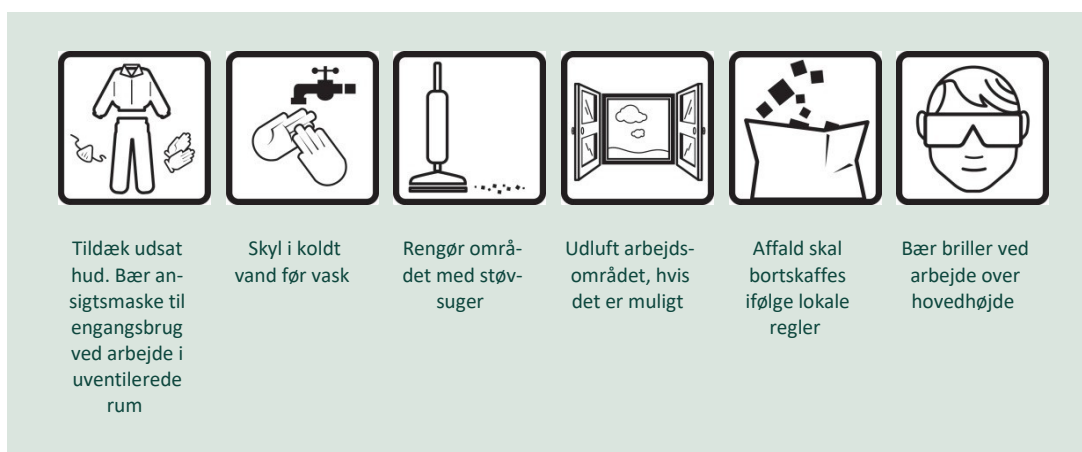
Jf. § 20 stk. 2 i BEK nr. 1399 af 25/06/2021 skal affald, der indeholder gammel mineraluld, samles, opbevares og bortskaffes i egnede lukkede beholdere, eller, hvor dette ikke er praktisk muligt, på anden betryggende måde. Beholdere m.v. skal være mærket som angivet i bilag 3 i bekendtgørelse om foranstaltninger til forebyggelse af kræft risikoen ved arbejde med stoffer og materialer.

3.2 Leverandørbrugsanvisninger

Mineraluldsproducenter i Danmark har udarbejdet leverandørbrugsanvisninger til at vejlede om brugen af ny mineraluld. Her er et uddrag af de vigtigste punkter i relation til dette projekt:

- Grænseværdi for glasuldsfibre og stenuldsfibre, respirable: 1 fiber/cm³
- Grænseværdi for mineralsk støv, inert respirabel: 5 mg/m³
- Tildæk udsat hud. Bær ansigtsmaske til engangsbrug ved arbejde i uventilerede rum
- Rengør området med støvsuger
- Udluft arbejdsområdet, hvis det er muligt
- Affald skal bortskaffes ifølge lokale regler
- Bindemidlet dekomponerer i temperaturområdet fra ca. 150-250 °C. Ved førstegangsopvarmning over 150 °C kan bindemidlet udvikle irriterende gasser. Varigheden og mængden af afgasningen afhænger af isoleringstykkelsen, bindemiddelindholdet og anvendelsestemperaturen
- Under førstegangsopvarmning kræves god ventilation eller egnet personligt beskyttelsesudstyr, som fx friskluftmaske
- Beskyttelse af hænder: Brug egnede arbejdshandsker i overensstemmelse med EN 388
- Beskyttelse af øjne: Anvend beskyttelsesbriller ved arbejde over hovedhøjde, Type EN 166 anbefales
- Beskyttelse af hud: Anvend støvafvisende arbejdstøj ved særligt støvende arbejde
- Personlig hygiejne: Skyl med koldt vand før vask
- Kontakt med huden kan forårsage kortvarig kløe.

FIGUR 4 angiver de piktogrammer som forefindes på de fleste mineraluldsemballager og leverandørbrugsanvisninger.



FIGUR 4. Anvendte piktogrammer på leverandørbrugsanvisninger og mineraluldsemballage.

3.3 Konkrete anvisninger for projektet

Til det konkrete arbejde omkring modtagelse og bearbejdning af mineraluld er der udarbejdet et notat – se Bilag 1: Modtagelse og oparbejdning af mineraluld hos Norrecco og Nordic Waste.

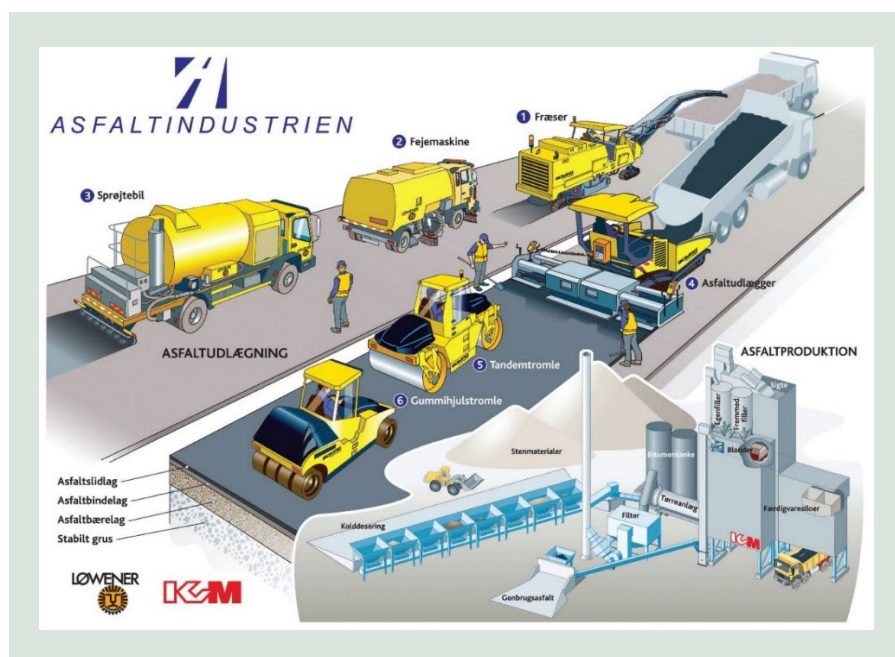
4. Materialekrav for genanvendt mineraluld i asfalt, tegl og glasuld

Anvendelse af mineraluld som et råvarealternativ i produktionen af tegl, asfalt og ny glasuld skal kunne imødekomme produktspecifikke krav. Her undersøges, hvilke materialekrav som mineraluld skal overholde for at kunne genanvendes i nye produkter.

I projektet indgår de tre virksomheder NCC, Strøjer Tegl og ISOVER som mulige aftagere af oparbejdet mineraluld. Der er i projektet opstillet materialekrav til tilførte mineraluldsprodukter for de tre virksomheder.

4.1 NCC

NCC producerer asfalt, som anvendes til etablering af veje, stier m.m. Processen for fremstilling og udlægning af asfalt er skitseret på FIGUR 5.



FIGUR 5. Fremstilling og udlægning af asfalt hos NCC.

NCC benytter såvel stenmaterialer (sand) som filler i fremstillingen af asfalt. Filleren består typisk af kalksten. For begge typer materialer er der opstillet kravspecifikationer, som skal overholdes, såfremt nuværende materiale skal substitueres med oparbejdet mineraluld.

Kravene omfatter begrænsninger ift.:

- partikelstørrelser og fordeling
- indhold af organisk forurening såsom træ og plast, som ikke er smelteplast
- tungmetaller

- fugtoptag, idet en for høj grad af vandsugning vil kunne ødelægge egenskaberne af asfalt
- tilført råvare må ikke være klassificeret som farligt materiale af hensyn til godkendelser af håndtering på fabrik og efterfølgende produkt.

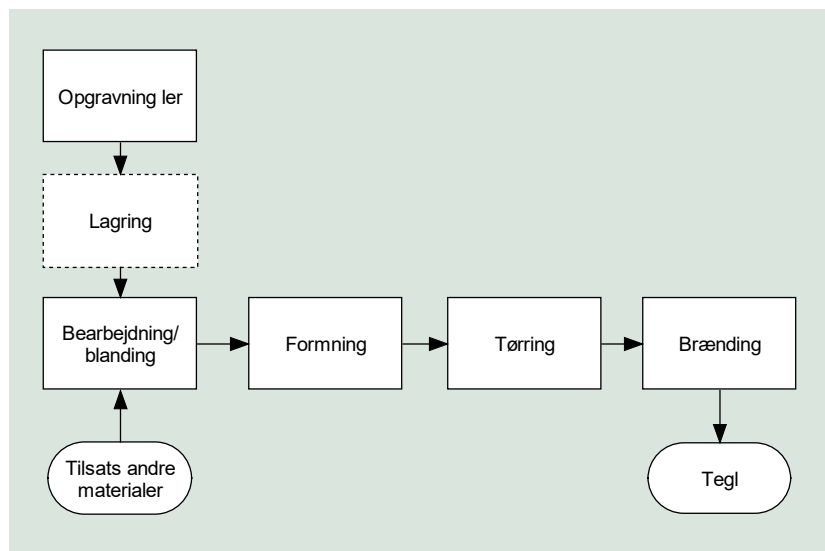
Krav for de to typer materialeapplikationer (sand (stenmateriale) og filler) er summeret nedenfor i TABEL 6.

TABEL 6. Kravspecifikationer for materialer til NCC ved produktion af asfalt.

Krav	Sand	Filler
Partikelstørrelse	2-4 mm	>70 % skal være <63 µm >85 % skal være <125 µm >100 % skal være <2 mm
Grundstofs sammensætning	Ingen særlige krav – se dog urenheder og organisk forurening	Ingen særlige krav – se dog urenheder og organisk forurening
Homogenitet	Skal være homogent	Skal være homogent
Organiske materialer/forurening	Mindre indhold acceptabelt	Mindre indhold acceptabelt (glødetab 5 % er specificeret)
Andre urenheder	Ingen tungmetaller	Ingen tungmetaller
Fugtoptag/vandindhold	Ikke ønsket	Ikke ønsket, vandindhold <1 %
Klassifikation	Må ikke være farligt affald	Må ikke være farligt affald

4.2 Strøjer Tegl

Strøjer Tegl fremstiller tegl på et moderne højteknologisk teglværk. Den basale fremstilling af tegl består af blanding, formning, tørring og brænding. Råmaterialerne kan være rødler eller blåler. Blåler har et højt indhold af calcium i forhold til jern og giver gule sten i brændingen, mens rødler har lavt calciumindhold og giver røde sten. Der kan tilsættes diverse additiver til at justere stenens egenskaber og æstetiske udtryk. Brændingen sker ved ca. 1050 °C. Procestrinene for fremstilling af tegl hos Strøjer Tegl er skitseret på FIGUR 6.



FIGUR 6. Teglproduktion hos Strøjer Tegl.

Strøjer Tegl tilsætter op til 30 % sand til produktion af røde sten og har 12 års erfaring med substitution af sand via tilsætning af stenuld i form af produktionsspild i doserede blandinger.

Strøjer Tegl har mulighed for at anvende blandinger indeholdende op til 15 % glasuld og resten stenuld.

Kravene, som kan ses for røde sten i TABEL 7, omfatter begrænsninger ift.:

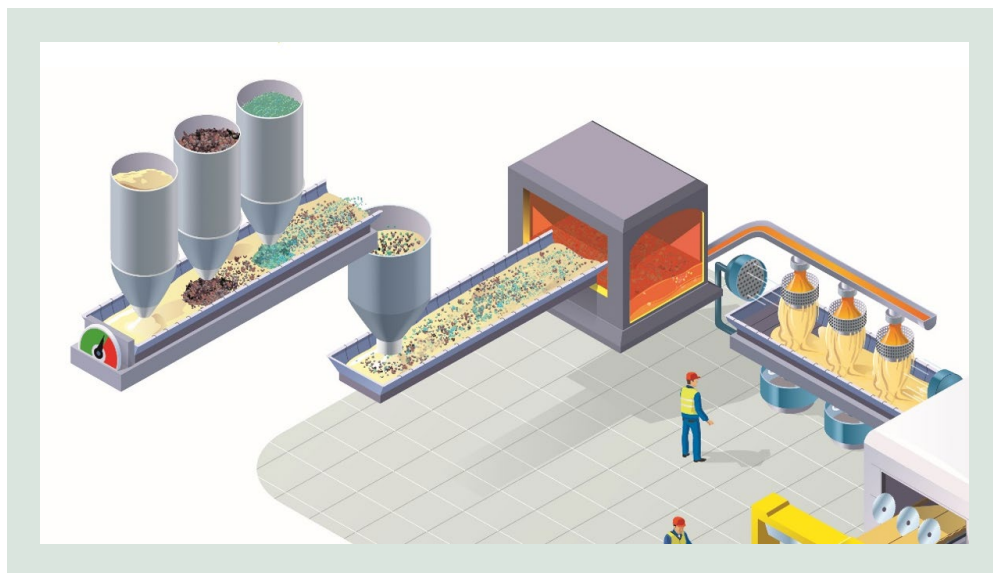
- partikelstørrelser
- maksimal tilsats af glasuld
- lavt indhold af organisk forurening
- tungmetaller
- kalk
- at tilført råvare ikke er klassificeret som farligt af hensyn til godkendelser af håndtering på fabrik og efterfølgende produkt.

TABEL 7. Kravspecifikationer for materialer til fremstilling af røde sten hos Strøjer Tegl.

Krav	Fremstilling af røde sten (fra rødler)
Partikelstørrelse	<3 mm
Grundstofsammensætning	Kan acceptere tilsats af mineraluldsblandinger med maks. 15 % glasuld og resten stenuld
Homogenitet	Skal være homogent
Organiske materialer/forurening	Mindre indhold acceptabelt
Andre urenheder	Ingen tungmetaller, metaller eller kalk
Fugtoptag/vandindhold	Fugtoptag af mineraluld kan accepteres
Klassifikation	Må ikke være farligt affald

4.3 ISOVER

ISOVER's proces til fremstilling af glasuld er beskrevet i afsnit 2.2.



FIGUR 7. Proces ved glasuld fremstilling hos ISOVER.

Da processen er baseret på smeltning af glas ved ca. 1250 °C, kan der ikke accepteres urenheder af stenuld, sten og keramik, jern m.m., som smelter ved en højere temperatur (typisk >1500 °C). Organisk materiale kan kun accepteres i meget begrænset mængde, da det organiske materiale afgiver gasser, som medfører skumdannelse i processen. Kravspecifikationer for materialer er summeret i TABEL 8.

TABEL 8. Kravspecifikationer for materialer til genanvendelse af glasuld hos ISOVER med eksisterende teknologi (2022).

Krav	ISOVER
Partikelstørrelse	Skal kunne håndteres i silo- og rørsystem
Grundstofsammensætning	Rent glasuld
Homogenitet	Skal kunne håndteres i silo- og rørsystem uden afblanding og brodannelse
Organiske materialer/forurening	COD-værdi med ØTG: 600 ppm
Andre urenheder	Ingen metal, sten, keramik og porcelæn
Fugtoptag/vandindhold	Skal kunne håndteres i silo- og rørsystem uden afblanding og brodannelse
Klassifikation	Ingen krav – fibre håndteres i lukket system

4.4 Oversigt over materialekrav for produktspecifik genanvendelse

De individuelle produktspecifikke materialekrav for asfalt, tegl og glasuld er samlet i TABEL 9.

TABEL 9. Sammenligning af kravspecifikationer for asfalt hos NCC, tegl hos Strøjer Tegl og glasuld hos ISOVER.

Krav	NCC	Strøjer Tegl	ISOVER (nuværende, 2022)
Partikelstørrelse	Sand 2-4 mm Filler 70 % <63 µm	<3 mm	Ingen særlige andet end grovneddeling, da glas-skår p.t. processeres
Grundstofsammensætning Særlige krav	Nej	Maks. 15 % glasuld	Rent glasuld
Homogenitet	Ja	Ja	Egnet til silo- og rørsystem
Organiske materialer/forurening	Mindre indhold acceptabelt	Mindre indhold acceptabelt	Uønsket
Andre urenheder	Ingen tungmetaller	Ingen tungmetaller, metal eller kalk	Ingen metal, sten, keramik
Fugtoptag/vandindhold	Ikke ønsket	Acceptabelt	Egnet til silo- og rørsystem
Klassifikation Accept af farligt affald	Nej	Nej	Ja

Det ses, at den første væsentlig forudsætning for at kunne håndtere større mængder mineraluld er, at mineralulden kan klassificeres som ikke-farligt affald. Dette er en forudsætning for, at NCC og Strøjer Tegl kan håndtere materialerne i deres produktionsapparat.

Hernæst er der ved Strøjer Tegl og ISOVER krav om sammensætning af mineralulden, hvilket kræver en forsortering af tilførte materialer.

Herudover skal mineralulden overholde en række produktspecifikationer, som skal opnås ved brug af den benyttede oparbejdningsteknologi. Genanvendelsesgraden vil dog i alle tilfælde – både for stenuld og glasuld – afhænge af renheden, hvorfor der fortsat bør arbejdes med kil-desorteringsløsninger.

4.5 Produktspecifik oparbejdning af mineraluld

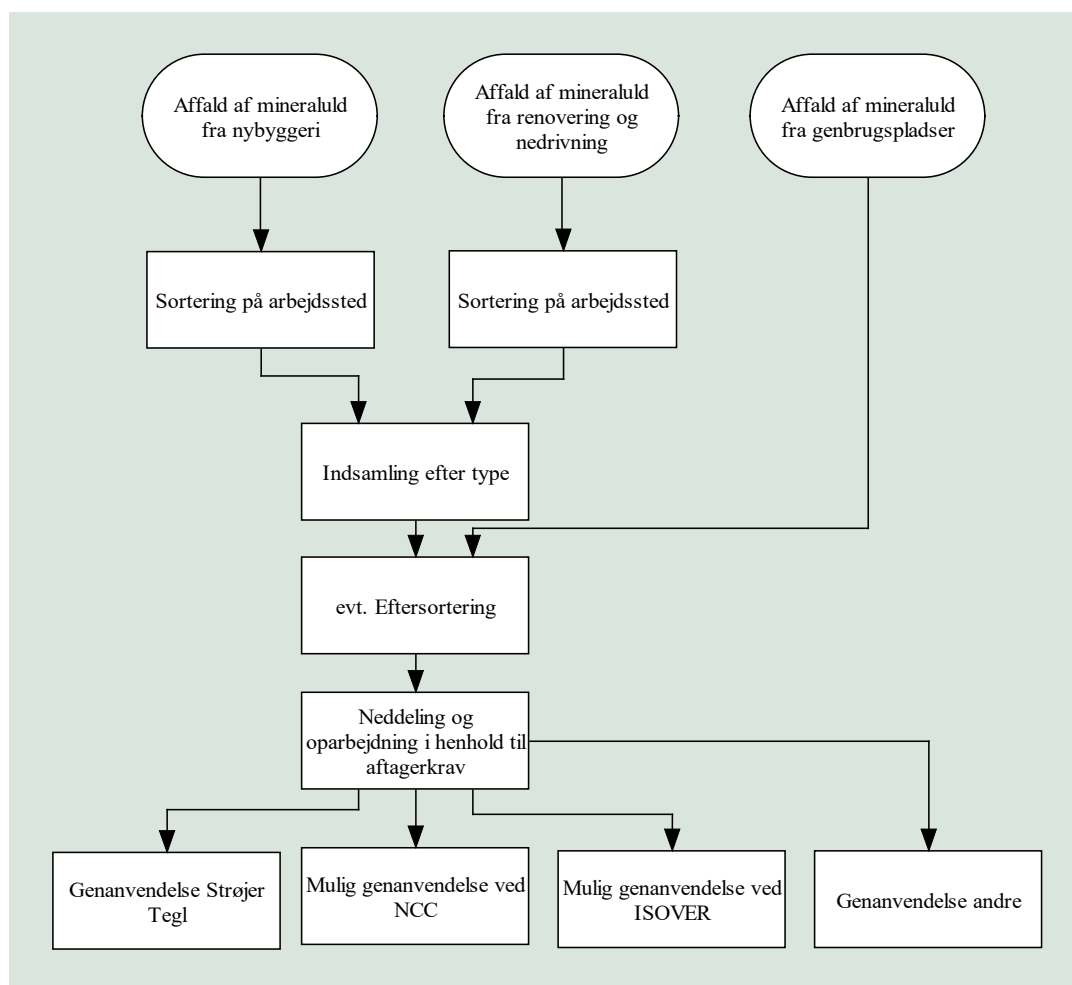
De største barrierer for en bredere udbredelse af genanvendelse af mineraluld er, at gammel mineraluld er klassificeret som farligt, og at der ikke er en simpel løsning for adskillelse af hhv. glas- og stenuld i blandede mineraluldsfraktioner.

Det blev efterfølgende i projektet valgt at arbejde videre med, om der kunne opnås materialer, der kan overholde modtagekrav til de tre mulige aftagere, herunder forsøg med:

- Om binder og andet organisk materiale kan fjernes fra glasuld ved særlig behandling i hammermølle til brug for efterfølgende genanvendelse ved ISOVER
- Fremstilling af filler (finpartikulært mineralsk materiale) egnet til brug ved NCC
- Fremstilling af kvaliteter egnet til brug ved Strøjer Tegl.

5. Oparbejdning og karakterisering af neddelt mineraluld

Hvis de forskellige materialekrav til genanvendte materialer angivet i kapitel 4 skal imødekommes, kræver det udvikling af metoder, procedurer og teknologi til indsamling, sortering og oparbejdning af mineraluld. På FIGUR 8 er vist en række trin i håndtering og behandling af mineralulden fra forskellige kilder.



FIGUR 8. Trin i håndtering og behandling af indsamlet mineraluld.

Som eksempel på kilder til indsamling af mineraluld er vist rester fra nybyggeri, hvor mineralulden er ny og dermed ikke klassificeret som farlig, renovering og nedrivning samt fra genbrugspladser. Ved indsamling fra de sidstnævnte to kilder skal der tages stilling til, om mineralulden kan være klassificeret som farlig, hvis dette er et krav for modtagelse ved aftagerne.

I dette kapitel fokuseres på:

1. Om forskellige typer af neddelt mineraluld kan omklassificeres i forhold til CLP-forordningens Note R til ikke-farlige
2. Om de specificerede materialekrav til genanvendelse i glasuld, tegl og asfalt kan opnås.

Indledningsvist er der blevet gennemført en basiskarakterisering af neddelt mineraluld for opnå en forståelse af materialeegenskaberne med hidtil anvendte teknologier til neddeling (afsnit 5.1). Gennem basiskarakteriseringen identificeres det, hvilke karakteristika som skal tilpasses for at imødekomme producentkravene. Hermed dannes der grundlag for vurdering af punkt 1 og 2 og for den efterfølgende teknologiudvikling.

Efterfølgende er udført yderligere oparbejdningsforsøg for at påvise, om de opstillede kravspecifikationer kan opnås (afsnit 5.4-5.5).

Nærværende projekt har ikke fokus på sorteringen ved kilden fra byggeri og nedrivning. Dog er der opnået erfaringer med kvalitet af indsamlede materialer fra nybyggeri til brug for forsøg, hvilket gennemgås i afsnit 5.3.

5.1 Forsøg med basiskarakterisering

Der blev gennemført en række neddelingsforsøg på forskellige typer mineraluld for at sikre datagrundlaget til at afgøre, om forskellige mineraluldstyper og behandlinger af disse kan overholde kravspecifikationerne, og hvilke egenskaber af den neddelte mineraluld, som skal tilpasses producentkravene gennem teknologiudviklingen.

5.1.1 Indledende forsøg med neddeling af mineraluld hos Norrecco

Til brug for en basiskarakterisering af mineraluld blev der indsamlet tilstrækkelige mængder til at kunne udføre neddelingsforsøg af følgende fraktioner:

- Brugt stenuld
- Ny stenuld
- Brugt glasuld
- Ny glasuld
- Blandet stenuld og glasuld (brugt).

Prøverne blev neddelt med en hurtiggående affaldsneddeler (AK 560) og derefter sorteret på en rundsorterer for at fjerne plastik og andre urenheder fra den neddelte mineraluld. Der blev udtaget repræsentative prøver af de forskellige typer af mineraluld, som blev sendt til en basiskarakterisering hos Teknologisk Institut (se afsnit 5.2). Resultaterne af basiskarakteriseringen skal danne grundlag for udvikling/tilpasning af teknologi til neddeling af mineraluld, som vil kunne frembringe et produkt, der kan leve op til modtagekravene hos Strøjer Tegl og NCC, og på sigt også hos ISOVER, når de er klar til at modtage glasuld til genanvendelse i ny glasuld.

Oversigt over neddelte mineraluldsfraktioner til basiskarakteriseringen ses i TABEL 10.

TABEL 10. Neddelte mineraluldsfraktioner og neddelingsmetode hos Norrecco til basiskarakterisering.

Forsøg	Materiale/fraktion	Metode
1	Stenuld brugt	Doppstadt AK 560 EcoPower, Norrecco
2	Stenuld ny	Doppstadt AK 560 EcoPower, Norrecco
3	Glasuld brugt	Doppstadt AK 560 EcoPower, Norrecco
4	Glasuld ny	Doppstadt AK 560 EcoPower, Norrecco
5	Blandet brugt	Doppstadt AK 560 EcoPower, Norrecco
6	Blandet brugt, finfraktion	Runi sneglkomprimator, Norrecco

5.1.2 Indledende forsøg med neddeling af mineraluld ved Nordic Waste

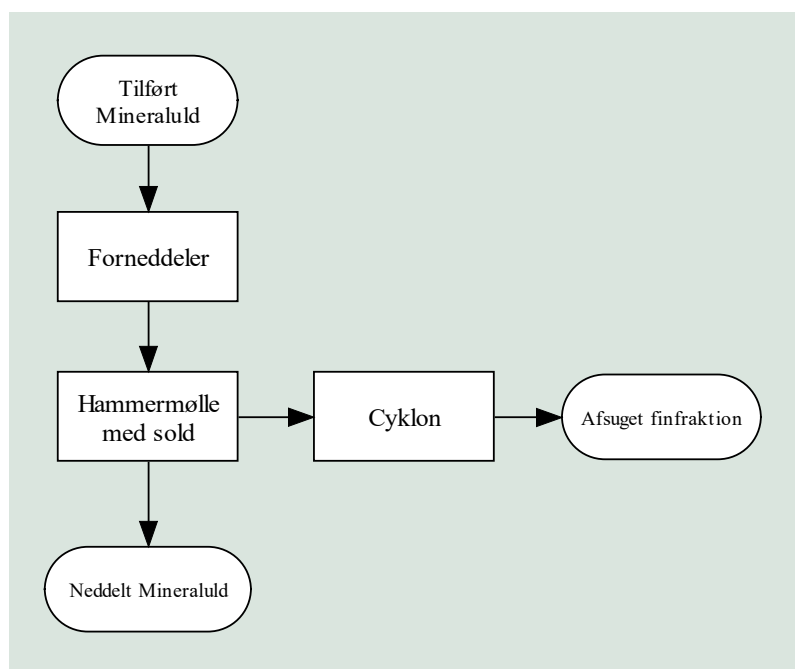
Som reference for mineraluld blev der indsamlet tilstrækkelige mængder til at kunne udføre neddelingsforsøg af følgende fraktioner:

- Stenuld fra Rockwool
- Glasuld fra ISOVER
- Glasuld fra Knauf.

Den benyttede pilotopstilling til gennemførelse af indledende forsøg til basiskarakterisering består af en forneddeler efterfulgt af en hammermølle med mulighed for at indsætte sold i forskellige størrelser (se FIGUR 9). Hammermøllen er forsynet med et justerbart sug, som kan suge fint/partikulært materiale bort til en udskilningscyklon. Fra neddelingsforsøgene hos Nordic Waste af de tre mineraluldsfraktioner opnås der for hver en grov- og en finfraktion. Den resulterende fraktion som opsamlet gennem soldet benævnes som 'grovfraktionen' og den resulterende fraktion opsamlet via det justerbare sug benævnes som 'finfraktionen'.

TABEL 11. Neddelte mineraluldsfraktioner og neddelingsmetode hos Nordic Waste til basiskarakterisering.

Forsøg	Materiale/fraktion	Metode
7	Stenuld, Rockwool, finfraktion	Hammermølle, Nordic Waste
8	Stenuld, Rockwool, grovfraktion	Hammermølle, Nordic Waste
9	Glasuld, ISOVER, finfraktion	Hammermølle, Nordic Waste
10	Glasuld, ISOVER, grovfraktion	Hammermølle, Nordic Waste
11	Glasuld, Knauf, finfraktion	Hammermølle, Nordic Waste
12	Glasuld, Knauf, grovfraktion	Hammermølle, Nordic Waste



FIGUR 9. Oparbejdning af mineraluld ved Nordic Waste.

5.1.3 Resultat af basiskarakterisering

Basiskarakteriseringen gennemførtes på de neddelte mineraluldsfraktioner fra TABEL 10 og TABEL 11. Denne basiskarakterisering omfatter en række parametre som vist i TABEL 12. På udvalgte prøver gennemførtes en udvidet basiskarakterisering.

TABEL 12. Analyser til basiskarakterisering af neddelte mineraluldsfraktioner.

Analyse	Metode	Udførelse
Tørstof	105 °C, 24 h	Alle forsøg
Glødetab	550 °C, 24 h	Alle forsøg
Partikelstørrelsesfordeling	Sigtetårn	Alle forsøg
1D-partikelstørrelsesfordeling	Laserdiffraktion	Alle forsøg
Morfologianalyse, 2D-partikelstørrelsesfordeling	Automatiseret mikroskopi	Alle forsøg
Grundstofsammensætning	Røntgenfluorescens (XRF)	Udvalgte
Vandmætning	Egen metode, se Bilag 2.3	Udvalgte
Indhold af organisk binder	Termogravimetrisk analyse (TGA)	Udvalgte
Evt. farlige stoffer	TBD	Udvalgte

Detaljer vedrørende analyserne er vist i Bilag 2.

De væsentligste resultater og konklusioner for basiskarakteriseringen af mineraluldsfraktionerne er opsummeret nedenfor:

- Fugt- og vandindholdet i mineraluldsaffald er yderst afhængigt af opbevaringen. Indsamling og opbevaring i ikke-lukkede containere (dvs. direkte eksponeret for regn) medfører højt fugt- og vandindhold.
- Glødetabsbestemmelse viser et væsentligt og varierende restindhold af organisk materiale stammende dels fra binderindholdet og dels fra urenheder såsom papir, plast og træ.
- Til bestemmelse af partikelstørrelsesfordeling er de industrielle standarder sigtetårnsanalyse og lysoptisk spredning (Mastersizer) anvendt. Dog viste ingen af disse analysemetoder sig anvendelige med fibre, men giver en indikation af partikelstørrelsesfordelingen. Ved bestemmelse med sigtetårnsanalyse blev det observeret, at store partikler (dvs. lange fibre) filtrer sammen og danner 'hårbolde'. Først når fiberlængden er under 125 µm, ophører fibre med at filtrere sammen. Lysoptisk spredning viste forekomst af fire karakteristiske partikelstørrelser (1-2 µm, 15-20 µm, 90 µm og 400-600 µm), som forventes at repræsentere dels reelle partikelstørrelser og dels flager af knuste fibre, fiberbredden, længden af korte fibre og store fibernetværkspartikler.
- Der er udført analyser af grundstofsammensætning af glasuld før og efter 1997 med XRF ved ISOVER. Resultatet viser et lavere indhold af aluminium i prøver efter 1997 (før 4,8 %, efter 2,9 %), som forventet baseret på oplysningerne i Bilag 2.5.
- Gennem simple vandmætningsforsøg af neddelt mineraluld er det påvist, at groft neddelt mineraluld kan optage over 80 vægtprocent vand. Fin-neddeles mineraluld til under 0,25 mm, kan fugtoptaget reduceres med op til 50%.
- Binderindholdet blev bestemt til mellem 5 % (for stenuld) og 6-7 % (for glasuld). Bestemmelsen med TGA viste yderligere, at den organiske binder først nedbrydes, når mineralulden opvarmes over 120 °C.

En detaljeret præsentation af karakteriseringsmetoder og individuelle analyseresultater er tilgængelig i Bilag 2.

5.2 Undersøgelse: Omklassificering af neddelt mineraluld ift. CLP-forordningens Note R

Som beskrevet i kapitel 2 skal den harmoniserede klassificering som kræftfremkaldende materiale ikke anvendes for MMVF'er med en *længdevægtet geometrisk middeldiameter* (LWGMD) minus to geometriske standardafvigelser (SD) på over 6 µm, jf. CLP-forordningens Note R. Det er derfor relevant at bestemme LWGMD for prøverne i dette projekt.

LWGMD skal bestemmes efter testmetode A.22 i 'Annex to Commission Regulation (EC) No 440/2008 (EC_440/2008)', som beskriver, hvordan prøver fremstilles, og hvordan diameteren måles ved hjælp af skanning-elektron-mikroskopi (SEM).

I projektet er morfologien (dvs. formen og strukturen af fibre) blevet bestemt for udvalgte fraktioner for at skabe et datagrundlag for de videre undersøgelser. Forud for morfologiundersøgelsen er de undersøgte prøver fraktioneret i forskellige partikelstørrelser vha. af sigtetårn. Som en del af morfologiundersøgelsen er fiberlængden og -bredden blevet bestemt for >15.000 partikler/fibre for fraktionerede prøver med partikelstørrelser mindre end 36 µm. Dette gør det muligt at bestemme LWGMD og den tilhørende standardafvigelse og dermed vurdere, om prøverne vil kunne blive undtaget fra den harmoniserede klassificering som kræftfremkaldende materiale. Der er taget udgangspunkt i definitionen af fibre som partikler med længde/bredde-forhold ≥ 3 .

Fordelingen for LWGMD er observeret tilnærmet at følge en log-normal-fordeling, ligesom det er tilfældet for mange partikelforekomster i naturen. I TABEL 13 er fordelingerne for LWGMD for prøverne vist sammen med en tilpasning af data til en log-normal-funktion. Resultaterne for tilpasningerne er vist i FIGUR 10 i form af en tekstangivelse af værdierne og en rød hhv. grøn vertikal linje for LWGMD hhv. $LWGMD - 2 \times SD^9$ samt en magenta linje for den tilpassede fordeling. Resultaterne er også summeret i TABEL 13.

TABEL 13. Oversigt over værdierne for LWGMD for tilpasning med en log-normal-fordeling for prøverne, der er blevet karakteriseret i projektet. Navngivningen af kolonerne følger testmetode A.22 i 'Annex to Commission Regulation (EC) No 440/2008'.

Navn	Nr.	LWGMD [µm] ¹⁰	SD [µm] ¹¹	ln(LWGMD)	SD _{ln} ¹²	LWGMD – 2 x SD [µm] ⁹
Stenuld brugt ¹⁴	1	9,4	2,8	2,24	1,017	1,23
Stenuld ny	2	12,1	1,9	2,49	0,662	3,23
Glasuld brugt	3	11,8	1,7	2,47	0,518	4,2
Glasuld ny ¹⁴	4	16,2	1,5	2,78	0,404	7,2
Blandet brugt	5	11,5	1,8	2,44	0,590	3,54
Blandet brugt, finfraktion ¹⁴	6	11,9	1,8	2,47	0,577	3,75
Stenuld, Rockwool, finfraktion	7	10,1	2,4	2,31	0,882	1,73
Stenuld, Rockwool, grovfraktion ¹³	8	13,0	1,8	2,57	0,603	3,89

⁹ $\exp(\ln(LWGMD) - 2 \cdot \ln(SD))$

¹⁰ Udregnet som $\exp(\ln(LWGMD))$.

¹¹ Udregnet som $\exp(SD(\ln(LWGMD)))$.

¹² $\ln(LWGMD)$

¹³ 36-63 µm fraktionen fra sigtetårn brugt

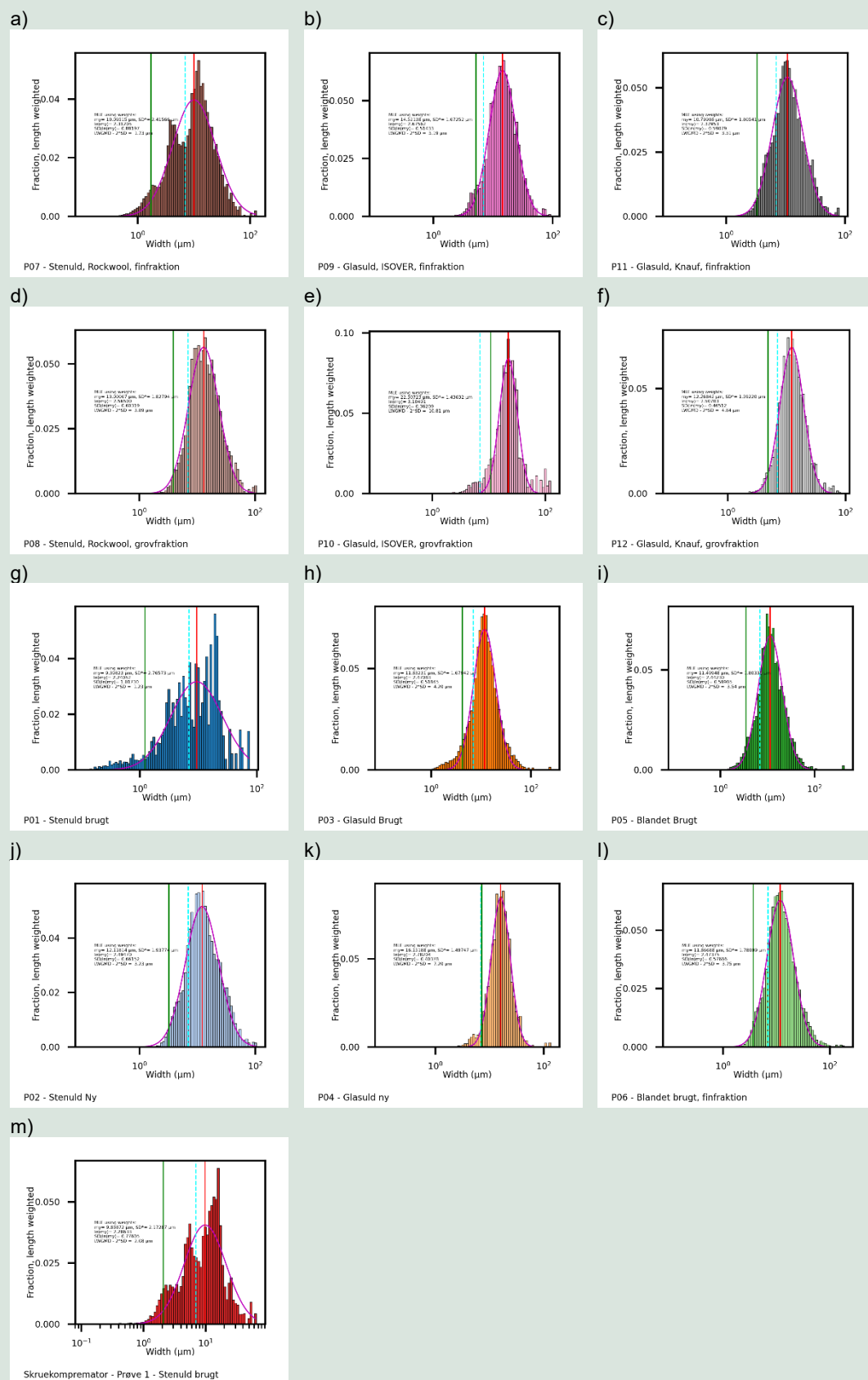
Navn	Nr.	LWGMD [µm] ¹⁰	SD [µm] ¹¹	ln(LWGMD)	SD _{ln} ¹²	LWGMD – 2 x SD [µm] ⁹
Glasuld, ISOVER, finfraktion	9	14,5	1,7	2,68	0,514	5,19
Glasuld, ISOVER, grovfraktion ¹⁴	10	22,3	1,4	3,10	0,362	10,8
Glasuld, Knauf, finfraktion	11	10,8	1,8	2,38	0,591	3,31
Glasuld, Knauf, grovfraktion	12	12,3	1,6	2,51	0,465	4,84
Norrecco - Glasuld, skruekomprimator, 0-200 µm		9,8	2,2	2,29	0,776	2,08

For at opfylde kriteriet, at $LWGMD - 2 \times SD > 6 \mu m$, kræves det, at LWGMD i første omgang er større end 6 µm. Dette er dog tilfældet for alle de undersøgte prøver. Herefter kræves en smal partikelstørrelsesfordeling for at opfylde $LWGMD - 2 \times SD$ -kriteriet. Det er kun to prøver, der har tilpas smalle fordelinger, hvor kriteriet er opfyldt: nr. 10 og nr. 4, *Glasuld, ISOVER, grov-fraktion* og *Glasuld ny*.

På baggrund af det sparsomme datagrundlag for hver type prøve og forskellig neddelningsteknik er det ikke muligt at drage statistisk signifikante konklusioner. Det bemærkes dog, at $LWGMD - 2 \times SD$ -værdien er lavere end 6 µm for de prøver, hvor der er opsamlet en tilstrækkelig mængde prøve af den mindste fraktion fra sigtetårnsanalysen og opnået et tilstrækkeligt datagrundlag fra morfologiundersøgelsen. Yderligere bemærkes det, at prøver, der stammer fra brugt mineraluld, har en lavere $LWGMD - 2 \times SD$ -værdi. Slutteligt observeres det, at groft neddelte mineraluldsprøver har en højere $LWGMD - 2 \times SD$ -værdi, hvilket kunne indikere, at processen har indflydelse på bredden af fordelingen.

Det konkluderes derfor, at det på baggrund af de gennemførte undersøgelser ikke er muligt at omklassificere neddelt mineraluldsaffald produceret før 1997 fra farligt til ikke-farligt affald gennem CLP-forordningens Note R. Kilder til ikke-klassificeret mineraluldsaffald kræver datering og deraf følgende klassificering af mineralulden, eksempelvis mineraluldsaffald fra nybyggeri.

¹⁴ Meget lidt prøve, derfor meget få fibre brugt



FIGUR 10. LWGMD-plots for de prøver, der er blevet karakteriseret i projektet. De lilla, røde og grønne linjer viser hhv. en log-normal-tilpasning til data, middelværdien for fordelingen og middelværdien fratrasket to standardafvigelser for fordelingen.

5.3 Sortering og håndtering af mineraluld til genanvendelse

Der blev gennemført et forsøg med det formål at indsamle en ren fraktion af stenuld fra byggepladser med nybyggeri. Forsøget blev etableret i samarbejde med en af de større entreprenører, som har fokus på genbrug og genanvendelse. Lederen af byggepladsen blev involveret, og der blev fremsendt en sorteringsvejledning (se FIGUR 11) til brug for sortering i containeren.

✓ Vi kan modtage Stenuld - En kildesorteret ren fraktion af stenuld - Stenuld, som er fremkommet ved nybyggeri eller i produktion (rent afskær) - Stenuld, som er produceret efter 1997	✗ Stenulden må ikke indeholde - Glasuld eller andre mineraluldsprodukter - Urenheder - træ, plast og andet affald - Kalkprodukter som mørtel, puds o. lign.
---	---

FIGUR 11. Vejledning til sortering af stenuld fra nybyggeri til genanvendelse.

Ved ankomst til Norreccos pladser blev containeren med indsamlet stenuld gennemgået og sorteret. Der blev fundet et betydeligt indhold af affald i fraktionen, som tydeligvis var relateret til isoleringsarbejdet, og som har karakter af at stamme fra en oprydning på arbejdsstedet – se billederne i FIGUR 12. Eksempler på andet affald blandt i mineraluldsaffaldet er plastfolier, hård plastemballage, skum, pap og papir, metalgenstande som søm, skruer og hæfteklammer og endda ødelagt værktøj.



FIGUR 12. Øverste billede – Stenuld udsortet på en byggeplads med nybyggeri. Nederste to billeder – eksempler på affald, der forekom i den kildesorterede container med stenuld.

Forsøgene med udsortering af en ren stenuldsfraktion fra byggepladser viste, at der enten skal ske en ekstraordinær indsats på byggepladserne for at sikre tilstrækkelig rene, kildesorterede fraktioner eller ske en eftersortering på et modtageanlæg, før mineralulden kan nedknuses til mineralulds mel. Alternativt skal der udvikles sorteringsudstyr, som vil kunne udsortere de mange forskellige affaldsmaterialer.

5.4 Udvikling af neddelingsteknologi

Korrekt neddelingsteknologi er essentielt for at imødekomme de produktspecifikke materialekrav for genanvendelse af mineraluldsaffald i tegl, asfalt og ny glasuld. I projektet er der derfor gennemført udviklingsforsøg hos Norrecco og Nordic Waste med forskellige neddelingsteknologier, hvor de neddelte fraktioner er blevet karakteriseret i forhold til de specifikke anvendelser.

5.4.1 Udviklingsforsøg med hammermølle ved Nordic Waste

Formålet med udviklingsforsøgene hos Nordic Waste var at undersøge, om:

- mineraluld kan neddeles til en partikelstørrelse, der er egnet til anvendelse som asfaltfiller i NCC's produktion
- hammermølleteknologien kan danne tilstrækkelig friktionsvarme til at nedbryde bindermaterialet i glasuldsaffald, så ISOVER ville kunne genanvende materialet.

Forsøg med fyldmateriale fra glasuld

Der blev udført en række forsøg med forneddelt glasuld fra ISOVER (FIGUR 13). I forsøgene blev tilført dels sand og dels vand for at øge densiteten, så materialet nemmere kunne proceseres i hammermøllen.



FIGUR 13. Input glasuldstopper fra ISOVER blandet med sand.

TABEL 14. Forsøgsparametre for neddelingsforsøg med glasuld i hammermølle.

Forsøg	Glasulds ind (kg)	Sand ind (kg)	Sand (%)	Vand (kg)	Sold	Behandling	Temperatur output
1	13	13	50		Type 1	1x	
2	13	52	80		Type 1	1x	
3	13	52	80		Type 2	1x	
4	13	13	50		Type 2	1x	
5	13	13	50	13	Type 2	1x	
6					Type 2	Repeteret forsøg 5	Håndlun
7					Type 2	Repeteret forsøg 6	Håndlun
8	52	0	0	40-44	Type 2	50 % 1x + gennemløb	
9					Type 2	Repeteret forsøg 8	
10					Type 2	Repeteret forsøg 9	

Forsøg	Glasulds miks ind (kg)	Sand ind (kg)	Sand (%)	Vand (kg)	Sold	Behandling	Temperatur output
11					Type 2	Miks af forsøg 1-4	Håndlun
12					Type 2	Repeteret forsøg 11	Håndlun

Ved forsøg 1-4 blev mængden af sand og filtreringssoldet varieret. I forsøg 5 blev der anvendt en mindre soldstørrelse (type 2), og der blev tilsat lidt vand for yderligere at øge densiteten. Materialet fra forsøg 5 blev genindført i forsøg 6 og materialet herfra genindført i forsøg 7. Outputmaterialet var håndlunt og derfor ikke tilstrækkeligt varmt til, at binderen kan være nedbrudt og afgasset. Forsøgsparametrene er opsummeret i TABEL 14.

I forsøg 8 blev anvendt en større mængde vand og ingen sand, mens forsøg 9 og 10 er repetitioner med genindført materiale fra hhv. forsøg 8 og 9. Forsøg 11 var en genprocessering af en blanding af forsøg 1-4 og forsøg 12 en genbehandling af forsøg 11. Prøver af hhv. forsøg 8, 10 og 12 er vist i FIGUR 14. Effekten af genbehandling er illustreret i TABEL 15.

TABEL 15. Sammenligning af måling af Tørstof procent (%TS) og bulkdensitet ved repetitioner.

Forsøg nr.	% TS ind	%TS ud	Bulkdensitet g/cm ³
8	Ca. 55	64,6	0,15
10		66,5	0,37
12		97,3	0,4

Tabellen viser, at det tilsatte vand i forsøg 8 kun fordamper i mindre omfang i processen. Det ses yderligere, at repeteret behandling (forsøg 9 og 10) af forsøg 8 øger bulkdensiteten (tør) fra 0,15 g/cm³ til 0,37 g/cm³. Dette vil samtidig resultere i en mindre partikelstørrelse i forsøg 9 og 10 sammenlignet med forsøg 8.

Materialet var generelt svært at få fødet igennem hammermøllen ved første passage af inputmaterialet, da det ikke var tilstrækkeligt forneddelt. Efter anden passage igennem hammermøllen forløb behandlingen efterfølgende problemfrit. Sand passerer formentlig forholdsvis hurtigt gennem de store huller og vurderes ikke at have haft en signifikant effekt.



FIGUR 14. Prøver 8 tv., 10 mf., 12 tv. (den brune farve skyldes indhold af okker i tilsat vand).

Samlet konkluderes det, at:

- der blev ikke udviklet nok varme til at fordampe vand og slet ikke til at nedbryde binder
- materialet vurderedes ikke at være tilstrækkeligt neddelt til at kunne imødekomme kravene til partikelstørrelsesfordelingen for asfaltfiller til NCC.

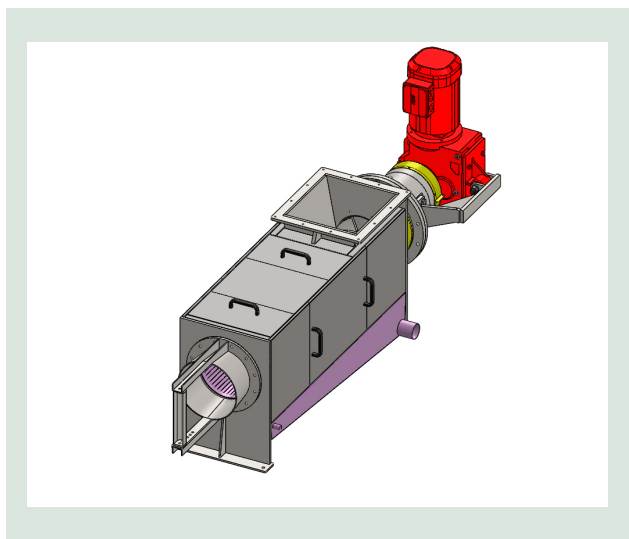
Efterfølgende blev udført yderligere forsøg med reduceret soldstørrelse og tørt forkværnet inputmateriale af glasuld, brugt glasuld og ny stenuld. Forsøgene gav desværre ikke et tilfredsstillende neddelingsresultat. Det blev konkluderet, at der kræves yderligere udvikling for at få hammermøllen til at behandle især tørt glasuld og stenuld.

5.4.2 Udviklingsforsøg med skruekomprimatorer ved Norrecco

En sammenligning mellem resultater af basiskarakteriseringen for de forskellige fraktioner og kravsspecifikationer fra hhv. Strøjer Tegl og NCC (se kapitel 4) viste, at der var behov for tilpasning af teknologi til neddeling af mineraluld, så især kravene til kornstørrelsesfordelingen kunne opfyldes. Det blev derfor besluttet at afprøve og tilpasse tre forskellige typer af neddelingsudstyr til neddeling af mineraluld.

5.4.2.1 Type 1: Skruekomprimator fra Hansek Maschinenbau

Skruekomprimatoren fra Hansek Maschinenbau er illustreret i FIGUR 15. Når mineralulden indføres i skruekomprimatoren, vil mineralulden blive neddelt som følge af det tryk, som materialet udsættes for. Neddelingsgraden på skruekomprimatoren kan justeres ved at justere afstanden mellem selve skruen og den plade, som er placeret for enden af skruen, og som materialet presses op imod. Skruekomprimatoren har en kapacitet mellem 250 kg og 1.000 kg/timen. Forudsætningen er, at inputmaterialet er tørt og har en størrelse mellem 0 og 20 mm. Med et ønsket outputmateriale på 2 mm vil anlægget formentlig have en effektiv kapacitet på 850 til 1.000 kg/timen.



FIGUR 15. Illustration af skruekomprimator fra Hansek Maschinenbau.

Der blev gennemført indledende forsøg med neddeling af ny glasuld, ny stenuld og brugt blandet mineraluld, hvor oversigten af prøver ved skruekomprimator kan ses i TABEL 16.

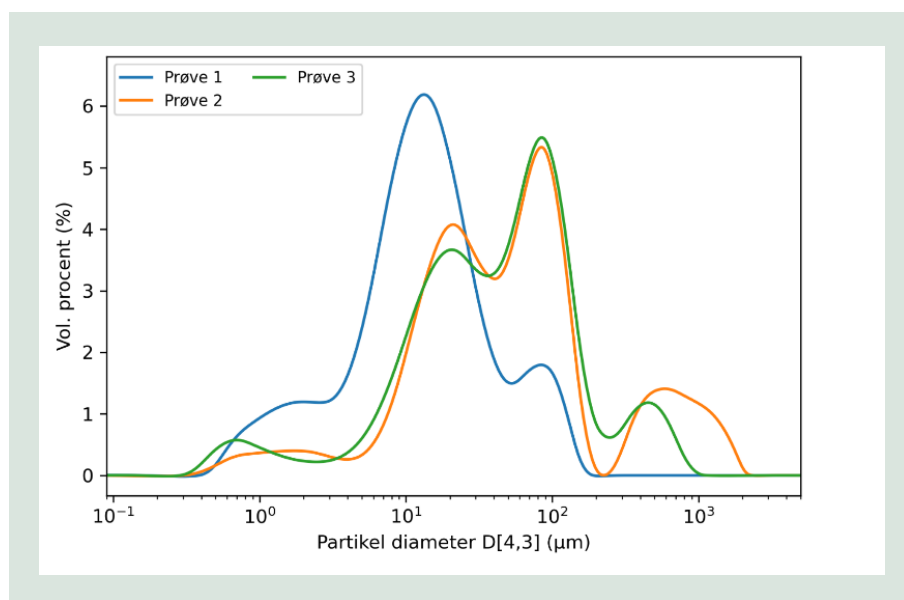
TABEL 16. Oversigt over prøver fremstillet med skruekomprimator.

Navn	Beskrivelse
Skruekomprimator – Prøve 1	Ny glasuld (neddelt til <2 mm samt formalet til <200 µm)
Skruekomprimator – Prøve 2	Ny stenuld (neddelt til <2 mm)
Skruekomprimator – Prøve 3	Brugt blandet mineraluld (neddelt til <2 mm)



FIGUR 16. Billeder af glasuld (venstre) og stenuld (højre) efter neddeling i en skruekomprimator fra Hansek Maschinenbau.

De neddelte produkter fra skruekomprimatoren for hhv. glasuld og stenuld er afbilledet i FIGUR 16. For alle neddelte fraktioner blev der udtaget prøver til bestemmelse af partikelstørrelsesfordelingen (se FIGUR 17). Som resultat af den øgede finneddeling findes en større fraktion af partiklerne for skruekomprimator prøve nr. 1 at være mindre i partikeldiameter end prøve nr. 2 og prøve nr. 3. TABEL 17 viser andelen af partikler med kuglediameter, som er under 10 %, 50 % og 90 % volumen af materialet.



FIGUR 17. Partikelstørrelsesfordeling af skruekomprimator for prøve nr. 1, 2 og 3 bestemt ved Mastersizeranalyse. De individuelle toppe er fortolket efter metoden beskrevet i Bilag 2.3, da Masersizeren tilnærmer fiberpartiklen til en kuglegeometri.

TABEL 17. Oversigt over diameteren for partikler ved 10 %, 50 % og 90 % af volumenet.

Skruekomprimator, prøve nr.	d (0,1) [µm]	d (0,5) [µm]	d (0,9) [µm]
1	2,38 (2)	12,09 (3)	42,0 (1,3)
2	9,1 (4)	31 (2)	104 (4)
3	7,7 (4)	33,9 (1,6)	112,7 (1,7)

I skruekomprimator prøve nr. 2 (ny stenuld 0-2 mm) er der fundet et vægtmæssigt lille plastindhold (indhold på 0,09 %) stammende fra tynd plastfolie. Ligeledes er der i skruekomprimator prøve nr. 3 (brugt blandet 0-2 mm) fundet et plastindhold på 0,08 % (se FIGUR 18). Plastfolien er så tynd, at den kan passere komprimatoren sammen med fibre. Der blev ikke fundet visuelt synlig folie i skruekomprimator prøve 1, ny glasuld 0-200 µm (se FIGUR 19).

Erfaringer fra de indledende forsøg var, at udstyret kunne håndtere neddeling af alle tre fraktioner til under 2 mm. Derimod vil en formaling til mindre end 200 µm med denne type af udstyr være tidskrævende og omkostningstungt.



FIGUR 18. Blandet mineraluld 0-2 mm. Venstre: 100 gram sorteret. Højre: plastfolie-stumper 0,09 g.



FIGUR 19. Prøve 1, ny glasuld (0-200 μm).

5.4.2.2 Type 2: Skruekomprimator fra Runi

Princippet for neddeling af mineraluld i en skruekomprimator fra Runi svarer til princippet i ovenstående type udstyr fra Hansek Maschinenbau. Dog er der i udstyret fra Runi ikke et plademodhold på udstyret. Åbningen i det rør, som leder materialet bort fra skruen, kan justeres,

og derved kan der opbygges et mindre tryk for enden af selve skrue, som bidrager til at knuse mineralulden. Maskinens driftskapacitet er oplyst til ca. 3 tons/time.

Neddelingsudstyret blev testet til neddeling af blandet glas- og stenuld indsamlet fra genbrugsstation samt glasuld fra ISOVER. Der blev gennemført et enkelt forsøg, og erfaringerne fra forsøgene skal derfor tages med et vist forbehold. De indledende forsøg viste, at det ikke var muligt at neddele den bløde langfibrede type glasuld til et homogent produkt (se FIGUR 20).

En forneddeling af materialet vil formentlig være nødvendig for at opnå et homogent produkt under 2 mm, og der vil samtidig være behov for at udsortere affald fra det indsamlede materiale enten ved en forsortering eller en eftersortering af slutproduktet.



FIGUR 20. Billeder af glasuldmaterialet før neddeling (venstre) og efter neddeling (højre) i en skruekomprimator fra Runi.

5.4.2.3 Type 3: Skruekomprimator fra Retec

Skruekomprimator til neddeling af mineraluld fra Retec fungerer efter samme principper som maskinen fra Runi. Dog er der påmonteret en rundsorterer til udsortering af overstørrelsesfraktionen efter skruekomprimatoren. Overstørrelsesfraktionen indeholder både mineraluld og affald. Overstørrelsesfraktionen kan genindføres i maskinen igen.

Udstyret fra Retec blev testet til neddeling af blandet mineraluld. Forsøgene blev gennemført i følgende proces-setup:

- Forneddeling af det blandede mineraluld med en AK 560 hurtig-neddeler
- Det forneddelte materiale blev soldet over et 15 mm sold for at frasortere uvedkommende affaldsfraktioner
- Materialet blev derefter neddelt i skruekomprimator
- Neddelt mineraluld blev soldet over et 4 mm sold.

Den neddelte mineraluldsfraktion og tilhørende udsorterede affaldsfraktion er vist på FIGUR 21. Forsøgene viste, at det er vanskeligt at opnå et homogent produkt med en partikelstørrelse under 4 mm. Se Bilag 2, prøve P12.



FIGUR 21. Billeder af neddelte mineraluld med Retecudstyr som modtaget hos Norrecco (tv.), samt billede af udsorteret affald ved rundsortering af slutproduktet (th.).

5.4.3 Evaluering af udviklingsforsøg hos Nordic Waste og Norrecco

Baseret på resultaterne af udviklingsforsøgene hos Norrecco og Nordic Waste var det umiddelbart kun skruekomprimatoren fra Hansek Maschinenbau, som kunne levere en homogen, neddelte fraktion med partikelstørrelsesfordeling under 2 mm. Skruekomprimatoren fra Hansek var samtidig den eneste af de afprøvede neddelingsteknologier, som kunne levere en fillerfraktion på under 200 µm mod længere behandlingstid. Det skal bemærkes, at denne betragtning grunder i få testforsøg. Det vil være nødvendigt med yderligere afprøvning for at kunne drage endelige konklusioner. Nærværende projekt blev afsluttet, inden yderligere afprøvning af teknologierne kunne foretages.

Udviklingsforsøgene påviste endvidere, at der er behov for videre udvikling af oparbejdningsprocessen til at kunne frasortere fremmedlegemer som træ, metal, plast m.m. I videreudviklingen af oparbejdningsprocessen anbefales det derfor at undersøge muligheden for at inkorporere enhedsoperationer, som faciliterer udsortering af fremmedlegemer evt. ved brug af fornedeling kombineret med rundsorterer og/eller cyklonseparation.

5.5 Evaluering af resultater fra forsøg i forhold til anvendelser

Baseret på de opnåede resultater i forsøgene er der foretaget en evaluering i forhold til anvendelse ved NCC, Strøjer Tegl og ISOVER.

5.5.1 Vurdering af genanvendelse i tegl

Strøjer Tegl anvender i dag allerede produktionsspild fra fremstillingen af stenuld i tegl. I projektet er det gennem udviklingsforsøgene påvist, at materialekravene ift. kornstørrelse og homogenitet af kornstørrelsesfordelingen jf. afsnit 4.2 kan imødekommes. Da der imidlertid ikke kan sikres ensartet sammensætning af mineraluldsaffald med et maksimalt indhold af glasuld på 15 % fra hverken genbrugsstationer eller fra nybyggeri i tilstrækkelige mængder, og da mineraluldsaffald ikke kan omklassificeres til ikke-farligt affald indenfor gældende lovgivning, blev det vurderet, at genanvendelse af post-consumer mineraluldsaffald i teglproduktion ikke er rentabelt med gældende håndteringspraksis og materialetilgængelighed.

5.5.2 Vurdering af genanvendelse i asfalt

En væsentlig udfordring for genanvendelse af mineraluldsaffald som filler- eller sandfraktion i asfaltproduktion er kornstørrelsesfordeling, optag af fugt og klassificeringen af neddelt mineraluld.

Det viste sig vanskeligt at frembringe en kornstørrelsesfordeling, som imødekom kravene til fillerfraktionen. Dette skyldes primært, at det afprøvede neddelingsudstyr ikke – med en tilstrækkelig høj produktionskapacitet – kan frembringe en neddelt finfraktion i de påkrævede mængder til asfaltproduktion. Derfor bliver kostprisen på en mineraluldsbaseret fillerfraktion for høj ift. eksisterende løsninger.

NCC har tidligere undersøgt anvendelse af knust mineraluld som sandfraktion, men grundet et højt fugtoptag har asfalt med tilsat mineraluldssand ikke kunne bestå test ift. bestandighed overfor vandpåvirkning. Det er i projektet dokumenteret, at neddelt mineraluld med en middelnkornstørrelse over 250 µm optager helt op til 90 vægtprocent vand, hvorfor den ikke er anvendelig som sandfraktion til asfaltproduktion. Projektet har afsøgt om finnedelt mineraluld kan anvendes som fillerfraktion. Baseret på gennemførte undersøgelser har finnedelt mineraluld (<250 µm) et betydeligt mindre fugtoptag end neddelt mineraluld med en middelnkornstørrelse på over 250 µm. Det bestemte fugtoptag er dog stadig det dobbelte af det normalt anvendte sand. Om dette har en indvirkning på bestandigheden af asfalten ift. vandpåvirkning bør undersøges nærmere.

Slutteligt er omklassificering af neddelt mineraluld nødvendigt for genanvendelse i asfalt. Da mineraluldsaffald ikke kan omklassificeres indenfor projektets rammer, konkluderes det, at genanvendelse af post-consumer mineraluldsaffald i asfaltproduktion ikke er praktisk muligt.

5.5.3 Vurdering af genanvendelse i ny glasuld

For genanvendelse af glasuldsaffald i ny glasuld kræver det, at materialekravene i TABEL 8 overholdes. I projektet er det gennem udviklingsforsøgene påvist, at enkelte af de afprøvede neddelingssteknologier kan imødekomme materialekravene til kornstørrelse og homogenitet af kornstørrelsesfordelingen for glasuldsaffald. Det organiske indhold har ikke kunnet fjernes med via de afprøvede teknologier. Det er særlig vigtigt for genanvendelse af mineraluldsaffald i ny glasuld, at mineraluldsaffaldet ikke indeholder stenuld, dvs. kun glasuld, og urenheder såsom metal, keramik, porcelæn og plastik. Grundet manglende udsortering i indsamlingsledene kan der ikke sikres en ensartet glasuldsfraktion med få urenheder.

ISOVER har sideløbende med projektet arbejdet med at reducere kravene til renheden af råvarematerialerne til glasuld. Her arbejdes der med ny teknologi i forhold til gensmeltning af glasuldsaffald. Dette indebærer blandt andet et mindre strengt krav til indhold af organisk materiale samt forureninger med stenuld, der ventes at matche de nuværende renhedskrav til stenuldsgenanvendelse. Der er dog stadig behov for en grundigere sortering i alle indsamlingsled end den sortering, som udføres i dag, hvis glasuldsaffald i fremtiden skal kunne genanvendes i ny glasuld. Teknologien er dog i skrivende stund (2022) endnu ikke tilgængelig i Danmark.

6. Konklusion

I projektet har Norrecco, Nordic Waste, Teknologisk Institut, Saint-Gobain ISOVER, Strøjer Tegl og NCC Industry undersøgt genanvendelsesmulighederne for mineraluld i nye produkter.

Forudsætningen for at kunne genanvende mineraluldsaffald i nye produkter såsom ny glasuld, tegl og asfalt er, at kravene til disse anvendelser skal kunne imødekommes, og her er en omklassificering af mineraluldsaffald fra farligt affald til ikke-farligt affald det ubetinget største krav hos tegl- og asfaltproducenterne i projektet. Som en del af projektet er grundlaget for klassificeringen af mineraluld belyst. Der er i CLP-forordningen to mulige tilgange til omklassificering af mineraluld, jf. Note Q eller Note R. Opfyldelse af Note Q vil kræve, at der løbende skal ske prøvetagning og test af mineraluldsfibrenes bioopløselighed og sammensætning; et kontrolkrav, som praktisk ikke er muligt at imødekomme for blandet mineraluldsaffald med meget varierende sammensætning. Opfyldelse af CLP-forordningens Note R kræver dokumentation for, at neddelte mineraluldsfibre imødekommer kriteriet for den længdevægtede middeldiameter af fibre. Gennem en række udviklingsforsøg i dette projekt med forskellige neddelingsteknologier konkluderes det, at selv med de bedste tilgængelige neddelingsteknologier kan kravet i Note R ikke opfyldes.

Mineraluld fra før 1997, som er tilgængelig via genbrugsstationer og nedrivning, kan derfor ikke omklassificeres indenfor projektets rammer. Dermed kan denne mineraluldsfraktion ikke genanvendes i tegl eller asfalt, da man hos de projektdeltagende industripartnere ikke ønsker at anvende klassificeret farligt affald som råvare. For at modvirke den nuværende deponering og sikre genanvendelse af mineraluldsfraktionen foreslås det derfor fra projektets deltagere, at man med udgangspunkt i nyere undersøgelser og anbefalinger fra bl.a. WHO/IARC revurderer den nuværende lovgivningspraksis, og undersøger om en omklassificering af mineraluldsaffald kan muliggøres.

Genanvendelse af blandet mineraluldsaffald i asfalt er udfordret af den neddelte mineralulds egenskab til at filtrere sammen og herved danne tilstrækkelig kapillareffekt til at optage og holde på fugt. Fugtoptaget blev indledningsvis fundet til at kunne reduceres gennem yderligere finneddeling. Selv med det lavest opnåede fugtoptag, er fugtoptaget af finnedelt mineraluld dog stadig det dobbelte af den konventionelt anvendte sand- og fillerfraktion og vil forventeligt påvirke asfaltens bestandighed overfor vandpåvirkning.

Genanvendelse af mineraluldsaffald i både ny glasuld hos glasuldsproducenter og tegl hos teglproducenter forudsætter en bedre kildesortering, således at der opnås en ensartet og ren fraktion af hhv. glasuld og stenuld. I projektet er indsamlingen af velsorteret mineraluldsaffald fra nybyggeri indledningsvis blevet undersøgt. Her har indsamling af tilstrækkelige mængder i den påkrævende sorteringsgrad og renhed vist sig som en potentiel barriere for genanvendelse af denne mineraluldsfraktion. Udvikling og implementering af teknologier og procedurer for kildesortering kræver en indsats bagud i værdikæden og ligger udenfor projektets rammer. Det anbefales derfor, at der udarbejdes klare generelle retningslinjer og incitamentstrukturer til sortering og genanvendelse af mineraluld.

7. Referencer

1. COM/2020/98: [EU-kommissionens handlingsplan for cirkulær økonomi](#).
2. Rambøll_2020: [CIRKULÆR ØKONOMI I BYGGERIET. ANALYSE AF POTENTIALER FOR ØGET GENBRUG OG GENANVENDELSE AF BYGGEAFFALD](#). Udarbejdet for Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen.
3. MST_2013: [Mineral wools \(glass, stone/slag, HT\). Evaluation of health hazards and proposal of a health-based quality criterion for ambient air](#), Environmental Project No. 1515, 2013.
4. Guldberg_2000: Guldberg et al., 2000. [The Development of Glass and Stone Wool Compositions with Increased Biosolubility](#).
5. RW_2020: [Rockwool Sustainability report 2020](#).
6. 97/69/EC: Kommissionens direktiv 97/69/EC af 5. december 1997 om 23. tilpasning til den tekniske udvikling af Rådets direktiv 67/548/EØF om tilnærmelse af lovgivning om klassificering, emballering og etikettering af farlige stoffer
7. CLP_1272/2008: 'CLP-forordningen' - Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EC) nr. 1272/2008 af 16. december 2008 om klassificering, mærkning og emballering af stoffer og blandinger
8. GGM_2016: [GGM Mineral Wool Quality Association \(2016\): Health assessment of mineral wools on the basis of bio solubility](#). English version.
9. WHO/IARC2002: [IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 81 Man-made Vitreous Fibres](#).
10. REACH_1907/2006: 'REACH-forordningen' - Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EC) nr. 1907/2006 af 18. december 2006 om registrering, vurdering og godkendelse af samt begrænsninger for kemikalier (REACH)
11. MST_2014: [Brev til alle landets kommuner. Separat indsamling af stenuld med henblik på genanvendelse](#).
12. BEK_2512: 'Affaldsbekendtgørelsen' - BEK nr 2512 af 10/12/2021
13. BEK_1253: 'Deponeringsbekendtgørelsen' - BEK nr 1253 af 21/11/2019
14. EC_440/2008: Kommissionens forordning (EC) nr. 440/2008 af 30. maj 2008 om fastlæggelse af forsøgsmetoder i henhold til Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EC) Nr. 1907/2006 om registrering, vurdering og godkendelse af samt begrænsninger for kemikalier (REACH)
15. Hesterberg_2012: Hesterberg et al, 2012, [Product stewardship and science: Safe manufacture and use of fiber glass](#).
16. MST_2016: [Vejledning om B-værdier](#) Vejl. nr. 20 August 2016.
17. MST_2010: [Mineraluld Datablad B-værdi \(hovedgruppe 2\) januar 2010](#).

Bilag 1. Modtagelse og oparbejdning af mineraluld hos Norrecco og Nordic Waste

Modtagelse og oparbejdning af mineraluld hos Norrecco og Nordic Waste

Modtagelse af mineraluld

- Modtagerpladsen for mineraluld placeres så støvspredning pga. vind minimeres
- Der anvendes overtryksskabiner og kulfiltre i maskiner ved arbejde med mineralulden

Oparbejdning af mineraluld

- Oparbejdning sker under tag/ i hal med tilbageholdelse af støv.
- Arbejdsområdet holdes frit for øvrig aktivitet imens oparbejdning finder sted
- Der anvendes støvdæmpning ved nedknusning af mineraluld
- Ved eksponering med støv under oparbejdningsprocessen anvendes personlige værnemidler (beskyttelse af hænder, øjne, hud og luftveje)
- Ved rengøring af oparbejdningsudstyr anvendes personlige værnemidler (beskyttelse af hænder, øjne, hud og luftveje)

Bortkørsel af nedknust mineraluld

- Knust mineraluld opbevares under tørre og ventilerede forhold.
- Læsning af mineraluld på biler sker med maskiner med overtryksskabiner og kulfiltre
- Afmærkning af området under læsning af knust mineraluld
-

Personlige værnemidler

- Beskyttelse af hænder: Brug egnede arbejdshandsker i overensstemmelse med EN 388
- Beskyttelse af øjne: Anvend beskyttelsesbriller, Type EN 166 anbefales.
- Beskyttelse af hud: Der anvendes støvafvisende arbejdstøj (med hætte). Arbejdstøjet må ikke bæres under spisepauser.
- Beskyttelse af luftveje: åndedrætsværn, f.eks. maske med finstøvfilter (P2). Filtermaske må maks. anvendes 3 timer fordelt over en arbejdsdag.
- Personlig hygiejne: Skyl med koldt vand før vask. Vask ansigt, underarme og hænder inden der holdes pauser i spiserummet – og altid ved arbejdstids ophør. Kontakt med huden kan forårsage kortvarig kløe.
- Arbejdstøj og beskyttelsesudstyr til flergangsbrug vaskes/rences før det bruges igen.



**Tildæk udsat hud.
Bær ansigtsmaske
til engangsbrug
ved arbejde
i uventilerede rum**



**Skyl i koldt vand
før vask**



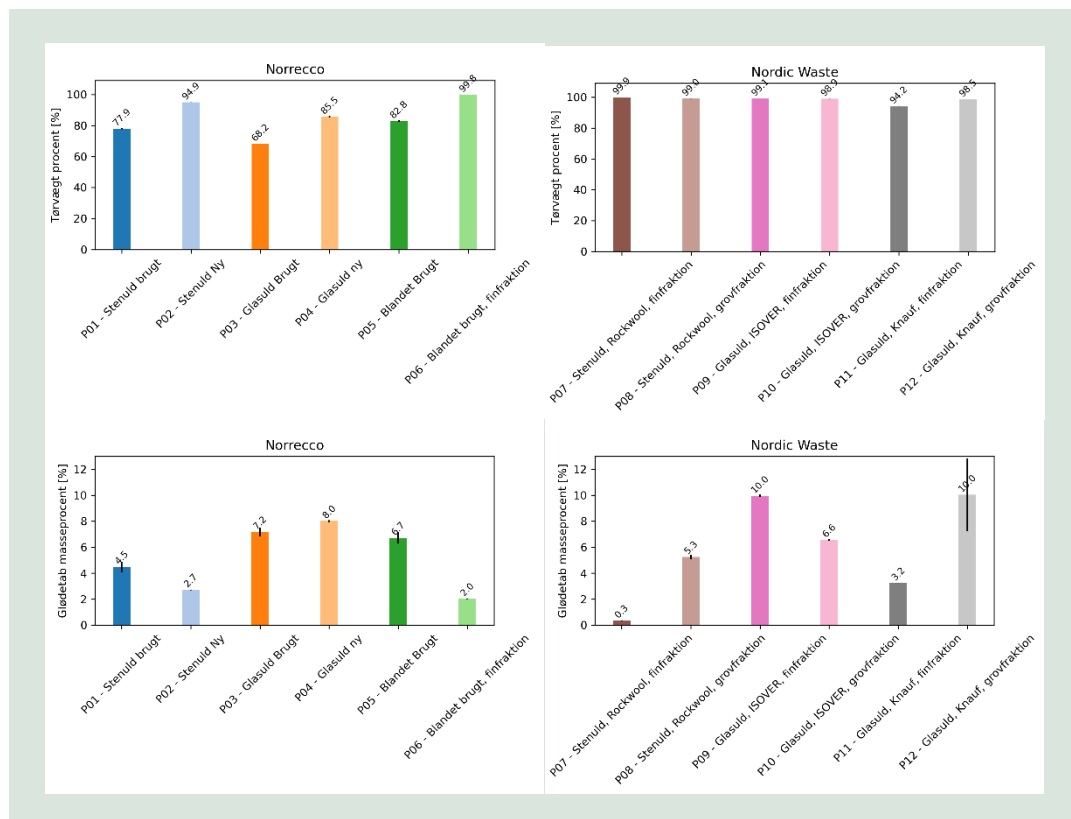
**Bær briller ved
arbejde over
hovedhøjde**

FIGUR 22. Modtagelse og oparbejdning af mineraluld hos Norrecco og Nordic Waste.

Bilag 2. Detaljeret resultat af basiskarakterisering

Bilag 2.1 Glødetab og tørstof indhold

Bestemt tørstof og glødetab er vist i figuren nedenfor.



FIGUR 23. Tørstofindhold og glødetab for alle basisprøver. Usikkerhederne for hver prøve er vist ved en sort linje i toppen af hver bar.

Det ses, at prøve 1-5 fra Norrecco er meget våde efter behandling, da fugtindhold ikke er fjernet i væsentlig grad ved neddelingen. Prøver fra Nordic Waste er typisk mere tørre. Det kan dels skyldes, at hammermøllen fjerner noget vand ved behandlingen, hvilket ses som afgivet damp, dels at tilført materiale har været mere tørt.

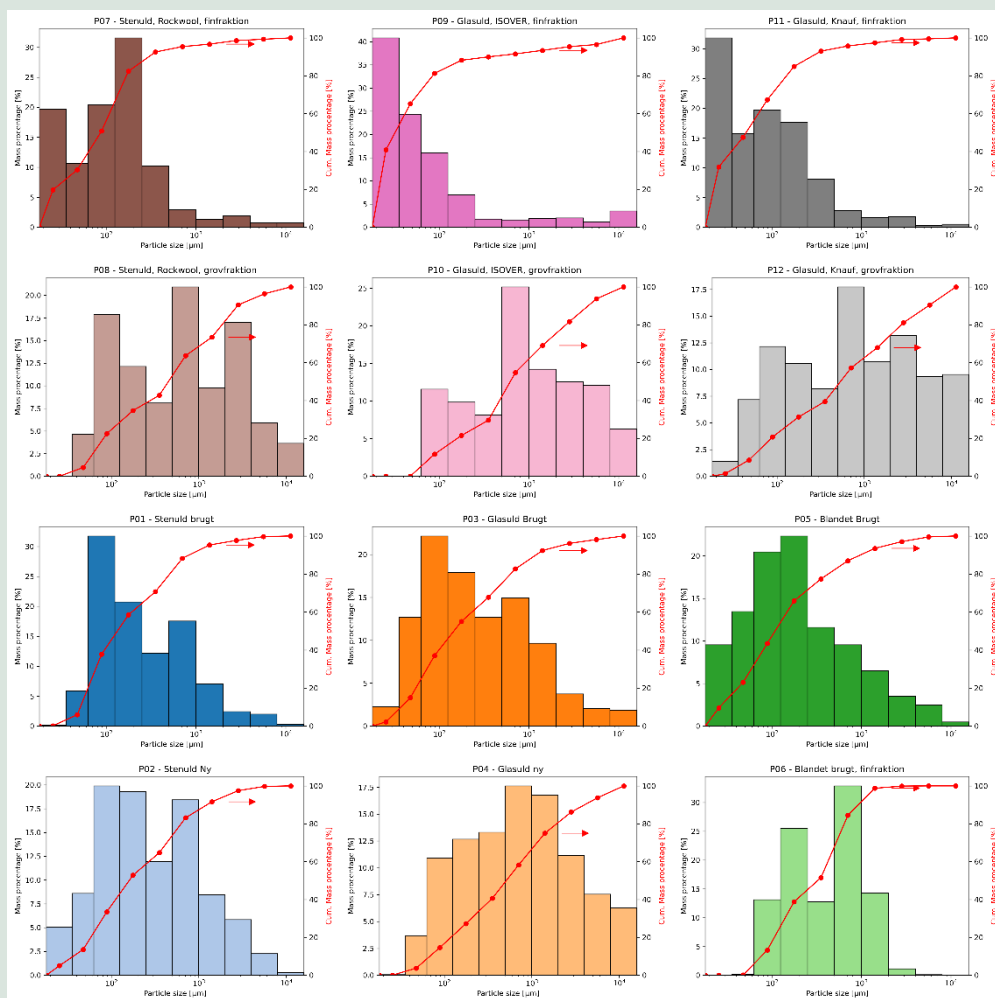
Glødetabsbestemmelserne viser et væsentligt restindhold af organisk materiale efter behandling – typisk mellem 2 % og 10 %. Det organiske indhold vil dels stamme fra binderindholdet, dels fra urenheder såsom papir, plast og træ. En enkelt prøve, P7 Stenuld Rockwool finfraktion fra Nordic Waste, indeholder et meget lille restindhold af organisk materiale på 0,3 %. Dette er dog en finfraktion, som er medrevet af suget fra hammermøllen.

Foreløbige konklusioner vedrørende anvendelse er:

- Materialerne bør som udgangspunkt have et lavt fugtindhold, da der ellers skal bruges energi på at fjerne det. Her indeholder især prøverne fra Norrecco et højt indhold fugt
- Indhold af organisk materiale, som fx binderen, er ikke acceptabelt til ISOVERs nuværende proces.

Bilag 2.2 Bestemmelse af partikelstørrelsesfordelinger med sigtetårnsanalyser og analyser med Mastersizer

Resultater af sigtetårnsanalyser af neddelte mineraluldsfraktioner fra TABEL 10 er vist nedenstående.



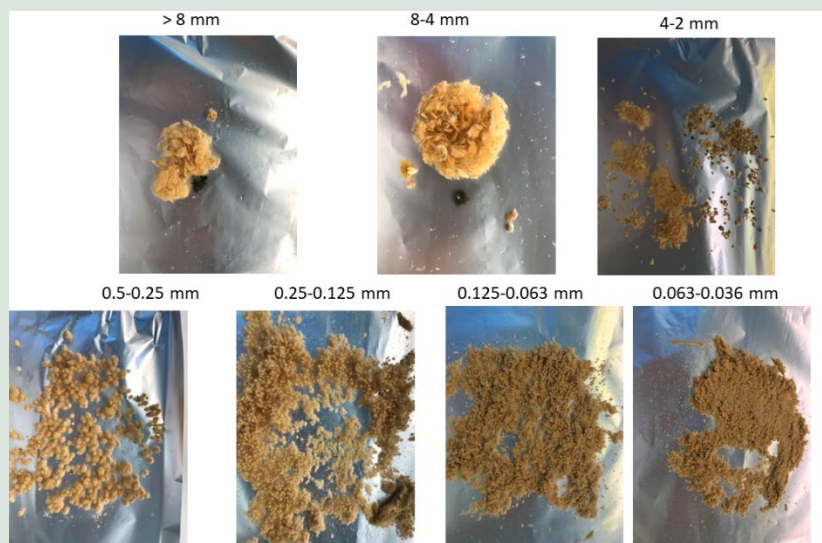
FIGUR 24. Sigtetårnsanalyse resultater for de 12 basisprøver.

De grove fraktioner fra Nordic Waste (P08, P10 og P12 – FIGUR 24) har som forventet et højere indhold af større partikler end de fine fraktioner. Det skal her bemærkes, at store partikler (lange fibre) har en tendens til at filte sammen og herved ikke passere sigten. Se eksempler på FIGUR 25-FIGUR 29.

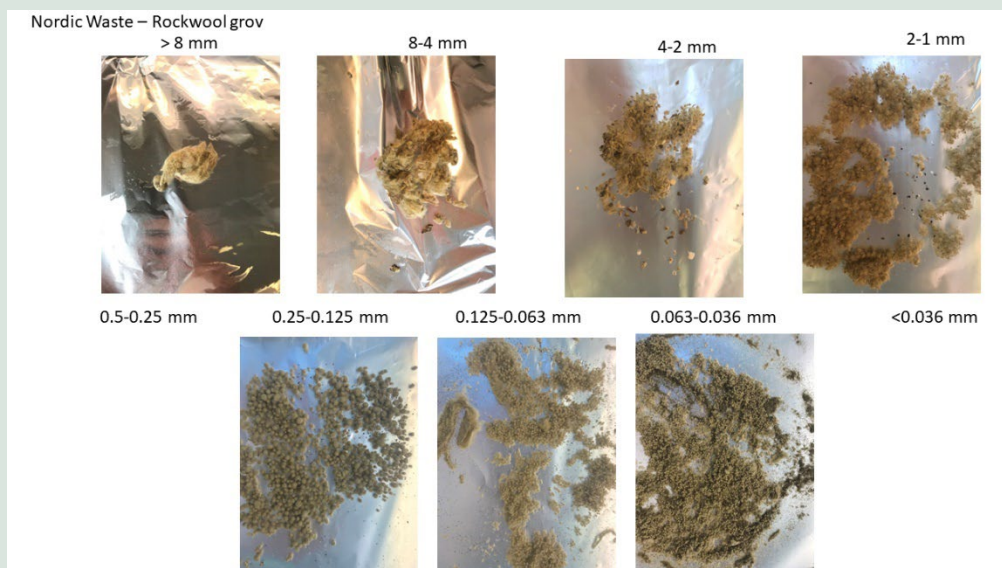
Når partikelstørrelsen når under 125 µm, holder materialet op med at filtrere sammen. Dette betyder, at den traditionelle sigtetårnsmetode ikke er optimal til at karakterisere materialet.



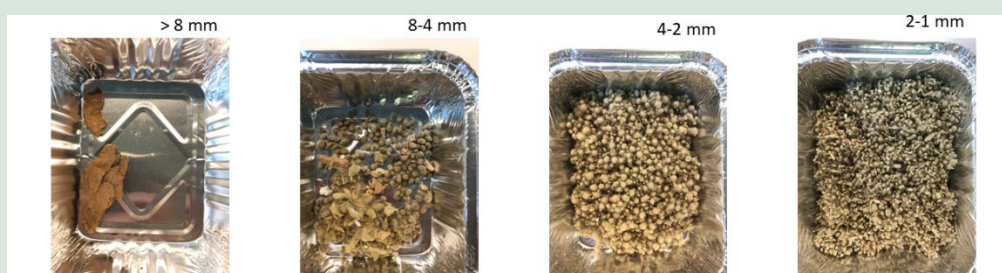
FIGUR 25. Basisprøve nr. 5 - Blandet Brugt – Norrecco.



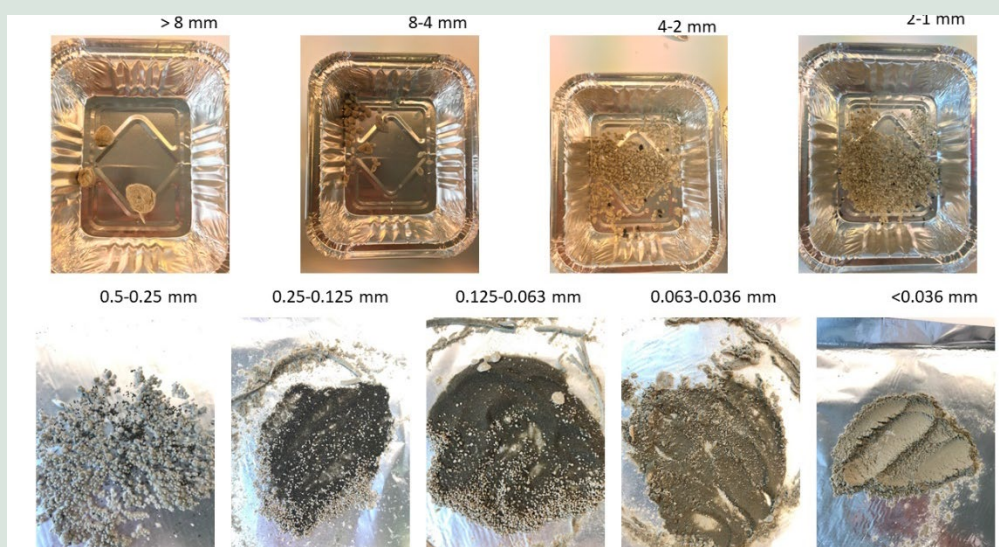
FIGUR 26. Basisprøve nr. 3 - Glasuld Brugt – Norrecco.



FIGUR 27. Basisprøve nr. 8 - Stenuld, Rockwool, grovfraktion – Nordic Waste.



FIGUR 28. Basisprøve nr. 1 - Stenuld brugt – Norrecco.



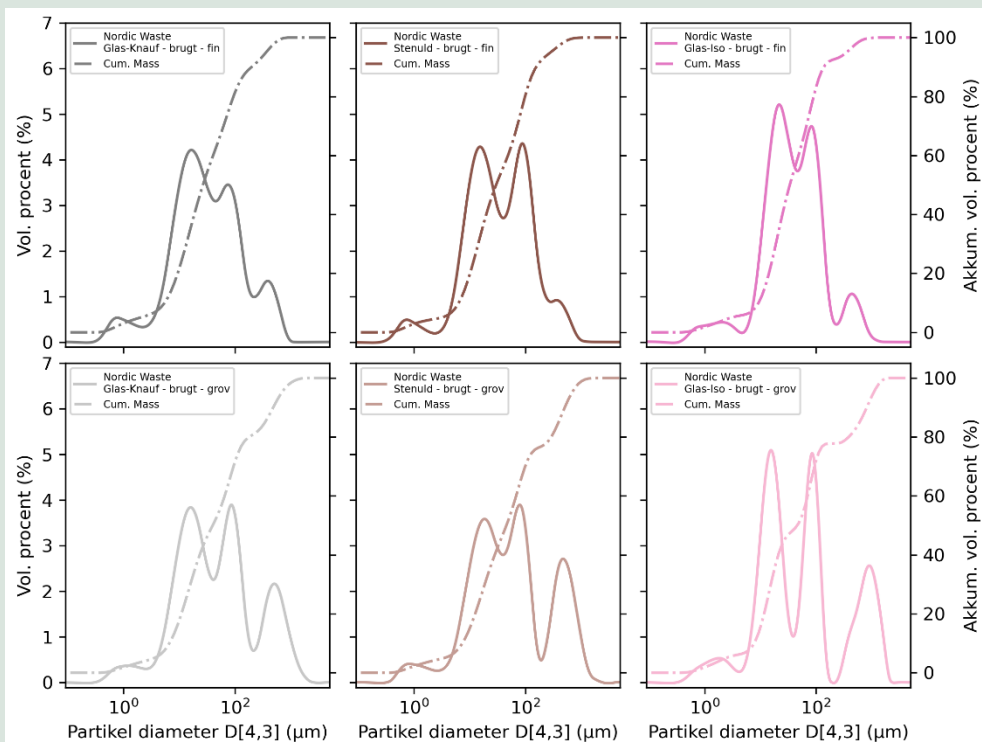
FIGUR 29. Basisprøve nr. 7 - Stenuld, Rockwool, finfraktion – Nordic Waste.

Bilag 2.3 1D-partikelstørrelsesfordelinger – Mastersizer

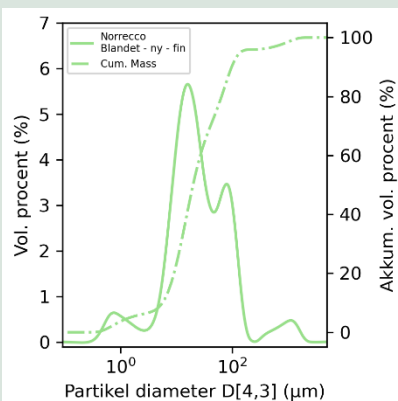
1D-partikelstørrelsesfordelinger (PSD) blev bestemt under anvendelse af et Malvern Mastersizer 2000-instrument med en Hydro S-dispersionsenhed. Prøven forberedes ved at opslæmme en udvalgt delmængde af den fulde prøve (<1 mm udvalgt med sigtetårnsanalyse) i ethanol. Selve målingen udføres ved hjælp af laserdiffraktion, og der måles partikler i størrelsesintervallet fra 0,1-2.000 μm .

Partikelstørrelsesfordelingen beregnes ud fra antagelsen om, at partiklerne er tilnærmelsesvis sfæriske. Dette kan have en afgørende effekt for målinger på fibrøse prøver, hvilket antages at være tilfældet for de mindre partikler i dette projekt, hvor større partiklers form ikke er kendt. På grund af flowretningen i målecellen vil der være en tendens til, at fibre orienterer sig med flowet. Diffraktionsmønsteret måles i det horisontale plan som ortogonal på flowet, og dermed vil fibrenes tykkelse blive overrepræsenteret i den resulterende PSD.

PSD'erne for de udvalgte prøver ses i FIGUR 30-FIGUR 31. Der observeres generelt fire karakteristiske toppe i PSD'erne for alle prøver: En top omkring 1-2 μm , 15-20 μm , 90 μm og 400-600 μm . Da dette er et delvist kollaps af en 2D-PSD, ligger der en del tolkning af resultaterne kombineret med den viden, der er opnået i projektet bag tilskrivningen af toppene til hhv. flager af knuste fibre, bredden, længden af korte fibre og store fibernetværkspartikler.



FIGUR 30. 1D-PSD'er for udvalgte prøver fra Nordic Waste. Den fuldt optrukne linje viser PSD'en, volumenprocenten, mens den prikkede/stiplede linje viser den akkumulerede masseprocent.

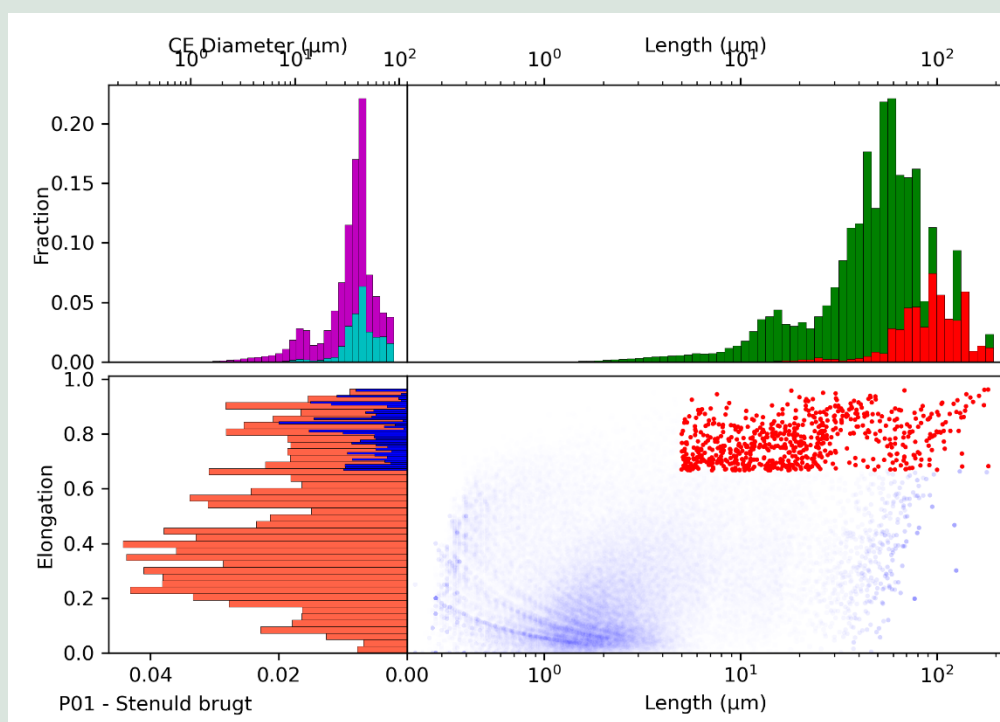


FIGUR 31. 1D-PSD'er for en udvalgt prøve fra Norrecco. Den fuldt optrukne linje viser PSD'en, volumenprocenten, mens den prikkede/stiplede linje viser den akkumulerede masseprocent.

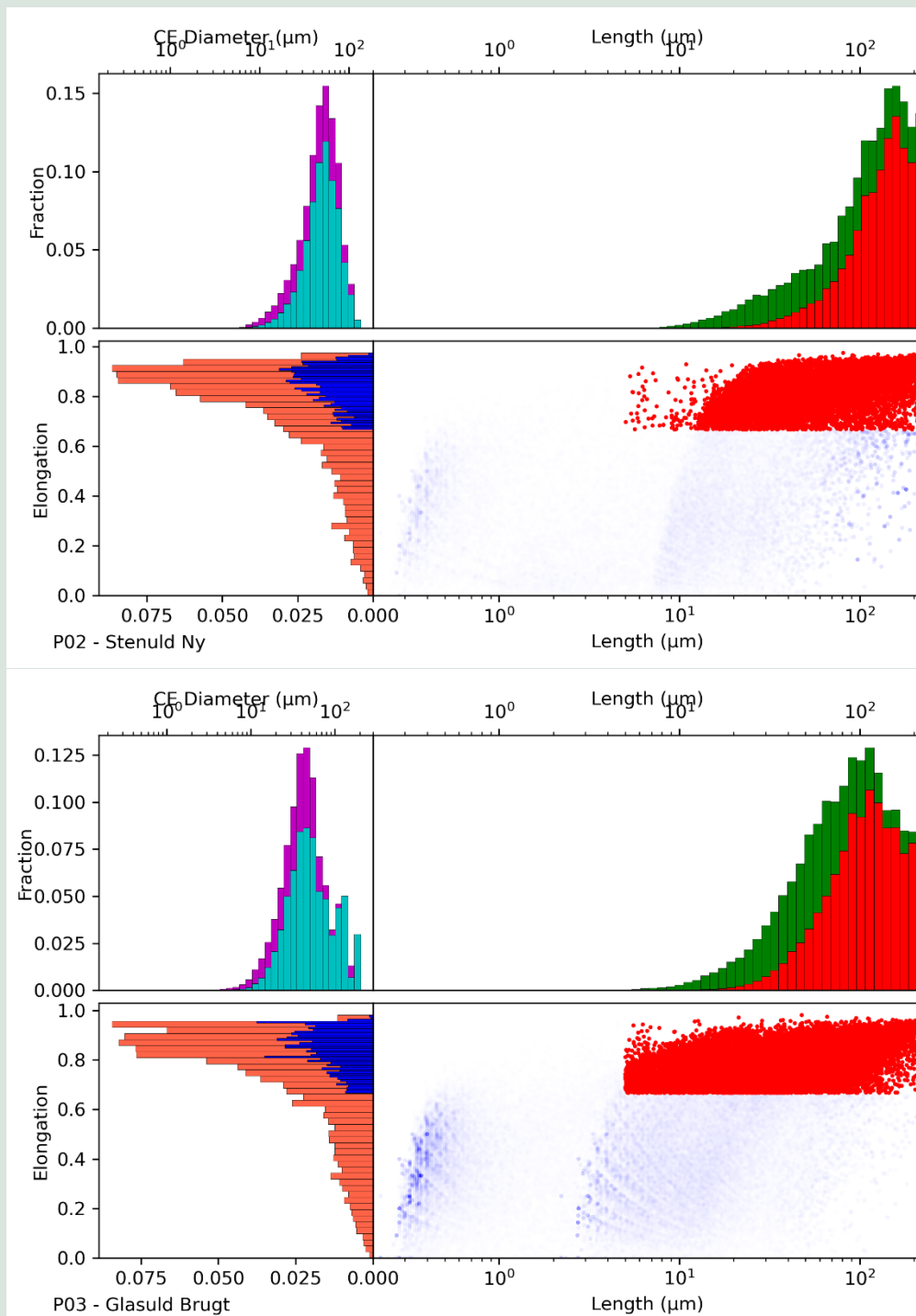
Bilag 2.4 Morfologi

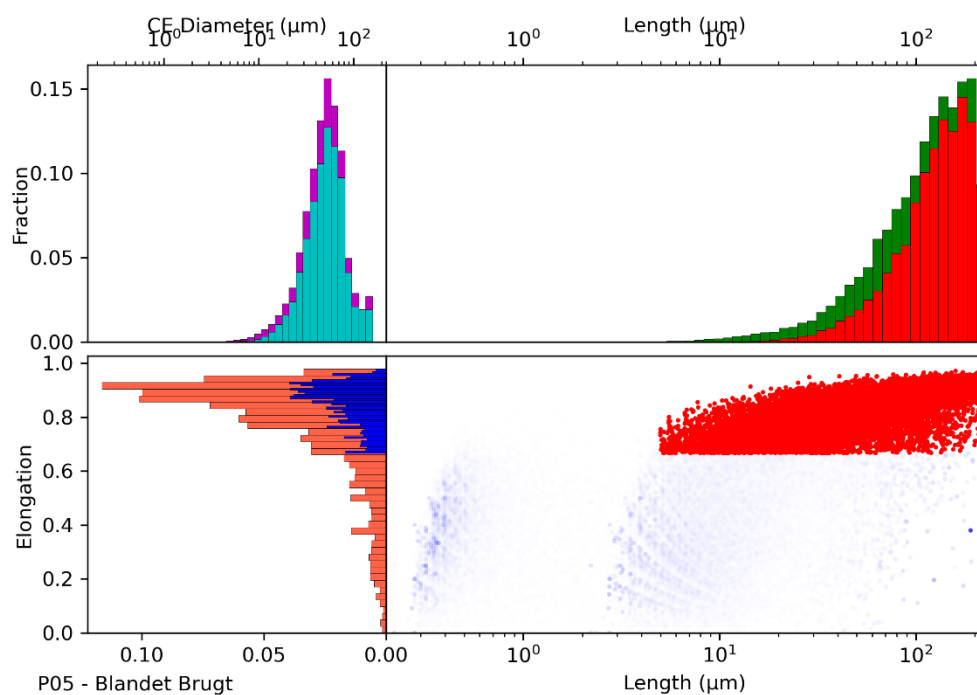
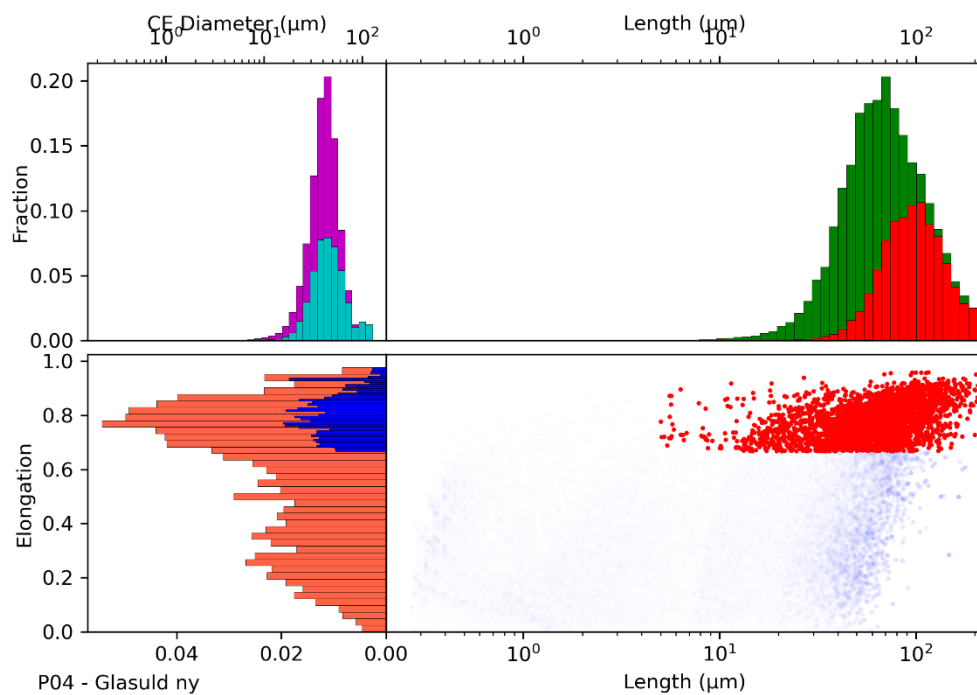
Morfologimålingerne er udført på et Malvern Morphologi G3-mikroskop med tre objektiver på hhv. 2,5x, 5x og 50x forstørrelse. Partikelstørrelserne målt med disse objektiver ligger mellem 50x: 0,5–40 μm , 5X: 6,5–420 μm og 2,5X: 13–10.000 μm . Der generelt brugt cirkulære områder med diametre på 14 mm og 40 mm for hhv. 2,5x + 5x og 50x. Prøvemængden ligger i størrelsesordenen 20 mg, som blev fordelt på en glasplade med en automatisk dispersionsenhed. Pulveret er taget fra <36 μm fraktioneret med sigtetårnsseparation for alle prøver, undtagen for Nordic Waste - Stenuld - brugt – grov, basisprøve nr. 8, hvor der ikke var nok materiale til en morfologiundersøgelse.

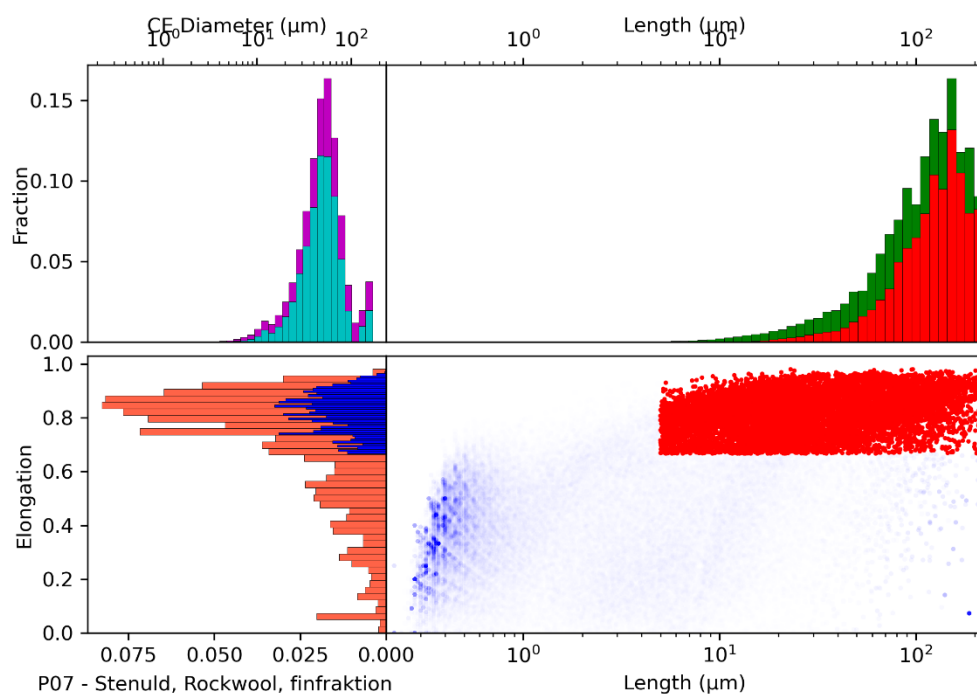
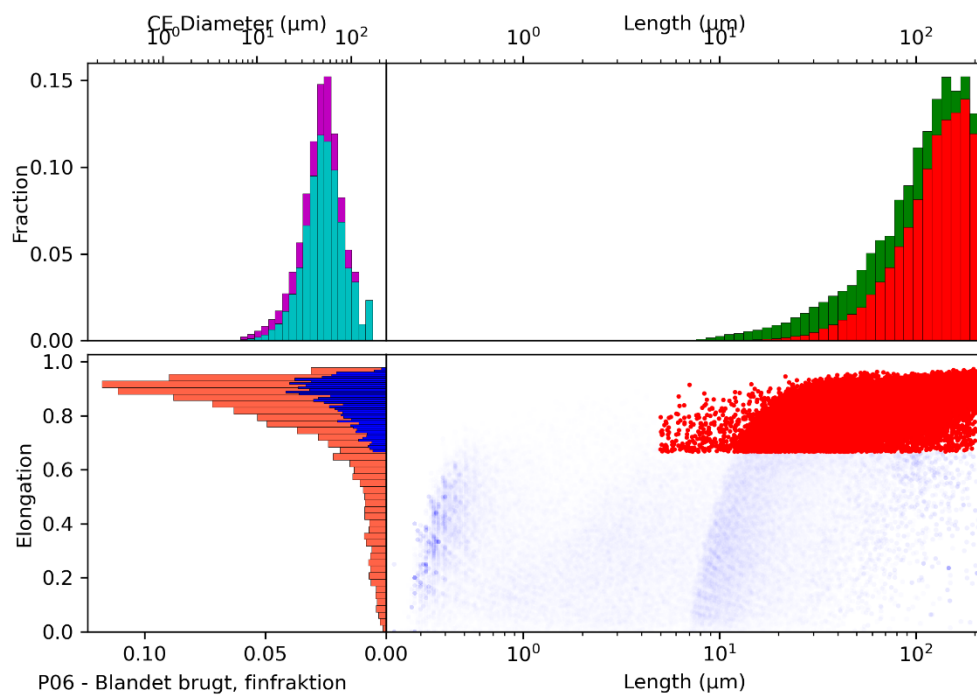
Udvalgte metrikker for hver basisprøve og en ekstra prøve, prøve 1, beskrevet i sektion 5.4.2.1, er medtaget i FIGUR 32.

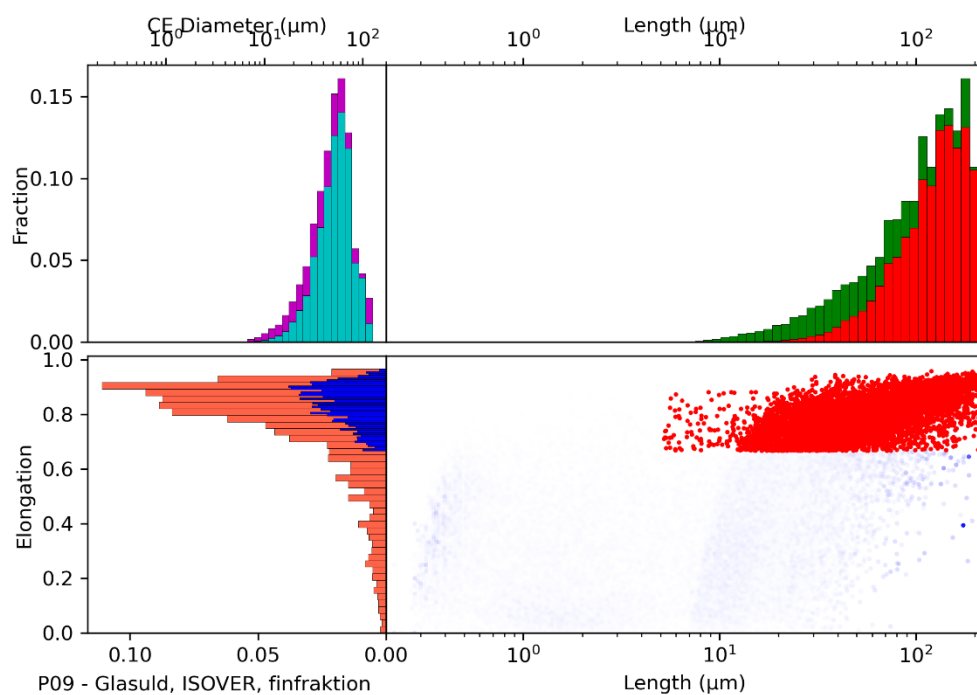
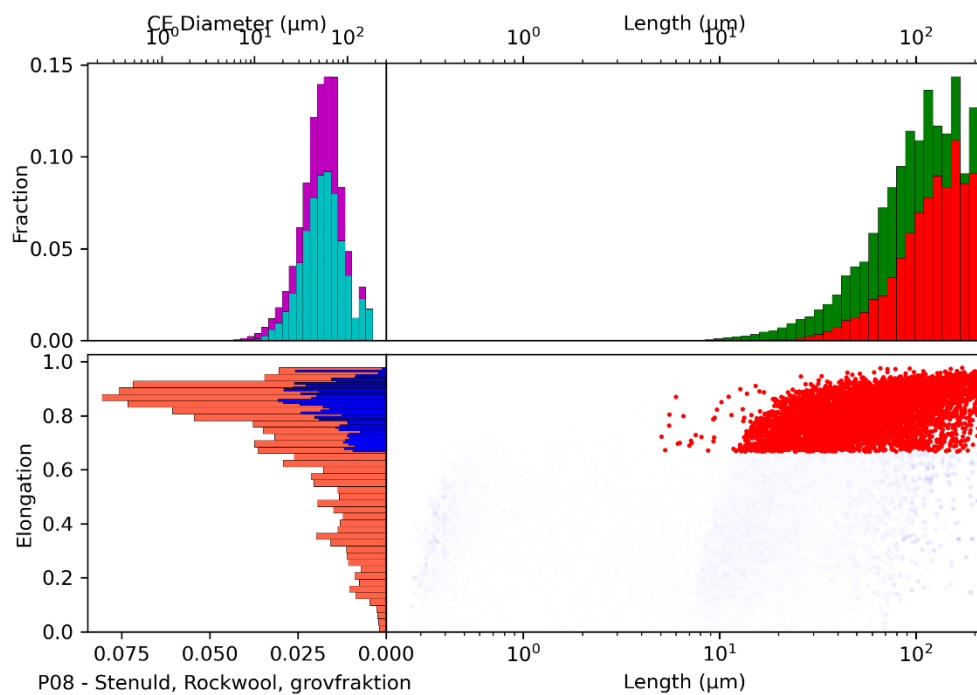


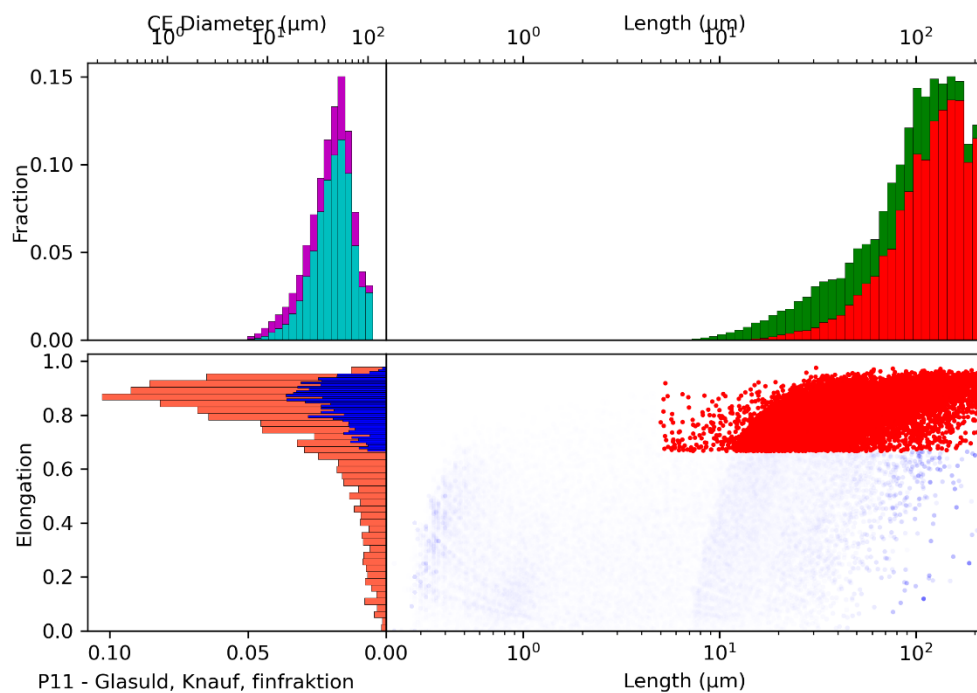
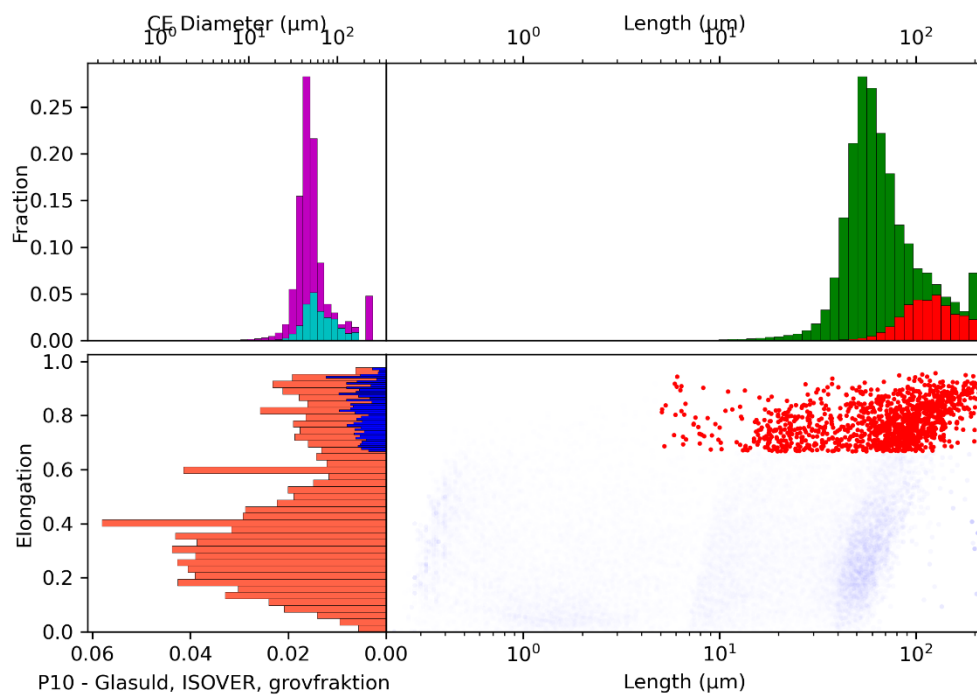
FIGUR 32. Volumenvægtet morfologidata. Figureerne viser i øverste venstre hjørne i magenta fordelingen af den cirkulær ækvivalente (CE) diameter for alle målte partikler og i cyan for de medtagne partikler, som lever op til: længde $\geq 5 \mu\text{m}$, længde:bredde-ratio på ≥ 3 . I højre øverste hjørne er det fordelingen for længden af hver partikel for hhv. alle og udvalgte i grøn og rød. I nederste venstre hjørne er det fordelingen for elongation (1- bredde/længde) af hver partikel for hhv. alle og udvalgte i rød og blå. I nederste højre hjørne er det 2D-plottet for fordelingen for elongation vs. længde af hver partikel for hhv. alle og udvalgte i blå og rød, hvor den blås gennemsnitlighed er vægtet i forhold til det CE-volumen.

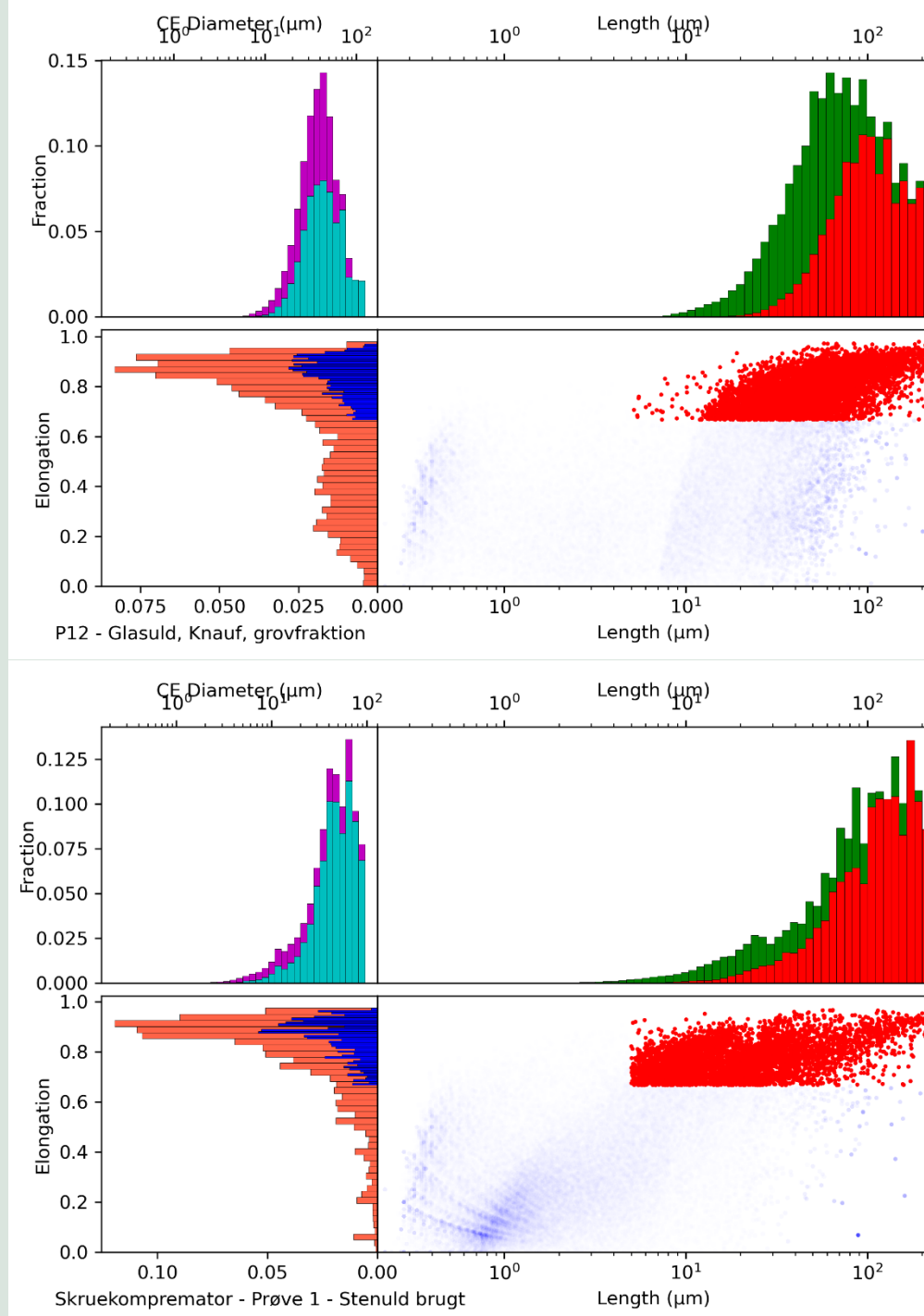












FIGUR 33. Volumenvægtet morfologidata for prøverne P02 til P12 (samt Prøve 1 fra skruekomprimator). Figureerne viser i øverste venstre hjørne i magenta fordelingen af den cirkulær ækvivalente (CE) diameter for alle målte partikler og i cyan for de medtagne partikler, som lever op til: længde ≥ 5 μm , længde:bredde-ratio på ≥ 3 . I højre øverste hjørne er det fordelingen for længden af hver partikel for hhv. alle og udvalgte i grøn og rød. I nederste venstre hjørne er det fordelingen for elongation ($1 - \text{bredde/længde}$) af hver partikel for hhv. alle og udvalgte i rød og blå. I nederste højre hjørne er det 2D-plottet for fordelingen for elongation vs. længde af hver partikel for hhv. alle og udvalgte i blå og rød, hvor den blås gennemsigtighed er vægtet i forhold til det CE-volumen.

Bilag 2.5 Analyser af mineralsammensætning

Der er udført analyser af grundstofsammensætning af glasuld før og efter 1997 med XRF ved ISOVER. Prøverne til XRF blev fremstillet ved at opløse prøverne i en dertil egnet lithiumborat-salt-flux og smeltet tre gang for at sikre homogenitet. XRF-målingen blev foretaget på et Rigaku NEX CG-røntgenfluorescerende spektrometer.

Resultatet viser (Se FIGUR 34) et lavere indhold af aluminium i prøver efter 1997 (før 4,8 %, efter 2,9 %).

Prøve	B ₂ O ₃ %	Na ₂ O %	K ₂ O %	MgO %	CaO %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	MnO %	P ₂ O ₅ %	Sulfat SO ₃ ⁻² %	TiO ₂ %
Glas før 1997 #1		15.9	1.15	0.36	7.39	4.55	0.28	61.7	0.00	0.08	0.30	0.07
Glas før 1997 #2		15.9	1.15	0.36	7.55	5.03	0.30	61.3	0.00	0.06	0.31	0.07
Glas efter 1997 #1		16.2	0.42	3.19	7.34	2.52	0.29	63.8	0.10	0.10	0.31	0.06
Glas efter 1997 #2		16.2	0.44	3.33	7.45	3.25	0.29	63.4	0.11	0.11	0.33	0.06
IARC Monogr.vol 81 2001, reference												
Range for Glasuld - fra	0.00	12.00		5.00		0.00	0.00	55.0	0.00	0.00	0.00	0.00
Range for Glasuld - til	12.00	20.50		18.00		7.00	5.00	70.0	0.00	0.00	0.50	0.50

FIGUR 34. Røntgenanalyse af grundstofsammensætning.

Bilag 2.6 Forsøg med vandmætning

Der er udført vandmætningsforsøg med en simpel metode for at kunne foretage en indledende evaluering af, hvor meget prøverne suger vand i forhold til det sand, som NCC benytter i fremstilling af asfalt. NCC benytter en særlig laboratoriemetode til at bestemme fugtoptag af materialer.

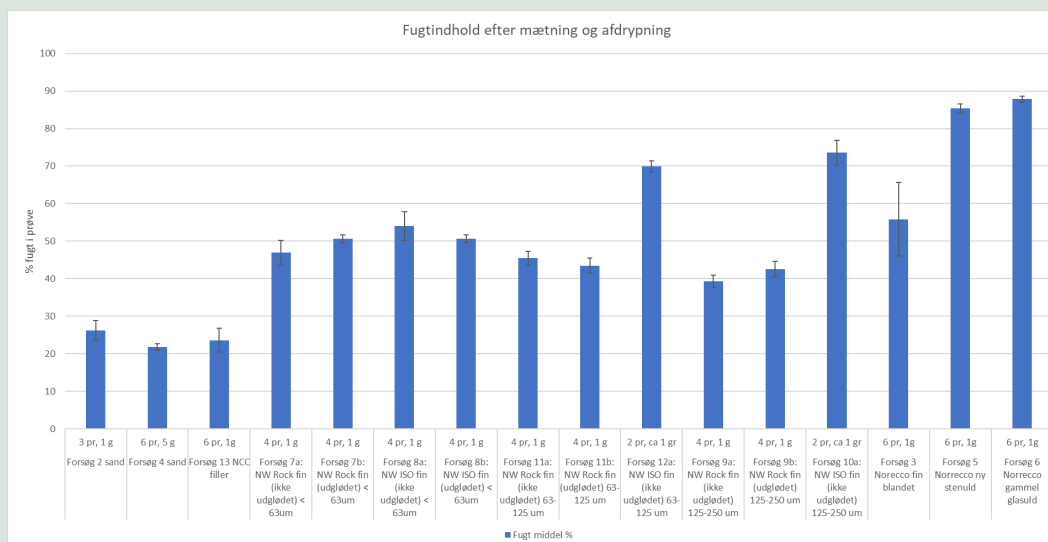
Fremgangsmåden for forsøgene:

1. Afvej prøve (mineraluld eller sand)
2. Opslæm prøverne med demivand
3. Væd filtre i tragt med demivand
 1. Lad det dryppe helt af og dup med papir for at få evt. dråbe i bunden væk
4. Vej tragt med vådt filter og noter vægt
5. Hæld opslæmmet prøve i tragten. Sørg for at alt bliver dækket med vand
6. Lad det dryppe helt af
7. Vej tragt med våd prøve og noter

TABEL 18. Vandmætningsforsøgsresultater. Prøverne er inddelt i kornstørrelsesintervallet fra sigtetårnsanalyse. Sigtetårnsanalysen er lavet med følgende sigteintervaller: >63 µm, 63-125 µm, 125-250 µm.

Forsøg	Sigtetørrelse	Beskrivelse
Forsøg 2 sand	0-2 mm (Reference)	3 prøver, 1 g
Forsøg 4 sand	0-2 mm (Reference)	6 prøver, 5 g
Forsøg 13 filler fra NCC	Jf. 4.1 (Reference)	6 prøver, 1g
Forsøg 7a: NW Rock fin (ikke udglødet)	<63 µm	4 prøver, 1 g
Forsøg 7b: NW Rock fin (udglødet)	<63 µm	4 prøver, 1 g
Forsøg 8a: NW ISO fin (ikke udglødet)	<63 µm	4 prøver, 1 g
Forsøg 8b: NW ISO fin (udglødet)	<63 µm	4 prøver, 1 g
Forsøg 11a: NW Rock fin (ikke udglødet)	63-125 µm	4 prøver, 1 g
Forsøg 11b: NW Rock fin (udglødet)	63-125 µm	4 prøver, 1 g

Forsøg	Sigtestørrelse	Beskrivelse
Forsøg 12a: NW ISO fin (ikke udglødet)	63-125 µm	2 prøver, ca. 1 gr
Forsøg 9a: NW Rock fin (ikke udglødet)	125-250 µm	4 prøver, 1 g
Forsøg 9b: NW Rock fin (udglødet)	125-250 µm	4 prøver, 1 g
Forsøg 10a: NW ISO fin (ikke udglødet)	125-250 µm	2 prøver, ca. 1 gr
Forsøg 3 Norecco fin blandet	Ikke-sigtet	6 prøver, 1g
Forsøg 5 Norrecco ny stenuld	Ikke-sigtet	6 prøver, 1g
Forsøg 6 Norrecco gammel glasuld	Ikke-sigtet	6 prøver, 1g



FIGUR 35. Procentvis forøgelse i vægt for prøven efter vandoptag.

Foreløbige konklusioner vedrørende anvendelse ved NCC er:

- Materialerne holder på ca. den dobbelte mængde fugt som sand gør for selv meget finpartikulært materiale, men dette er dog meget mindre end for de grove fraktioner.

Bilag 2.7 Bestemmelse af binderindhold med termogravimetrisk analyse

Der er udført TGA-analyser på tre prøver, hvor der bestemmes et vægttab, som er sammenligneligt med glødetabsanalyser. Analysen viser, at der først opstår et væsentligt vægttab, når materialet opvarmes til over 120 °C. Vægttabet fra 120-600 °C forventes at stamme fra nedbrydning af det organiske materiale i form af binder samt indhold af forureningsrester af organisk materiale (plast/papir m.m.).

	Vægttab %, luft (50-120°C)	Vægttab %, luft (120-600°C)	Uorganisk rest
Stenuld brugt	Ca. 0,1	5,0	94,9
Isover	Ca. 0,1	6,0	93,9
Knauf	Ca. 0,2	7,0	92,8

FIGUR 36. Resultater af termogravimetrisk analyse af hhv. stenuld, Isover glasuld og Knauf glasuld.

Udvikling af oparbejdningsteknologier og genanvendelsesløsninger til mineraluld

Projektet "Udvikling af oparbejdningsteknologi og genanvendelsesløsninger for mineraluld" havde til formål at udvikle en teknologi der muliggør etablering af nye robuste og veldokumenterede genanvendelsesløsninger, så mineraluld kan neddeles, omklassificeres og genanvendes uden miljø- eller sundhedsmæssig risiko.

Gennem projektet blev der udviklet og analyseret neddelte mineraluldsfraktioner til brug i fremstilling af asfalt, teglproduktion eller nye glasuldsprodukter uden at forringe muligheden for senere at genanvende disse.

En vigtig forudsætning har været for at mineraluld kan genanvendes, er at de oparbejdes kvaliteter imødekommer krav til specifikke anvendelser. En anden vigtig forudsætning i projektet viste sig at være omklassificering af affald fra mineraluld produceret før 1997 fra farligt affald til ikke-farligt affald.

I projektet er muligheden for omklassificering i affaldshåndteringsleddet blevet belyst, her blev det fundet at oplysningerne af CLP-forordningens Note Q eller alternativ Note R er afgørende for berettigelse af en mulig om-klassificering.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk