



Murværksundersøgelser Mårup Kirke

Udført af kemiingeniør Helge Hansen, geolog Helle Dam Andersen,
bygningsingeniør Erik Kjær

Århus, den 24. marts 2010

Sag nr.: 1316346-15/284243

*Resultatet af undersøgelsen må kun gengives i sin helhed.
I uddrag kun efter Teknologisk Instituts godkendelse.*



MURVÆRKSUNDERSØGELSER MÅRUP KIRKE

Indledning

I forbindelse med nedtagning af murværk på Mårup Kirke har Teknologisk Institut, Murværk og Byggekomponenter udtaget en række murværksprøver og foretaget analyser af disse.

I første omgang er der primært tale om mørtelprøver. Hvor intet andet er oplyst er der i det følgende tale om mørtelprøver.

Prøveudtagning

Prøveudtagningen blev foretaget 23. september 2008 af kemiingeniør Helge Hansen og bygningsingeniør Erik Kjær, Teknologisk Institut, Murværk og Byggekomponenter i samarbejde med Thomas Berthelsen, Nationalmuseet.

Positionerne for prøveudtag er vist på plantegningen i bilag 1 samt fotos i bilag 2.

Følgende prøver blev udtaget:

Tabel 1

Nr.	Placering	Materiale	Alder*	Foto i bilag 2
A	Kor, nordvæg, indvendig	Pudsmørtel	1200	1
B	Kor, nordvæg	Muremørtel i indermur mellem natursten	1200	2
C	Skib, nordvæg, østvange af norddør	Muremørtel i hulmur mellem natursten	1200	3 og 4
D	Skib, lukkemur i norddør	Muremørtel mellem røde teglsten	1600	3 og 5
E	Skib, vestfals i norddør	Muremørtel mellem røde teglsten	1200	6 og 7
F	Skib, vestmur over bue	Muremørtel mellem røde teglsten	1500	8
G	Skib, vestmur over bue	Muremørtel mellem røde teglsten	1700	
G	Skib, vestmur over bue	Rødt forvitret teglmateriale	1700	

*Foreløbige aldersangivelser

Visuel bedømmelse

Før igangsættelse af analyser blev prøverne bedømt visuelt. Resultaterne er vist i følgende tabel.

Tabel 2. Visuel bedømmelse

Prøve	Farve	Styrke	Struktur
A	Hvidlig	Lav/middel	Områder med ren hvid kalk Indhold af trækul, stykker på op til 10 mm
B	Let brunlig	God	Små områder med ren kalk Ingen trækul
C	Hvidlig	Svag	Indhold af flade, vandrullede, glatte natursten som tages fra inden analyser Glatte, formentlig oprindelige overflader, der er let sværtede
D	Hvidlig/brunlig	Høj	Mørtelklatter fra murens bagside Homogent materiale
E	-	-	Udskrabet materiale som ikke kan karakteriseres visuelt
F	Hvidlig	Vарierende fra svag til høj	Små områder med ren hvid kalk
G	Hvidlig/grålig	Høj	Homogen
G Teglmateriale	Rødt	-	Flækker i en uregelmæssig struktur parallelt med liggeflader Brændingstemperatur bedømt ud fra skærvfarve under 1000 °C

Bindemiddelindhold i mørtel

Metode

Repræsentative dele af mørtelprøverne blev tørret til konstant vægt og formalet til de kunne passere en 0,25 mm sigte.

Af hver prøve blev 2 analyseprøver på 5 g afvejet til bestemmelse af kalkindhold og 2 analyseprøver på 5 g til bestemmelse af indhold af opløselig SiO₂ (silica).

Metoden anvendes rutinemæssigt af Teknologisk Institut, Murværk og Byggekomponenter til bestemmelse af bindemiddelindhold i mørtler, typisk af ældre mørtler i renoveringssager og af ny mørtler i skadessager.

Analyseresultater

Resultaterne er vist i følgende tabel 3:

Tabel 3

Prøve	Ikke hærdnet kalkindhold vægt% Ca(OH) ₂	Totalt kalkindhold vægt% Ca(OH) ₂	Indhold af opløselig SiO ₂ vægt% SiO ₂
A	0,4	35,7	0,69
B	0,5	29,7	0,44
C	0,6	37,4	0,66
D	0,6	36,5	0,32
E	0,6	42,5	0,49
F	0,6	25,5	0,46
G	0,9	27,5	1,82

Beregning af sammensætning

Ved beregning af mørtlernes sammensætning er anvendt de fundne indhold af totalt kalk og opløselig SiO₂, samt følgende to sæt forudsætninger:

Rene kalkmørtler

- Der er anvendt kalk og sand.
- Mørtlerne kan være fremstillet enten som læskemørtler eller som kulekalkmørtler.
- Sandet har ikke indeholdt kalkkorn, jfr. afsnit om tilslagsmaterialer.
- Indhold af opløselig SiO₂ kan være fremkommet ved puzzolan reaktion mellem uhærdnet kalk og tilslagsmaterialet.
- Indhold af opløselig SiO₂ kan stamme fra et naturligt indhold af lerminerale i kalkstenen. Dette indhold har under kalkbrændingen reageret med calciumoxid og dannet et materiale med hydrauliske egenskaber.

Med disse forudsætninger kan følgende sammensætninger beregnes:

Tabel 4

Prøve	Kalk vægt%	Sand vægt%	Blandingsforhold
A	40,8	59,2	K 100/145
B	33,1	66,9	K 100/202
C	42,9	57,1	K 100/133
D	41,7	58,3	K 100/140
E	49,9	50,1	K 100/101
F	27,9	72,1	K 100/230
G	30,3	69,7	K 100/230

Med hydraulisk bindemiddel

- Der er indhold af hydraulisk bindemiddel, kalk og sand.
- Det hydrauliske bindemiddel indeholder 21,5 vægt% opløselig SiO₂ og 65,0 vægt% CaO. Tallene svarer til traditionel Portlandcement.
- Sandet har ikke indeholdt kalkkorn.
- De dele af mørtlen, der ikke er hydraulisk bindemiddel, indeholder 0,1 vægt% opløselig SiO₂.

Med disse forudsætninger kan følgende sammensætninger beregnes.

Tabel 5

Prøve	Kalk vægt%	Hydraulisk bindemiddel vægt%	Sand vægt%	Blandingsforhold
A	38,4	2,8	58,8	KC/KK _h 93/7/143
B	31,7	1,6	66,7	KC/KK _h 95/5/200
C	40,6	2,6	56,7	KC/KK _h 94/6/131
D	40,8	1,0	58,1	KC/KK _h 98/2/139
E	48,3	1,8	49,8	KC/KK _h 96/4/100
F	26,5	1,7	71,8	KC/KK _h 94/6/255
G	23,3	8,2	68,5	KC/KK _h 74/26/218

Kommentarer

Resultaterne viser, at der er tale om rene kalkmørtler. Kalkindholdene er så høje, at mørtlerne kun kan være fremstillet som læskemørtler - den teknologi der har været dominerende indtil ca. 1800.

Det underbygges af, at nogle prøver indeholder faser af ren hvid kalk (se tabel 2). Der er tale om brændt kalk, der ikke er blevet findelt og læsket normalt.

Prøve G skiller sig ud ved at have et vist indhold af opløselig SiO_2 , og dermed hydraulisk eller puzzolant materiale. Flere årsager kan tænkes:

- Der er påvist et indhold af rødt tegl jfr. karakterisering af tilslagsmaterialer nedenfor. Knust tegl kan være tilsat kalkmørtler for at opnå en puzzolan effekt og dermed større styrke.
- Der kan være tale om en anden kalktype. På det aktuelle tidspunkt – ca. 1800 hentes der kalk i Norge med skudehandelen. Der er dog på ingen måde tale om en egentlig hydraulisk mørtel som f.eks. den samtidige bornholmske cement.

Tilslagsmaterialer

Kornstørrelsesfordeling

Metode

I repræsentative dele af mørtelprøverne blev bindemidlerne dekomponeret, hvorefter kornstørrelsesfordelingen i de isolerede tilslagsmaterialer blev bestemt ved sigtning.

Resultaterne er vist i tabel og diagrammer i bilag 4. I diagrammerne er desuden vist de nugældende grænsekurver for normmørtelsand.

For prøve E tillod den beskedne prøvemængde ikke bestemmelsen.

Karakterisering

Metode

De isolerede tilslagsmaterialer blev undersøgt med stereomikroskop med måleokkular. Resultaterne er vist i følgende tabel:

Tabel 6. Karakterisering af tilslagsmaterialer

Prøve	Karakterisering
A	Stort set kun strandsandsfraktion bestående af afrundede kvartskorn svarende til strandsand
B	Overvejende strandsandsfraktion bestående af afrundede kvartskorn En del sammenkittede blanke kvartskorn En del små sorte korn
C	Overvejende strandsandsfraktion bestående af afrundede kvartskorn En del større helt hvide afrundede eller uregelmæssige korn, evt. flint
D	Meget lidt finfraktion Stor strandsandsfraktion bestående af afrundede kvartskorn En del grovfraktion – feldspat mm Ingen helt store korn
E	Ikke undersøgt – for lille prøvemængde
F	Meget lidt finfraktion Afrundede kvartskorn i strandsandsfraktion En del grovfraktion – feldspat mm Enkelte korn over 1 cm Brudstykke af gulbrændt tegl
G	Stor finfraktion Strandsandsfraktion bestående af afrundede kvartskorn En del små sorte korn En del grovfraktion – feldspat mm Indhold af rødt tegl – til dels afrundede korn

Kommentarer

Der ses en meget klar opdeling i to sandtyper:

Prøverne A, B og C har en meget stejl kornstørrelsesfordeling, hvor den dominerende fraktion ligger på 0,25 og 0,5 mm. I nutidige mørtler betegnes en sådan sandtype som strandsand, men vil overvejende være udvundet som søsand. En sådan ensartet kornstørrelsesfordeling giver relativt dårlig mørtelstyrke, jfr. de indtegnede grænsekurver for normmørtelsand. Det bemærkes, at netop disse tre mørtelprøver er fra den tidligste byggefase. Bedømt ud fra afstand til havet på dette tidspunkt er der formentlig snarere tale om klitsand end strandsand.

Prøverne D, F og G har en graderet kornstørrelsesfordeling som falder inden for grænsekurverne. Det vil give relativt større mørtelstyrker. Det bemærkes, at disse tre mørtelprøver er fra senere byggefaser.

Densitet

Metode

Densitet af mørtelstykker blev bestemt efter princippet i DS 438.13:

- Vejning i tør tilstand
- Et døgn vandlagring – halvt dækket
- Et døgn vandlagring – helt dækket
- Vejning under og over vand

Fra hver prøve blev 3-4 mørtelstykker undersøgt. For prøve E tillod prøvemængderne ikke bestemmelsen.

Resultater

Resultaterne er vist i følgende tabel:

Tabel 7. Densitet af mørtel, kg/m³

Prøve	1. best.	2. best.	3. best.	4. best.	Gennemsnit
A	1493	1457	1424	1414	1445
B	1506	1598 (smuldrer)	1543	1551	1549
C	1240	1114	1255	-	1203
D	1791	1753	1798	-	1781
F	1514	1475	1745	-	1578
G	1479	1426	1467	-	1457

Kommentarer

Det ses, at der er endog meget store forskelle på densiteterne.

Specielt bemærkes en meget lav densitet i prøve C - mørtel mellem natursten i hulmur. Forklaringen er formentlig, at denne mørtel ved anvendelsen har haft et meget højt vandindhold, så den nærmest har kunnet hældes ned mellem naturstenene inderst i muren. Dette vand har efterladt store hulrum, hvorved densiteten bliver meget lav.

Ved sammenligning med erfaringstal ses, at alle mørtlerne har lavere densiteter end det man finder for kalkcementmørtler eller hydrauliske kalkmørtler (Renoveringshåndbogen s. 57).

Saltindhold

Metode

Da saltindholdet i murværket overvejende kan forventes at bestå af natriumchlorid (bl.a. havsalt) er der udelukkende foretaget bestemmelse af chloridindhold.

Metoden er ekstraktion i demineraliseret vand efterfulgt af potentiometrisk titrering.

Resultater

Resultaterne er ligeledes vist i den akkrediterede rapport samt i følgende tabel, hvor der også er foretaget en beregning af de tilsvarende indhold af natriumchlorid.

Tabel 8. Saltindhold

Prøve	Chloridindhold vægt% Cl ⁻	Natriumchloridindhold vægt% NaCl
A	1,02	1,67
B	1,32	2,18
C	0,50	0,79
D	0,59	0,96
E	2,03	3,35
F	0,28	0,46
G, forvitret rødt tegl	0,11	0,18
G, mørtel	0,33	0,55

Kommentarer

Der er i murværkssammenhæng tale om høje saltindhold, nogle endog særdeles høje.

Der er muligvis tendens til, at de mindste saltindhold findes i de yngste prøver samt inderst i det oprindelige murværk.

Saltindholdene synes ikke at have medført nogen væsentlig forvitring eller svækkelse af mørtelmaterialeerne. Derimod kan forvitring af rødt tegl skyldes natriumchlorid.

Polarisationsmikroskopi

Metode

Til den petrografiske analyse er der fremstillet tyndslib med tilsætning af fluorescerende farvestof i epoxyen. Til vurdering af tyndslib er anvendt et polarisationsmikroskop med UV-filter.

Resultater

Resultaterne er sammenfattet i tabel 9.

Tabel 9. Resultat af polarisationsmikroskopisk undersøgelse

	A, B og C	D og F	G
<p>Binder</p> <ul style="list-style-type: none"> - type - porøsitet - revner - kalkklumper - binder/aggregat-forhold 	<p>Bindemidlet består af kalk. Der ses et højt binder/aggregat-forhold. Samtidig ses mange kalkklumper i binderdelen. Der er altså tale om læskemørtler. I B ses en del mørkt, opakt materiale som sandsynligvis er organisk.</p> <p>I A og C ses fine sfæriske luftporer. Der ses desuden en del svindrevner i binderen. I prøve B er porerne mere irregulære i formen.</p>	<p>Bindemidlet består af kalk. Der ses et højt binder/aggregat-forhold. Samtidig ses mange kalkklumper i binderdelen. Der er altså tale om læskemørtler. I D ses en del mørkt, opakt materiale som sandsynligvis er organisk.</p> <p>I D og F ses fine sfæriske luftporer vel fordelt i binderen.</p> <p>I D ses forholdsvis mange svindrevner.</p>	<p>Bindemidlet består af kalk. Der ses et højt binder/aggregat-forhold. Samtidig ses mange kalkklumper i binderdelen. Der er altså tale om læskemørtler. I G ses en del mørkt, opakt materiale som sandsynligvis er organisk.</p> <p>I G ses relativt få sfæriske luftporer vel fordelt i binderen.</p> <p>Der ses forholdsvis mange svindrevner. I disse ses rekrystalliseret calcit. I pore-rum ses krystalliseret Ca(OH)_2.</p>
<p>Tilslag</p> <ul style="list-style-type: none"> - type - kornstørrelsesfordeling 	<p>Tilslaget består hovedsagelig af kvarts, derudover ses meget små mængder af feldspat, kalksten samt sort organisk materiale. Tilslaget er meget velsorteret med hovedvægt på fint tilslag. Kun meget få større korn. I prøve A er disse større korn fortrinsvis kalksten.</p>	<p>Tilslaget består hovedsagelig af kvarts, derudover ses feldspat, flint, bjergartsfragmenter og kalk. I F ses desuden en del organisk materiale muligvis planterester. Tilslaget er velgraderet.</p> <p>I D ses en del meget små kalkkorn i pastadelen, som muligvis kan være tilsat som en del af tilslagsmaterialet.</p>	<p>Tilslaget består hovedsagelig af kvarts, derudover ses feldspat, flint og kalk.</p> <p>Tilslaget er velgraderet.</p>

I bilag 3 ses mikroskopibilleder af mørtelprøverne.

Kommentarer

Alle de undersøgte mørtelprøver er blandet som læskemørtler. Dette ses ved det høje binder/aggregatforhold samt rester i binderen af kalksten, som ikke har været læsket. Prøverne A, B og C, som alle er fra kirkens oprindelse, er karakteristiske ved at indeholde finkornet, meget velsorteret tilslagsmateriale. De senere mørtler er mere velgraderede.

I flere af mørtlerne ses en del organisk materiale enten som meget finkornet materiale eller mm store stykker.

Århus, den 24. marts 2010
Teknologisk Institut, Murværk og Byggekomponenter

Helge Hansen

Dir. tlf.: 72 20 38 27
E-mail: hlh@teknologisk.dk

Helle Dam Andersen

Dir. tlf.: 72 20 38 31
E-mail: heda@teknologisk.dk

Erik Kjær

Dir. tlf.: 72 20 38 17
E-mail: ehk@teknologisk.dk

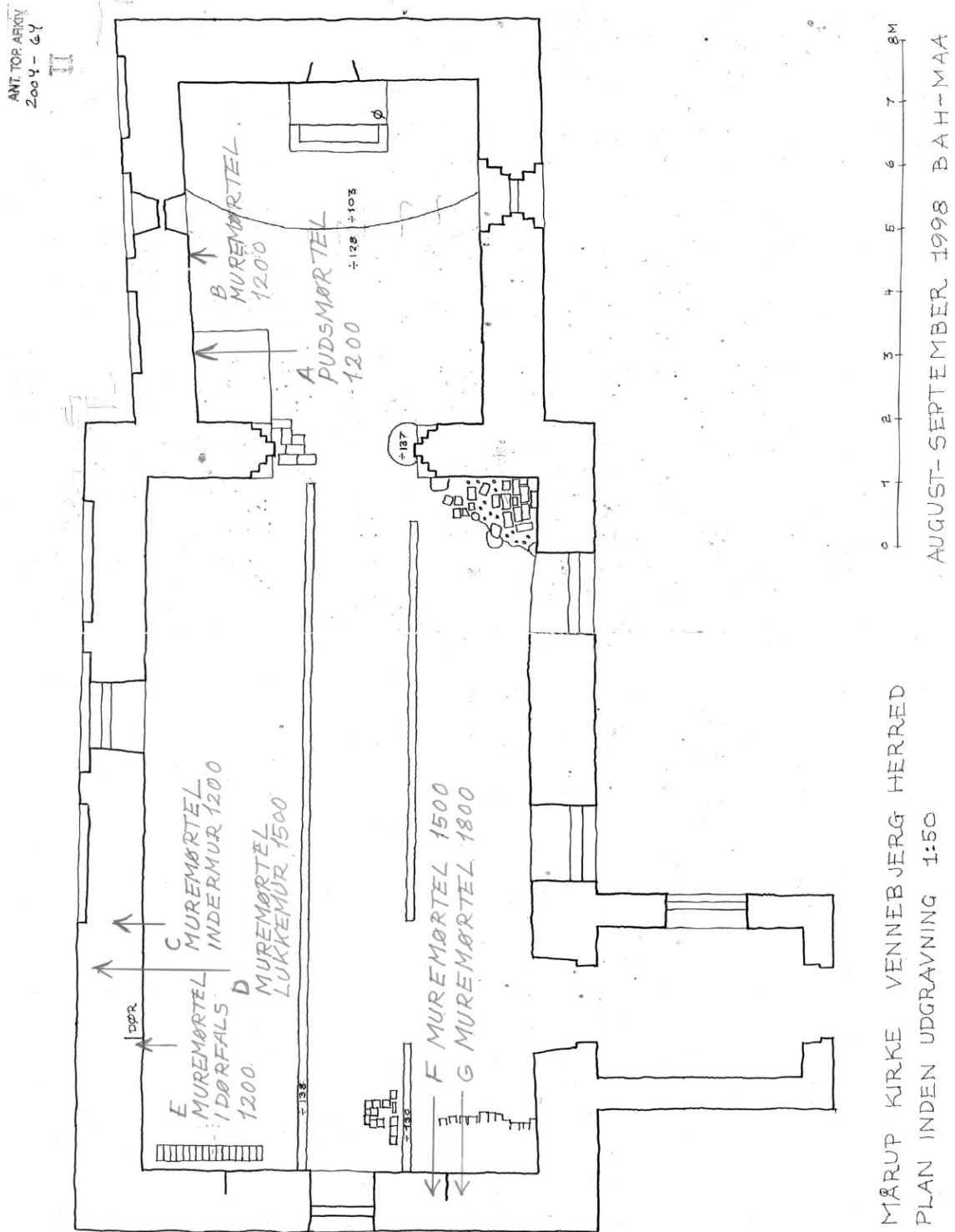




Fig. 1. Kor nordvæg. Prøve A, puds



Fig. 2. Kor nordvæg. Prøve B, muremørtel

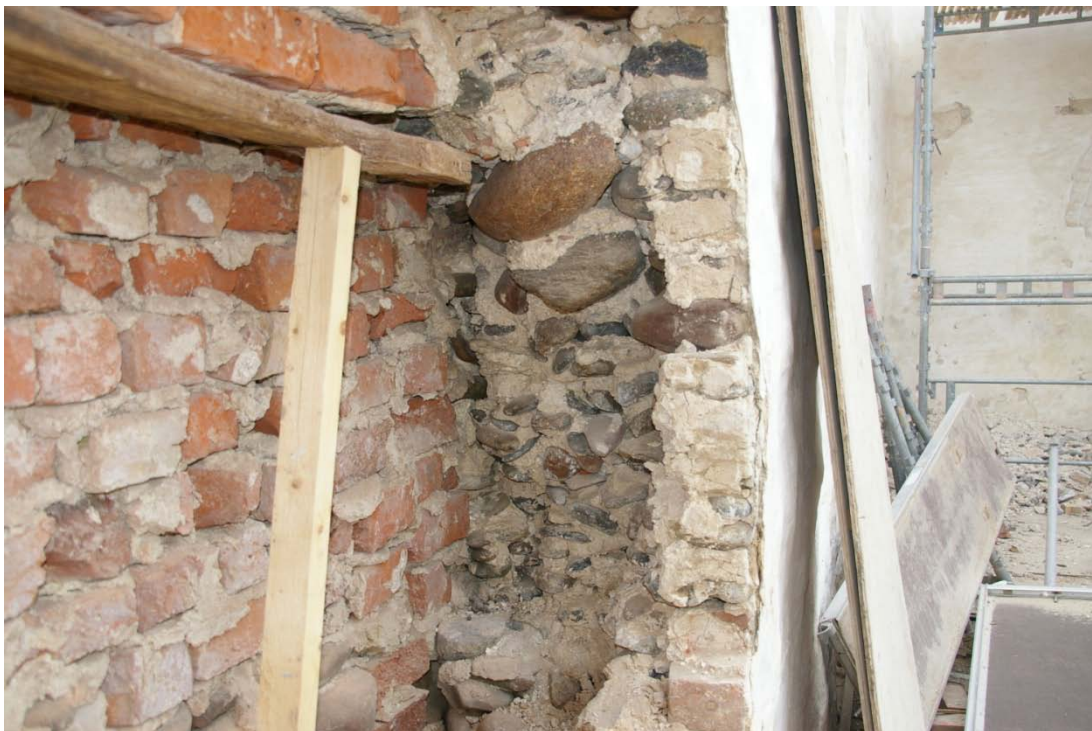


Fig. 3. Skib nordvæg. Prøve C og D



Fig. 4. Skib nordvæg. Prøve C, muremørtel indermur



Fig. 5. Skib nordvæg. Prøve D, muremørtel lukkemur



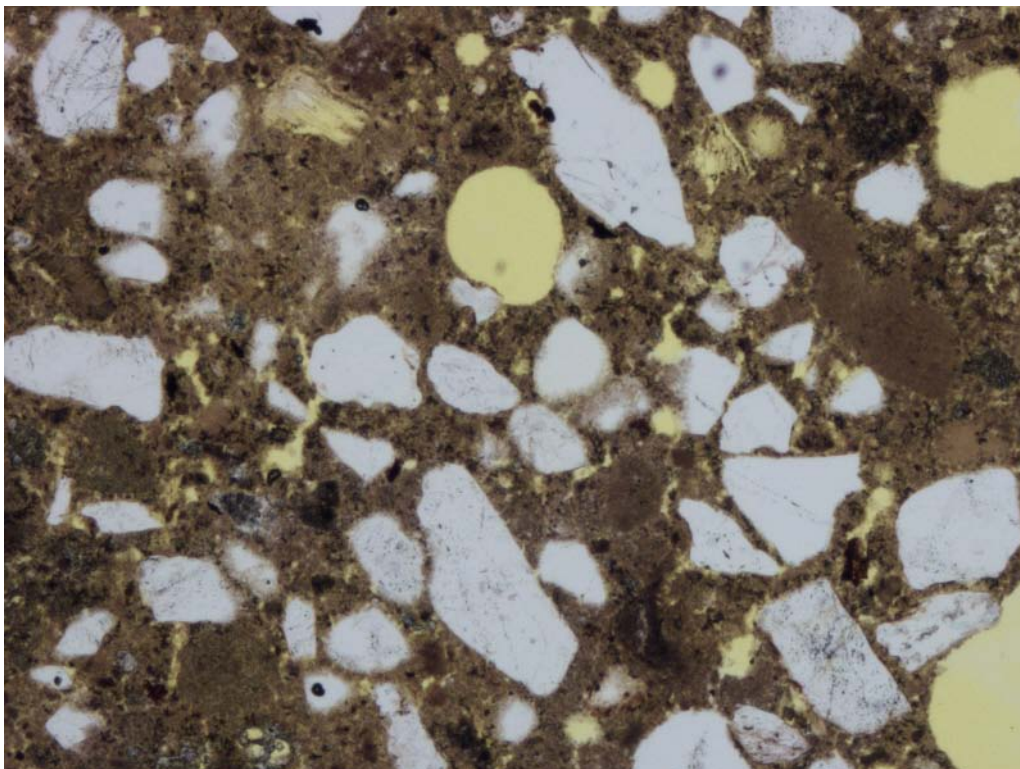
Fig. 6. Skib nordvæg. Prøve E, muremørtel dørfals



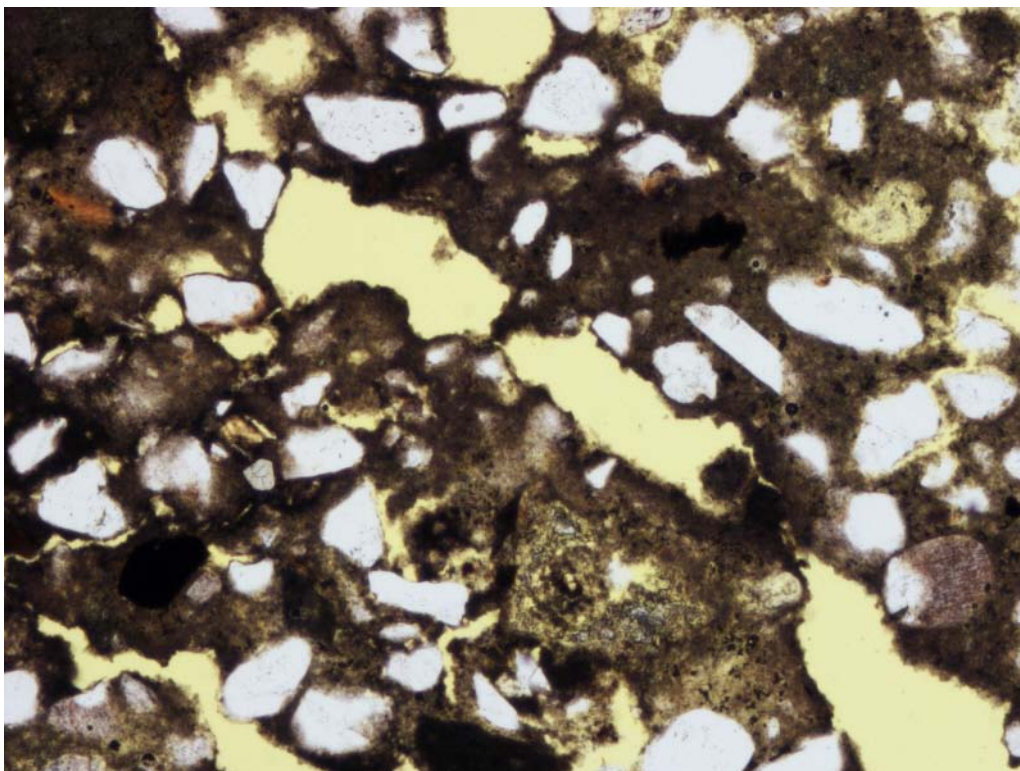
Fig. 7. Skib nordvæg. Prøve E, muremørtel dørfals



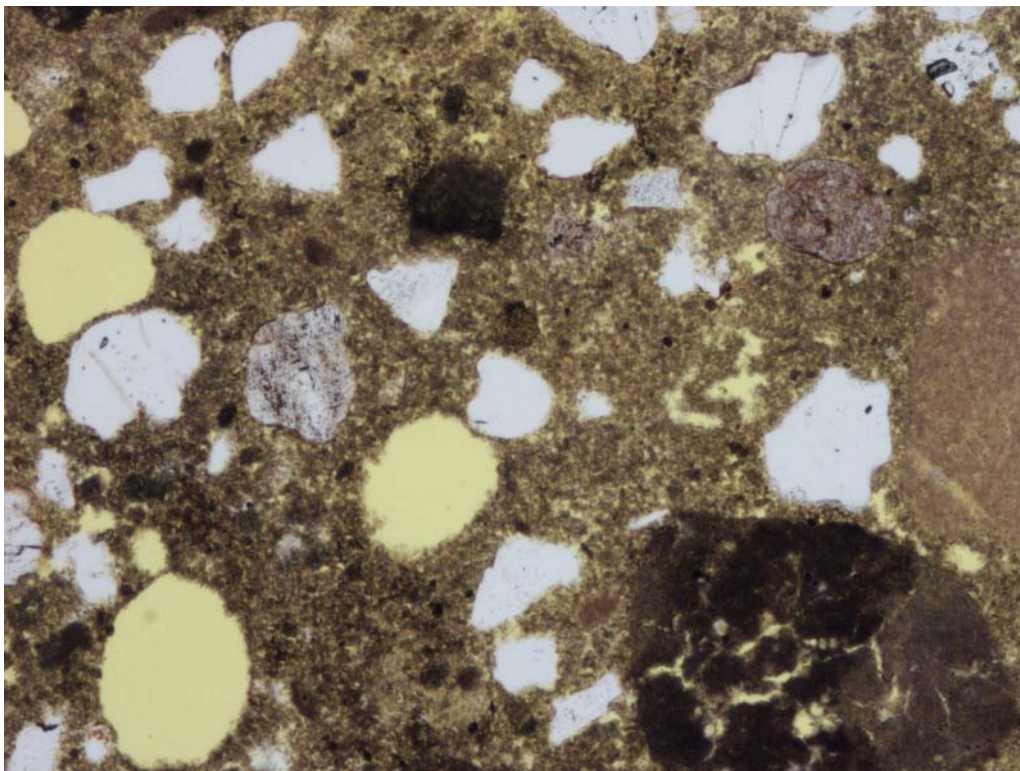
Fig. 8. Skib vestmur. Prøve F, muremørtel over tårnbue



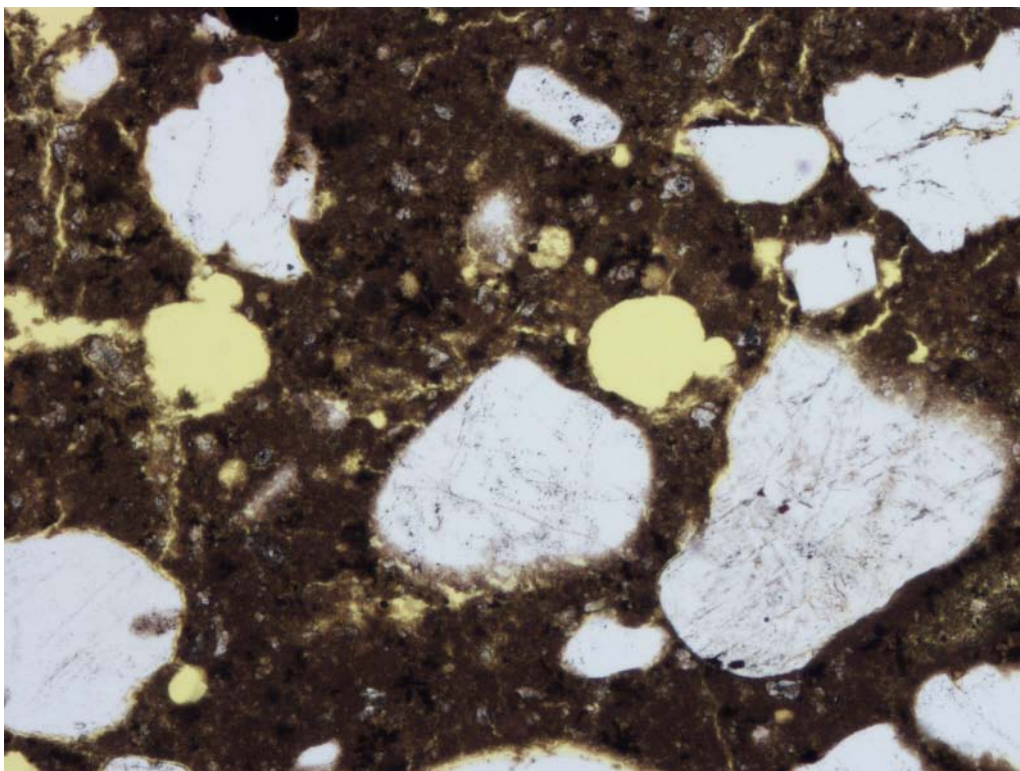
Figur 9. Prøve A. Billedbredden er 2,5mm



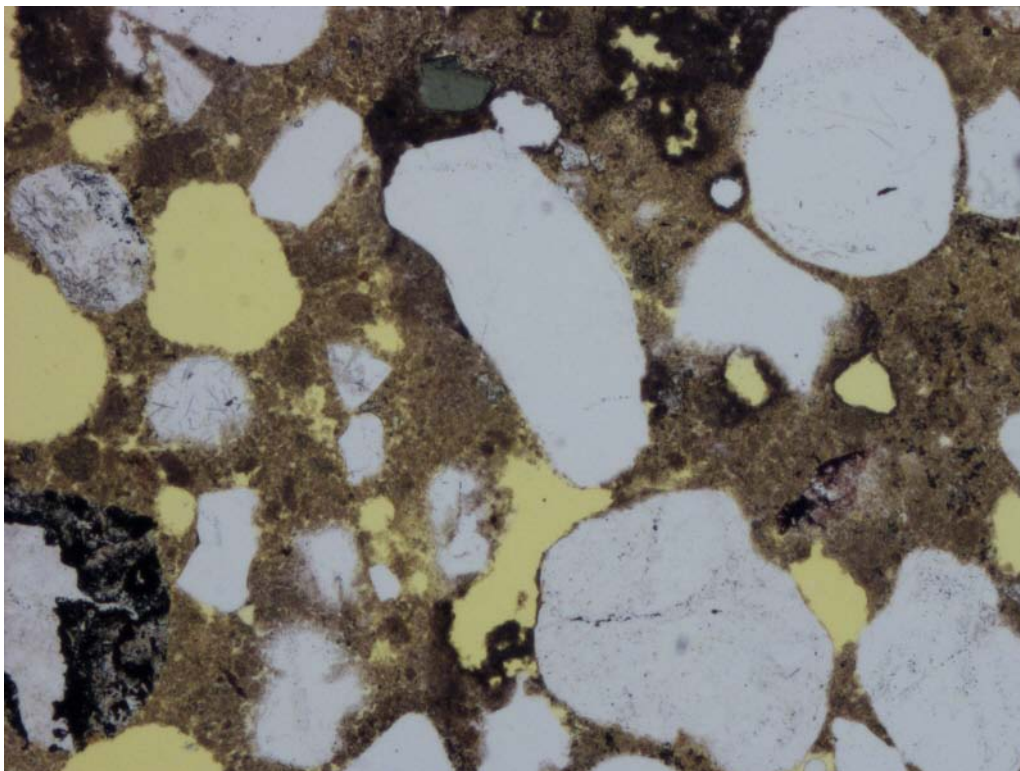
Figur 10. Prøve B. Billedbredden er 2,5 mm



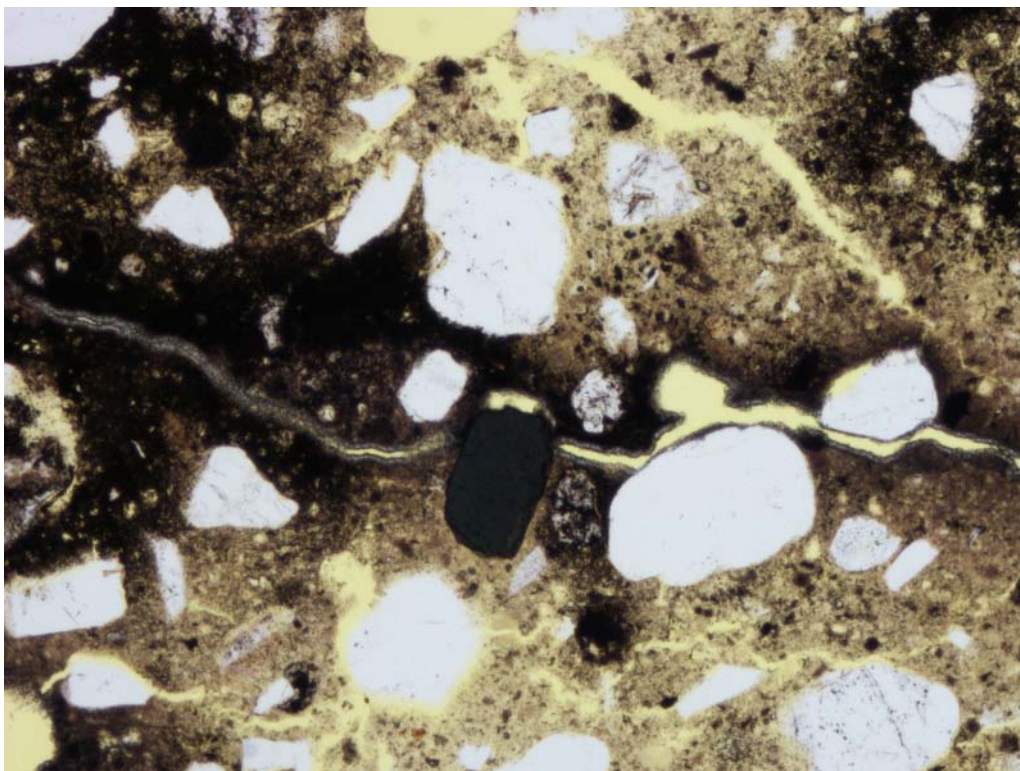
Figur 11. Prøve C. Billedbredden er 2,5 mm



Figur 12. Prøve D. Billedbredden er 2,5 mm



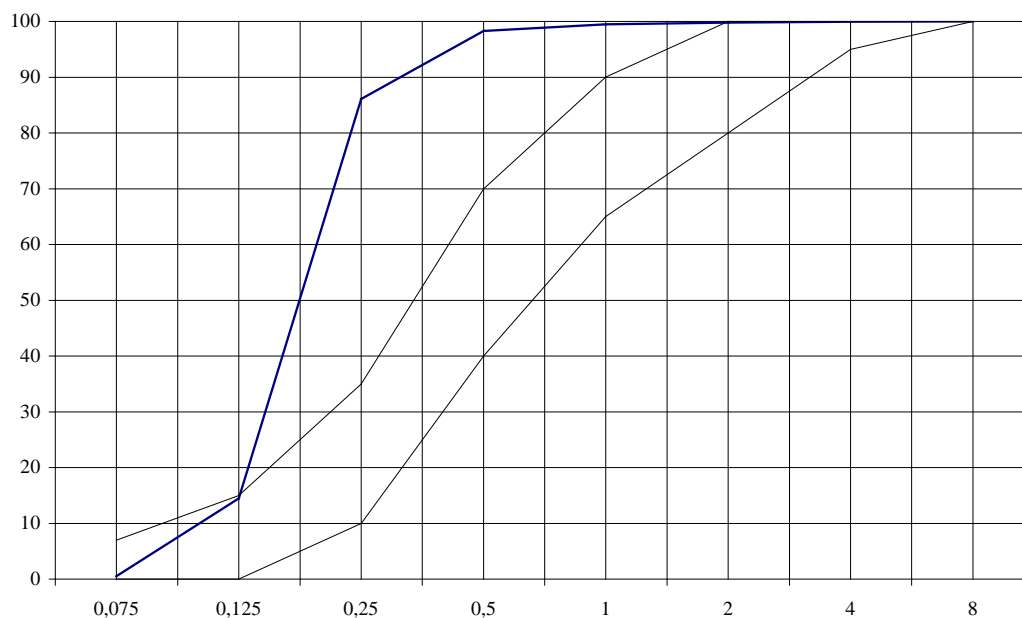
Figur 13. Prøve F. Billedbredden er 2,5 mm



Figur 14. Prøve G. Billedbredden er 2,5 mm

Prøve A. Pudsmørtel, kor nordvæg, 1200

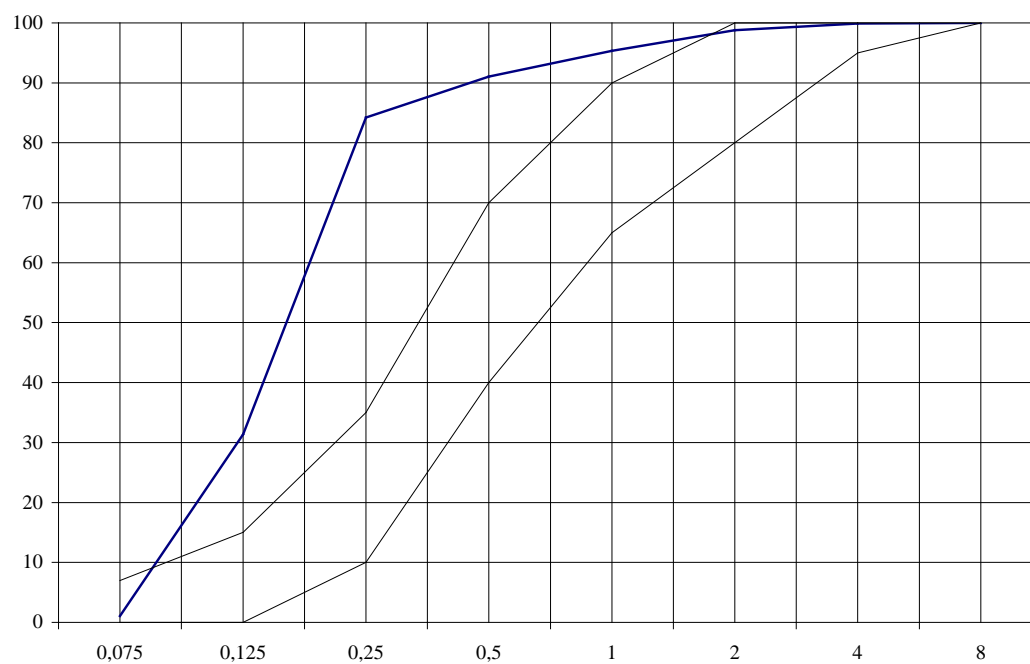
Gennemfald på 8	mm sigte	100,0 vægt %
-	- 4	- - 99,9 -
-	- 2	- - 99,8 -
-	- 1	- - 99,5 -
-	- 0,5	- - 98,3 -
-	- 0,25	- - 86,1 -
-	- 0,125	- - 14,4 -
-	- 0,075	- - 0,5 -



— grænsekurver for mørtelsand efter murværksnormen DS 414 annek D.

Prøve B. Muremørtel, kor nordvæg, 1200

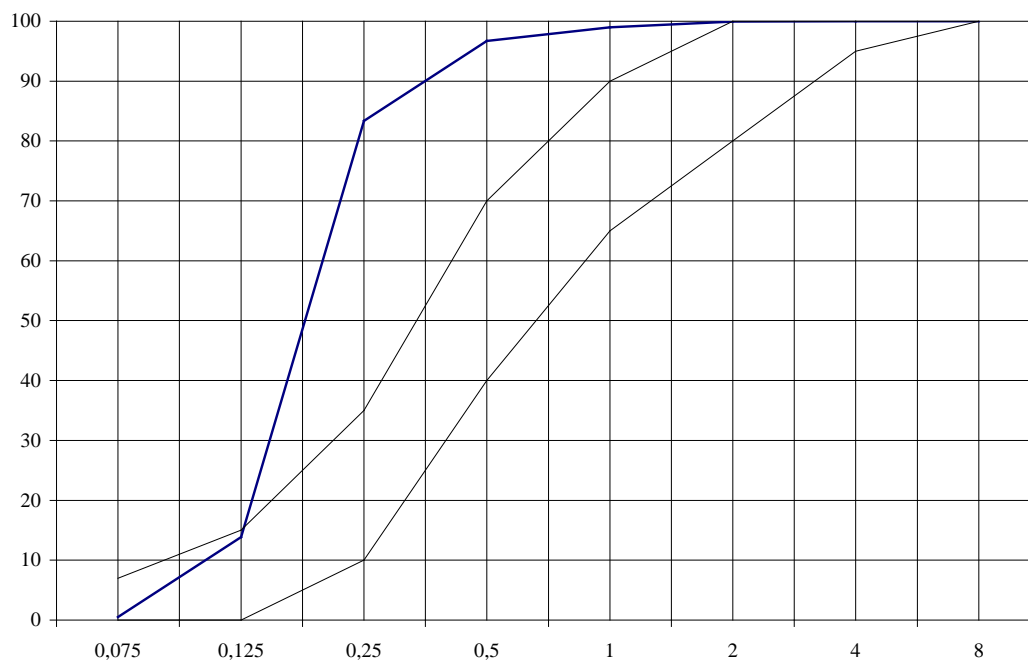
Gennemfald på 8	mm sigte	100,0 vægt %
-	- 4	- - 99,9
-	- 2	- - 98,8
-	- 1	- - 95,4
-	- 0,5	- - 91,1
-	- 0,25	- - 84,2
-	- 0,125	- - 31,4
-	- 0,075	- - 1,1



— grænsekurver for mørtelsand efter murværksnormen DS 414 anneks D.

Prøve C. Muremørtel, skib nordvæg, hulmur, 1200

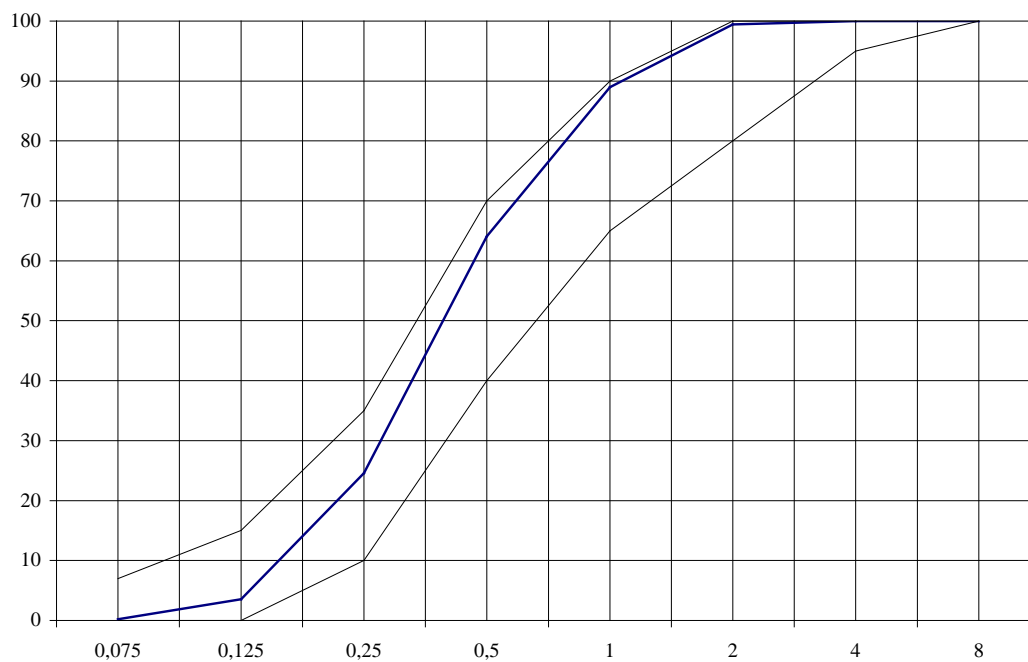
Gennemfald på 8	mm sigte	100,0 vægt %
-	- 4	- - 100,0
-	- 2	- - 99,9
-	- 1	- - 99,0
-	- 0,5	- - 96,7
-	- 0,25	- - 83,4
-	- 0,125	- - 13,8
-	- 0,075	- - 0,5



— grænsekurver for mørtelsand efter murværksnormen DS 414 annek D.

Prøve D. Muremørtel, lukkemur i norddør, 1600

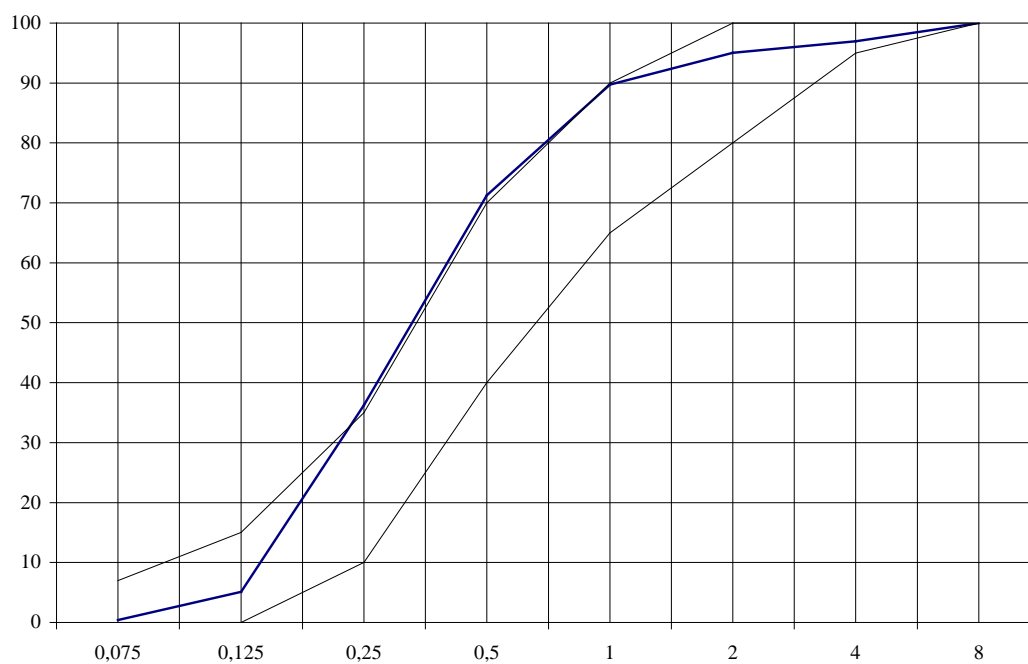
Gennemfald på 8	mm sigte	100,0 vægt %
-	- 4	- - 100,0
-	- 2	- - 99,4
-	- 1	- - 89,0
-	- 0,5	- - 64,1
-	- 0,25	- - 24,6
-	- 0,125	- - 3,5
-	- 0,075	- - 0,2



— grænsekurver for mørtelsand efter murværksnormen DS 414 anneks D.

Prøve F. Muremørtel, skib, vestmur, 1500

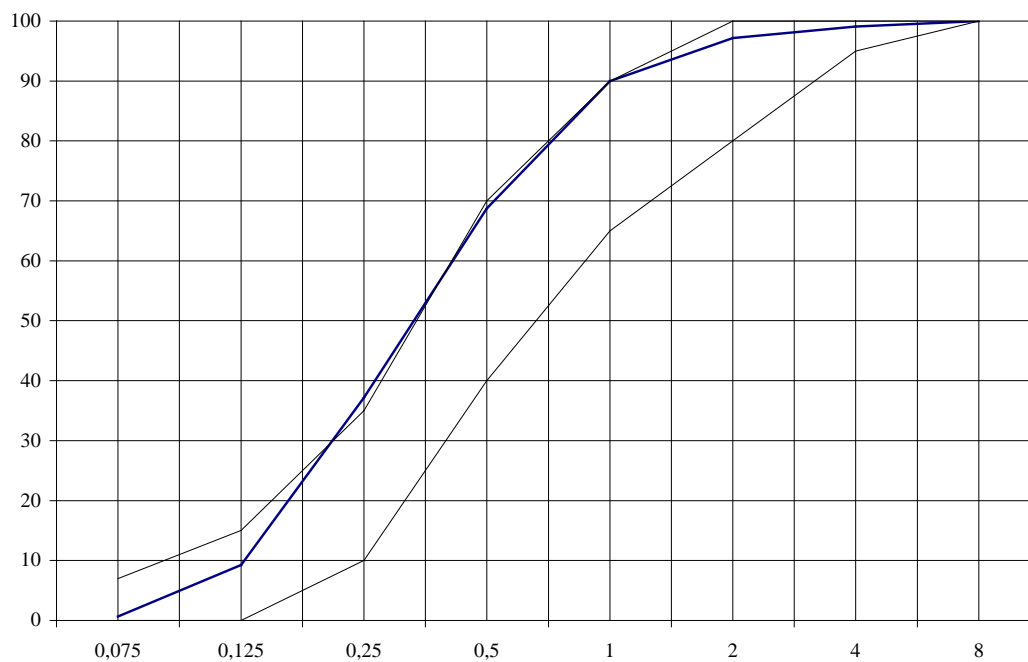
Gennemfald på 8	mm sigte	100,0 vægt %
-	- 4	- 97,0
-	- 2	- 95,1
-	- 1	- 89,8
-	- 0,5	- 71,2
-	- 0,25	- 36,3
-	- 0,125	- 5,1
-	- 0,075	- 0,4



— grænsekurver for mørtelsand efter murværksnormen DS 414 anneks D.

Prøve G. Muremørtel, skib, vestmur, 1700

Gennemfald på 8	mm sigte	100,0 vægt %
-	- 4	- - 99,1
-	- 2	- - 97,2
-	- 1	- - 90,0
-	- 0,5	- - 68,8
-	- 0,25	- - 37,2
-	- 0,125	- - 9,2
-	- 0,075	- - 0,6



— grænsekurver for mørtelsand efter murværksnormen DS 414 anneks D.