Sfæriske strukturer i Hardeberga Formationen ved Strøby, Bornholm

Trine Edlich

8. januar 2009

2 Indledning

Denne opgave er skrevet i forbindelse med forfatterens bachelorprojekt ved Københavns Universitet, Institut for Geografi og Geologi (IGG), i 2008/2009, under vejledning af Lektor G.K. Pedersen, IGG.

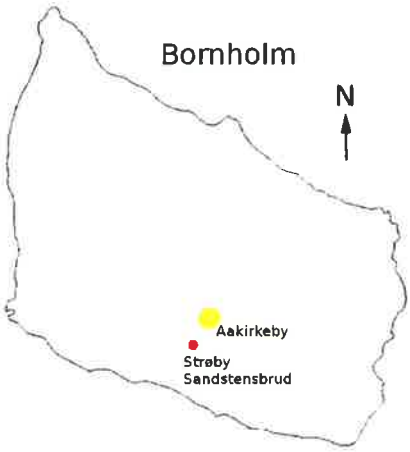
2.1 Problembaggrund

I Strøby Sandstensbrud, syd for Aakirkeby på Bornholm (figur 1a) findes en blotning af Hardeberga Formationen, Vik Led.

Formationen udgøres af marint aflejrede sand- og lersten, der på lokaliteten hovedsageligt består af en lys grå, fin- til mellemkornet, kvartscementeret kvartsarenit, se figur 1b. På de blottede lagflader ses blandt andet små (0,5-3cm) runde fremspring og fordybninger, se figur 1c, hvis oprindelse ikke er veldokumenteret. Hvor disse ses som fremspring, er materialet lysere end den omgivende grå sandsten. Disse strukturer optræder med forskellig tæthed og indbyrdes afstand på lagfladerne.

Det har været foreslået, at strukturerne kunne være sporfossiler (ifølge informationstavle i bruddet), repræsentere gasbobler (Gravesen 1996, Poulsen 1966) eller være forvitrede konkretioner (Bromley 2002).

Målet med dette projekt er at kortlægge strukturernes udbredelse, at beskrive deres form og størrelse, samt at undersøge deres mineralogi og cementering i tyndslib og Scannende Elektron Mikroskop (SEM). Undersøgelsen omfatter feltarbejde på lokaliteten, prøveindsamling, undersøgelse af tyndslib og SEM–billeder, samt litteratursøgning.



(a)

(b)

(c)

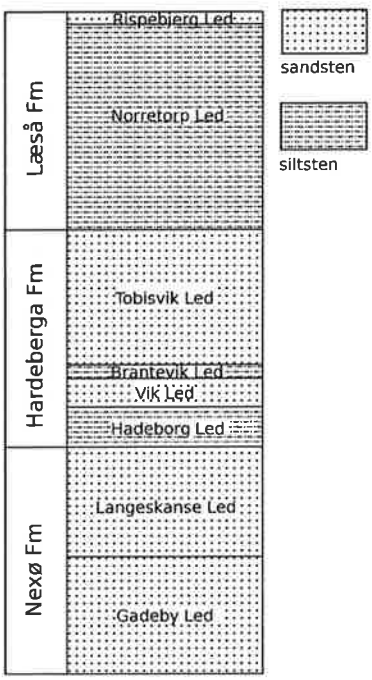
Figur 1: (a) Kort over Bornholm med geografisk placering af Strøby Sandstensbrud. (b) Oversigtsbillede over bruddet, taget mod nord. (c) Blottet sandstensoverflade, med cirkulære strukturer. Hammeren måler 33 cm.

3 Geologisk baggrund

Den undersøgte lokalitet ved Strøby Sandstensbrud kan findes omtalt af Hansen (1936, lok.92). Bruddet er ikke længere aktivt, men er fredet og indgår som en del af NaturBornholms udstillingsområde.

Den type sandsten der findes blottet i bruddet, beskrives af Hansen (1936) på andre lokaliteter som tilhørende Nexø-sandsten, type VI. Typen omdøbes senere til Balka Kvartsit (f.eks. Poulsen 1966), Balka Sandsten Formationen (f.eks. Surlyk 1980) og den er blevet henført til Strøby Led af Poulsen, Svendsen & Friis (2000).

I nærværende rapport antages sandstenen at tilhøre Hardeberga Formationen, nedre del af Vik led (Nielsen & Schovsbo 2007, Hamberg 1991), se figur 2. Formationen er 109 m tyk i Borggårdkernen på Bornholm (DGU nr. 247.627, Nielsen, Klitten & Hansen 2006, Nielsen & Schovsbo 2007) og alderen formodes at være tidlig Kambrisk.



Figur 2: Lithostratigrafisk skema over Nedre Kamriske aflejringer på Bornholm fra Nedre Kambrium, med angivelse af formationer og led samt mægtighed af aflejringerne. Vik led har en tykkelse på 12m i Borggård kernen. Figuren er baseret på data fra Nielsen & Schovsbo (2007).

3.1 Basinudvikling i Bornholmsområdet

I ældre Kambrium var aflejringshastigheden og indsynkningsraten lav i det baltiske område. Omkring yngre Silur steg indsynkningsraten kraftigt i forbindelse med den kaledoniske deformation (Vejbæk, Stouge & Poulsen 1994, Buchardt & Nielsen 1985). Dette medførte kompaktion og cementering af de kambriske aflejringer. Den intergranulare volumen er målt til gennemsnitlig 20% (Møller & Friis 1999).

Studier af stabile isotoper, samt basingeologi viser, at indsynkningen har ligget på op mod 4 km. Temperaturen har minimum nået et niveau på 90°C, men mere sandsynligt op mod 200°C, hvilket svarer til en geotermisk graident på mindst 50°C km^{-1} (Buchardt, Nielsen & Schovsbo 1997, Buchardt & Nielsen 1985, Vejbæk et al. 1994). Det betyder også, at de tidlige kambriske aflejringer på Bornholm, herunder også Hardeberga Formationen, har været udsat for høj grad af diagenese til lav metamorfose (overgangen er defineret inde for intervallet 180–250°C).

Den hurtige indsynkningsrate og høje geotermale gradient har været et resultat af dannelse af et hurtigt indsynkende forlandsbassin på shelfen foran de tysk-polske Kaledonider (Buchardt et al. 1997), samt flow af varmt formationsvand (Buchardt 2008, personlig samtale).

I sen Karbon–tidlig Perm begyndte området at blive hævet igen på grund af aktivering af Sorgenfrei-Tornquistzonen (senhercynisk ekstensionstektonik) og vulkanisme. Bornholmsområdet blev fortsat udsat for en generel hævning frem til sen Kridt, med erosion og blotlægning af ældre aflejringer til følge (Vejbæk et al. 1994, Buchardt et al. 1997).

3.2 Hardeberga Formationen

Hardeberga Formationen består hovedsageligt af stærkt kvartscementeret, velsorteret kvartsarenit, med lejlighedsvise ler- og silthorisonter (Nielsen & Schovsbo 2007), nogle steder med glauconit (Surlyk 1980). Den Lithostratigrafiske inddeling af Hardeberga Formationen ses af figur 2.

Formationen blev aflejret under den Kambriske transgression, i et epeirisk hav. Aflejringsmiljøet har været stærkt tidevandspåvirket, med kystparallelle kanaler og sandaflejring på vidtstrakte sandvader, bag store barriereøer (Hamberg 1991). I Hardeberga Formationen findes der stærkt bioturberede niveauer med blandt andet *Diplocraterion*, *Skolithos*, *Planulites*, *Psammitichnites* og *Didymaulichnus* (Hamberg 1990, Clausen & Vilhjálmsson 1986). Nedre del af Vik led er dog regionalt fattig på sporfossiler, hvilket også gælder for blotningen i Strøby Sandstensbrud.

Formationen er biostratigrafisk dateret til den tidligste del af Kambrium (f.eks. Nielsen & Schovsbo 2007).

3.2.1 Vik Led i Strøby sandstensbrud

I Strøby Sandstensbrud består de blotlagte aflejringer af 1–30 cm tykke bænke af lys grå kvartsarenit, bestående af fin- til mellemkornet, velsorteret kvartssand, cementeret med kvarts. Porøsiteten ligger generelt på 0,2–0,4% og bjerartsvolumet består af 72,8–83,8% detritale korn, 14,2–23,6% kvartscement og 2,0–3,6% anden cement. Tallene er baseret på punkttællinger i to prøver fra Strøby Sandstensbrud (Møller & Friis 1999).

Mellem bænkene af sandsten findes lag af siltholdig, glimmerrig skiffer. Nogle steder er sandstenen sort på grund af indhold af pyrobitumen (Møller & Friis 1999).

Lige nord for bruddet ligger en forkastning (Hadeborg profilet) der har dan-

net et slæb, således at grundfjeldet kan findes højere liggende i terrænet end de blottede dele både Nexø og Hardeberga Formationerne i rækkefølge. Lavest i terrænet findes Vik Led, i selve bruddet. Bjergarterne er mere eller mindre breccieret afhængig af afstand fra forkastningen.

Lagfladerne i bruddet domineres af velbevarede bølgeribber i flere retninger og lunate barrer. De interne krydslejringer i sandstensbænkene har nogle steder sæthøjder op til 30 cm.
Aflejringerne er opsprækket på kryds og tværs og visse steder findes radierende frakturer fra hvad der måske er et levn fra dengang bruddet var aktivt, og kan være dannet af sprængning med dynamit.
På overfladen af de blottede sandstensbænke findes iøjnefaldende runde fremspring og fordybninger på mellem 0,5 cm og 3 cm, se figur 1c. Derudover er der tidligere fundet nogle koniske strukturer, der muligvis repræsenterer vertikale gravegange (Bruun-Petersen 1973), samt horisontale gravegange (måske *Planulites*) i skifferlagene. Helt specielt findes der også et aftryk af en vandmand på en af de blottede flader. Stylolitlignende strukturer er udbredt.

Vekslen mellem ribbepræget sand og lerrede aflejringer vidner om et aflejringsmiljø præget af abrupte skift i energi. Sandbænkenes interne krydslejringer, samt aftryk bevaret i skiffer–sandstensgrænserne (f.eks. figur 5a) viser at sandet blev aflejret horisontalt og ikke erosivt.
En mulighed kunne være at sandet blev aflejret i den subtidale zone, men ikke under bølgebasis (omkring 10 meters dybde). De siltede lag kunne således repræsentere en række af transgressioner, sådan at aflejring skete på dybere vand, under bølgebasis. Dette synes at være tildfældet flere steder i den del af Borggårdkernen der repræsenterer Vik Led.

Manglen på bioturbation i sandstenen, antallet af skifferlag og vekslen mellem ganske høje sæt af krydslejringer, og realtivt tynde lag i Strøby Sandstensbrud, kunne derimod også tyde på en meget høj energi og aflejringshastighed, som for eksempel ved overskylsvifter i laguner, eller i tidevandskanaler.

4 Metoder

Dette afsnit indeholder en kort gennemgang af de anvendte undersøgelsesmetoder. Afsnittet er inddelt i to underafsnit om henholdvis makro- og mikroskopiske undersøgelsesmetoder.

4.1 Metoder til makroskopiske undersøgelser

Feltarbejdet blev udført i Strøby Sandstensbrud i august 2008. Ved samme lejlighed blev der også udført sammenlignende studier langs Læsåʼen, øvre del af Rispebjerg Led (figur 2), og i Hardeberga Formationen blottet i Pedersker Sandstensbrud. Arbejdet indbefattede prøvetagning, notering af makroskopiske observationer og fotografering. Prøverne er hjembragt og efterbehandlet. Den del af Borggårdkernen der består af Vik Led, er undersøgt. Kernen er taget ca. 10 km NNØ for Strøby Sandstensbrud. Desværre er kernen temmelig knust i den del der strtigrafisk tilsvarer Strøby Sandstensbrud.

Tidligere er der lavet uofficielle undersøgelser vedrørende fordelingen af de omtalte cirkulære strukturer, for eventuelt at fastlægge om strukturerne er koblede, som det for eksempel ses ved sporfossilet *Diplochraterion* (G.K. Pedersen (IGG) 2008, personlig samtale).
For at undersøge om der er nogen umiddelbar systematik i fordelingen af strukturerne anvendes simple algoritmer i Matlab. Med udgangspunkt i plot

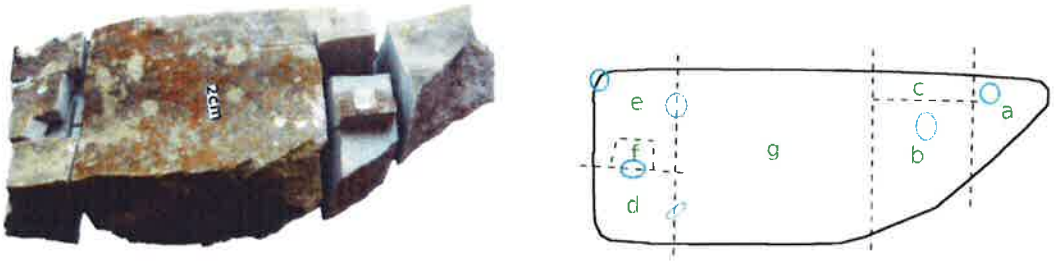
af sfæriske strukturer i et koordinatsystem, fremstilles histogram over samtlige afstande mellem alle punkter, samt graf over korteste afstand mellem to punkter. Figurerne findes i afsnit 5. Alle afstande er målt fra midten at en struktur, til midten af den næste. På denne måde betyder størrelsen på strukturerne ikke noget.
Plottet er fremstillet ved hjælp af fotos taget under feltarbejdet i Strøby Sandstensbrud. Dette plot afspejler fordelingen, som den kan ses med det blotte øje.

4.2 Metoder til mikroskopiske undersøgelser

Fra hjembragte prøve 2, figur 3a, er der udskåret stykker til tyndslib. Der er lavet tyndslib fra stykke b (slib 2), c (slib 4) og e (slib 1) på figur 3b. Der er også lavet tyndslib af et fritliggende stykke fra en fremspringende struktur, indsamlet på et tidligere tidspunkt af Lektor G.V. Pedersen, på samme lokalitet (slib 3). Slib 1 og 4 kan ses på figur 4a og 4b henholdsvis. Inden polering af tyndslib, blev prøverne indstøbt i blå epoxy. Slibene er undersøgt med mikroskop for at identificere mineralsammensætning, cementtype og -udbredelse.

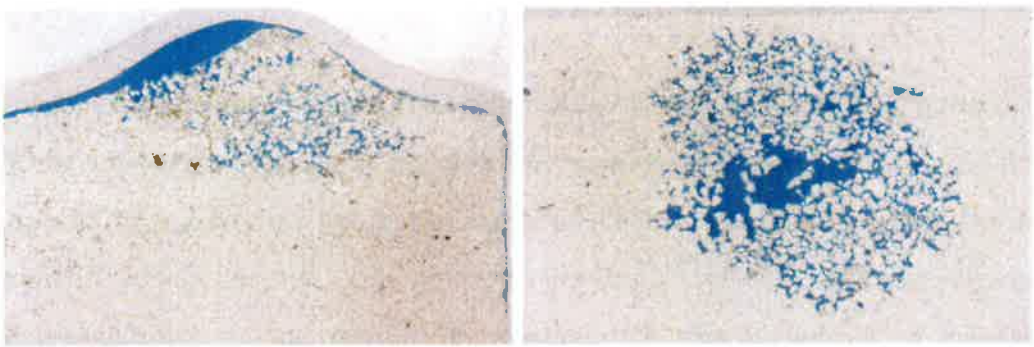
En prøve (modstykket af det vist på figur 6a) blev undersøgt med SEM hos GEUS. SEM–mikroskopi genererer billeder ved hjælp af en fokuseret stråle af elektroner. Resultatet er billeder med meget høj opløsning (nm til μm, kan forstørre 10–10.000x (Goldstein, Newbury, Joy, Lyman, Echlin, Lifshin, Sawyer & Michael 2003)). De resulterende billeder har et tredimensionelt udseende, hvilket gør metoden praktisk i forbindelse med for eksempel undersøgelse af overfladestrukturer.
Prøven indlejres i et elektrisk ledende materiale (her blev brugt karbon), for

at forhindre opbygning af statisk elektricitet under mikroskopering. Prøven sættes ind i et kammer i SEM'en, hvori der dannes vacuum. I korte træk kan prøven enten scannes i raster for at danne et topografisk billede, eller elektronstålen kan være stationær således at et enkelt punkt kan analyseres (Goldstein et al. 2003). I nærværende undersøgelse er der benyttet *secondary electrons* (SE) probe, *back scattered electrons* (BSE) probe og røntgen. Ved hjælp af røntgen kan områder på min $1\mu m^3$ (Goldstein et al. 2003) analyseres for grundstofsammensætning.



(a) (b)

Figur 3: Prøve 2, indsamlet i Strøby Sandstensbrud fra større, løsrevet blok. Der er skåret stykker af prøven til tyndslib: (a) Foto af prøven efter den er blevet skåret op og stykker er afleveret i tyndsib, (b) skematisk gengivelse af prøve 2, med angivelse af underinddeling (prøve 2a-2f) samt blå markering af placering af runde strukturer.



(a) (b)

Figur 4: To af de fire fremstillede tyndslib. De blå områder er porerum der fyldt med blå epoxy. (a) Tyndslib nummer 1 (b) Tyndslib nummer 4

5 Resultater

De indsamlede resultater beskrives efter metode, og er underinddelt i makroskopiske og mikroskopiske observationer. Behandling og diskussion af resultaterne findes i afsnit 6.

5.1 Makroskopiske observationer

De makroskopiske observationer inkluderer strukturelle observationer, fordeling, samt sammenligning med andre lokaliteter. Beskrivelse af lithologien findes i afsnit 3, om den geologiske baggrund.

5.1.1 Fordeling, form og udbredelse

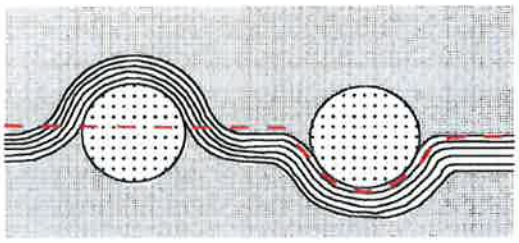
Første antagelse bestod i, at de runde strukturer kun findes på øvre laggrænser af sandstensbænkene. Efter nærmere undersøgelse viste det sig at der, blandt andet på en løsrevet blok, fandtes samme strukturer på de nedre laggrænser, se figur 5c. På figur 5a ses en interessant relation, der er skitseret på figur 5b. Et lag af skiffer er fanget mellem et fremspring og dens aftryk. På samme blok ses også aftryk af sporfossiler.
Strukturerne optræder også internt i aflejringerne. De varierer i størrelse (se afsnit 3.2.1) og nogle er mere ovale end cirkulære, men altid med den lange akse parallelt med lagplanet. På figur 6c og 6d ses for eksempel hvordan de runde strukturer ikke er cementerede som den omgivende sandsten. Disse små områder er så porøse, at materiale nemt kan skrabes af med en fingernegl. Hvor strukturerne har været blottede, er materiale af og til forvitret væk, og tilbage står små skålformede fordybninger, som på billede 1c.

Et stykke af den før omtalte løsrevede blok er hjembragt til nærmere undersøgelse, se billederne 3a og 3b.

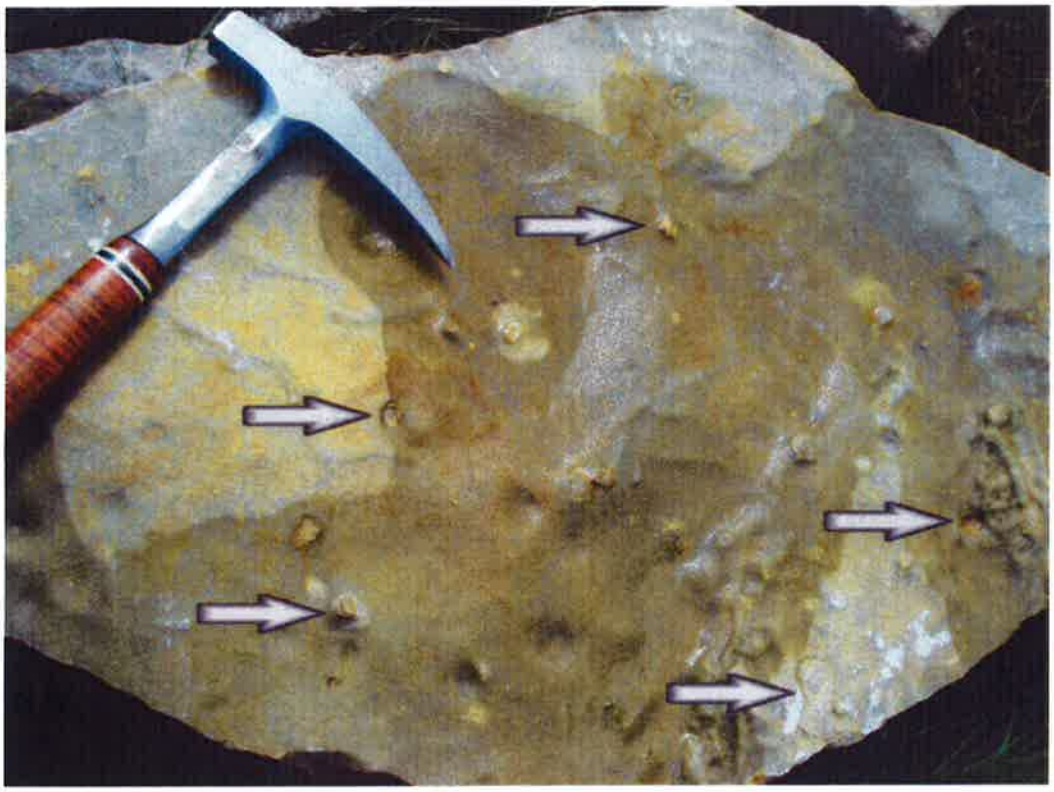
Ved at skære stykke b (figur 3b) igennem lige under et porøst område, lagparallelt, kunne det konstateres, at strukturen ikke fortsætter ned gennem sedimentet videre end maks. 1 cm under overfladen. Der er lavet slib af samme prøve (slib 2).

Stykke c (figur 3b) er skåret igennem på tværs, vinkelret på lagplanet, se figur 6b (slib 1). Ved gennemskæring af prøven dukkede der også lignende struktur op, inde i sedimentet (figur 6c) der, fordi den er frisk og uforvitret, også blev lavet tyndslib af (slib 4). Minimum 10 af disse strukturer blev fundet i prøve 2, se figur 6a–6d. Som det ses på figur 6a, er der også fundet en sfærisk struktur, der ligger på tværs af krydslejringerne. De findes ikke i skifferlagene. Generelt er strukturerne sfæriske hvor de er velbevarede, se blandt andet figurerne 1c, 5c og 6c.

(a)

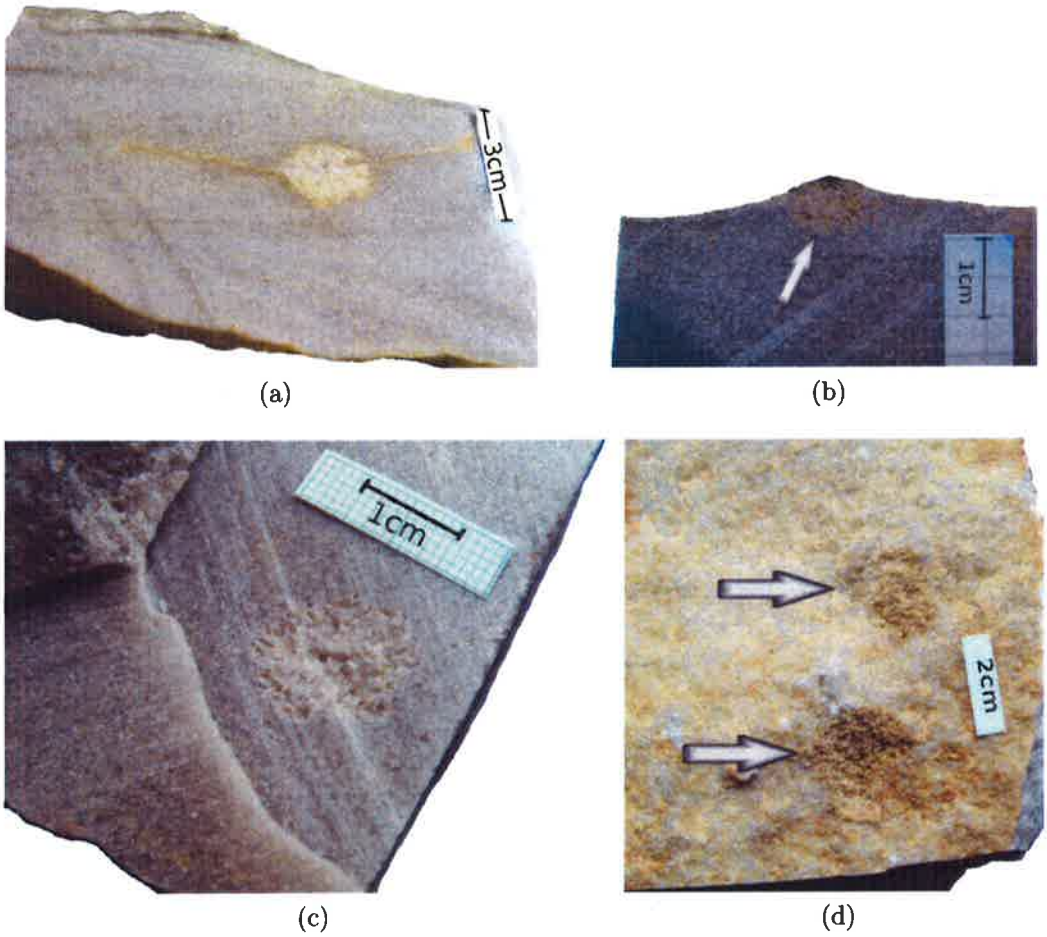


(b)



(c)

Figur 5: Relation mellem sfæriske strukturer i nedfalden blok af Hardeberga Sandsten i Strøby Sandstensbrud. (a) Billede af undersiden af en blok af Hardeberga Sandstenen, hvor der med pile er markeret sfæriske strukturer. (b) skitseret tværsnit af relationen vist på billede 5a. (c) Undersiden af hele den løsrevne blok. Hammerens hovede måler 18 cm. Pile markerer sfæriske strukturer, både hulninger med skifferbelægning og fremspringende strukturer. Der kan også ses aftryk af krybespor.

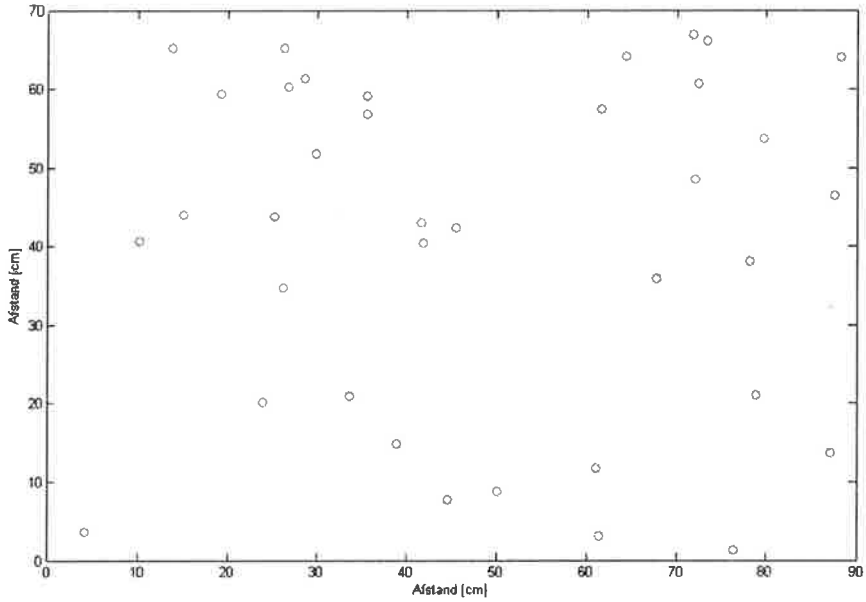


(a) (b) (c) (d)

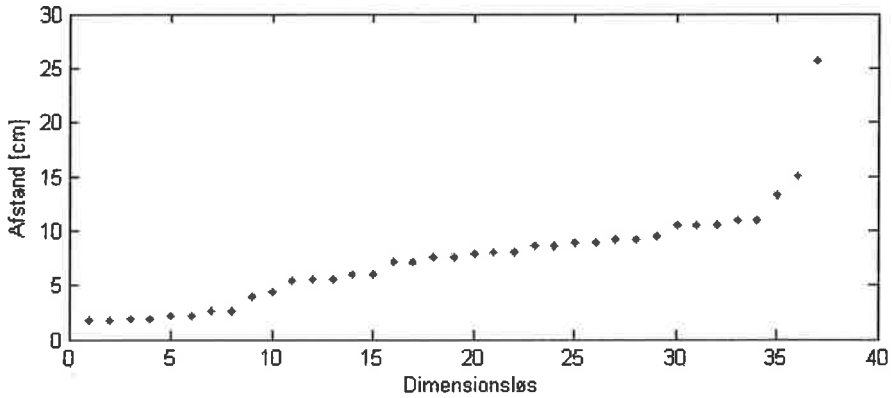
Figur 6: Prøve 2 indsamlet fra Strøby Sandstensbrud, billeder fra forskellige vinkler hvor der er fundet mere porøse områder. (a) Fundet i midten af prøve 2 (figur 3a). Bemærk hvordan den cirkulære struktur ligger på tværs af de sedimentære strukturer.(b) Struktur der er skåret tværs igennem, stykke c på figur 3b. (c) struktur fundet i skærespor mellem stykke c og b på figur 3b. (d) strukturer fundet på undersiden af prøve 2.

Fordelingen af de sfæriske strukturer er fremstillet grafisk på figurerne 7, 8 og 9. Det har af praktiske årsager kun været muligt at lave fordelingsstatistik på de overfladisk blottede, sfæriske strukturer. Da det er konstateret at disse strukturer forkommer omtrent lige så hyppigt andre steder i bjergarten, er en fordelingsstatistik alene bedømt på distributionen af synlige forekomster, behæftet med betydelig fejlmargin. Fordi udregningerne er lavet inden for et afgrænset område, betyder det også at data i yderpunkter er fejlbehæftede, da området uden for koordinatsystemets rammer ikke kan medregnes.
Formålet med beregningerne var at se om en bestemt afstand forekom mere hyppigt en andre, eller om fordelingen er systematisk. Det er muligt at der findes bedre metoder end de anvendte, men det ligger ude for projektets omfang og forfatterens kompetencer.

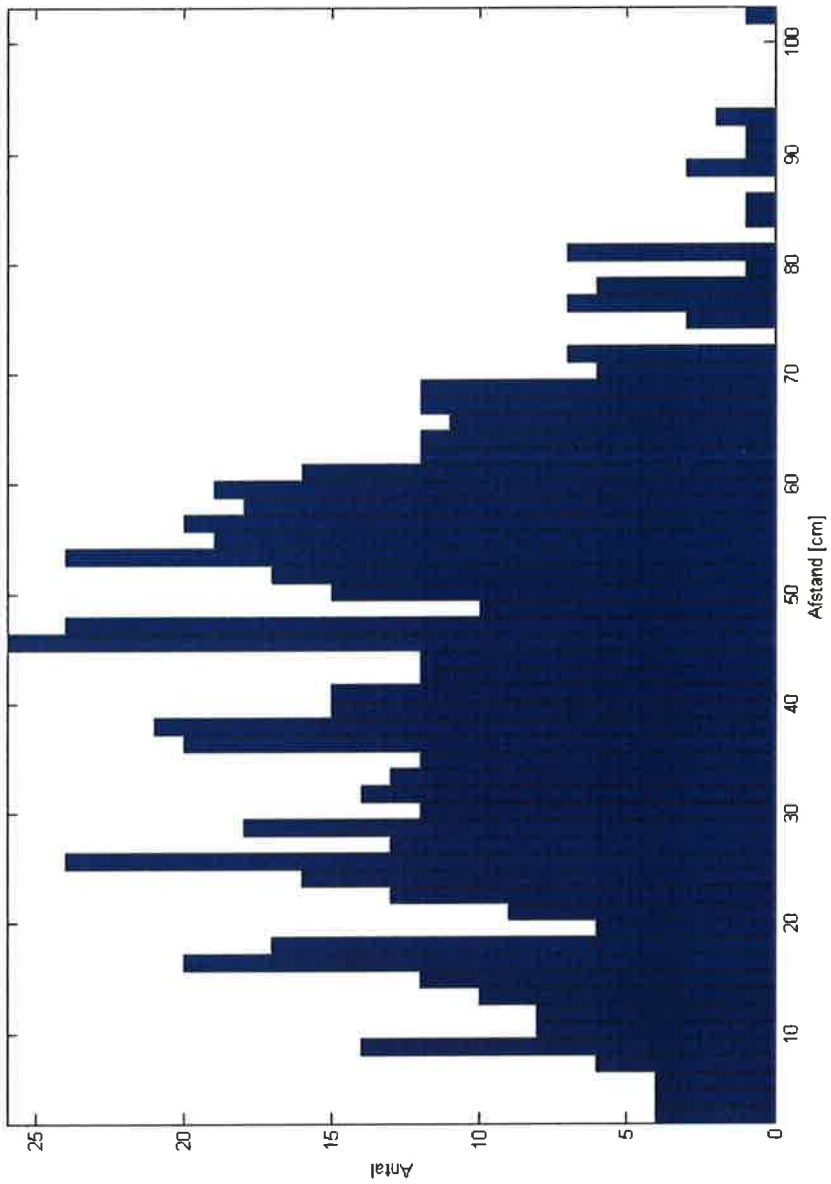
Grafen (figur 8) viser at der er mellem 2 og 10 cm's afstand til nærmeste punkt i aktuelle plot. De tre yderste punkter afviger en del og ekskluderes. Dette interval er dog ikke det hyppigste i histogrammet på figur 9. Det er nødvendigt at lave flere plot af samme størrelse, eller udvide området for at bekræfte om dette er en generel tendens. Måske vil intervallet være større endnu, hvis området udvides.
I histrogrammet (figur 9) ses det at afstande over 70 cm ikke er hyppigt forekommende, og den længste afstand er lidt over 100 cm, hvilket svarer nogenlunde til afstanden på tværs af koordinatsystemet. Denne afstand vil stige med størrelsen af udsnittet og er derfor irrelevant.
Umiddelbart ses ingen systematisk i hyppigheden af afstande, og histogrammet udviser ikke nogen god normalfordeling, således at det er muligt at aflæse et repræsentativt gennemsnit. Fluktuationerne er for store. Fordelingen synes at være tilfædig og usystematisk.



Figur 7: Fordeling af overfladisk blottet sfæriske strukturer, plottet i koordinatsystem. Baseret på foto taget under feltarbejde i Strøby Sandstensbrud.



Figur 8: Graf over afstand til nærmeste punkt baseret på figur 7. y-aksen viser målte afstand, x-aksen er dimensionsløs hvor hvert punkt blot repræsenterer et punkt i koordinatsystemet. Punkterne er sorteret efter afstand.



Figur 9: Histogram over afstande mellem punkter, baseret på plottet på 7. Samtlige afstande mellem samtlige punkter er målt. Histogrammet viser hvor hyppigt et bestemt afstandsinterval forekommer. Hyppighed op ad y-aksen og afstand ud ad x-aksen.

5.1.2 Sammenligning med andre lokaliteter

Den øvre del af Rispebjerg Led (Læså Fm), kan blandt andet ses blottet på Bornholm ved Læsåen, Kalby (Hansen 1936, lok. 86). Her findes distinkte halvkugleformede udhulninger, der ifølge Hansen (1936) er fyldt med en brun limonitsubstans, muligvis forvitringsprudukt af konkretionsdannende pyrit (Poulsen 1966).

Tætheden er større end i Strøby Sandstensbrud og fordelingen mere regelmæssig. De er mere ens i størrelse og form og der er ingen sandet udfyldning i nogle af fordybningerne. Sandstenen er stærkt forvitret, og blotningen ligger i et lille vandfald i selve åen. Da området er fredet var det ikke muligt at hjemtage prøver til nærmere undersøgelse.

Hardeberga Formationen er også blottet i Pedersker Sandstensbrud (Gravesen 1996, lok. 193a), men her blev der ikke observeret strukturer der ligner dem i Strøby Sandstensbrud. Det vides heller ikke om de to blotninger tilhører samme led. Muligvis hører denne blotning til Tobisvik Led (*Værdifulde geologiske områder* 2008). Vik Led i Borggårdkernen indeholder ikke umiddelbart lignende strukturer.

5.2 Mikroskopiske observationer

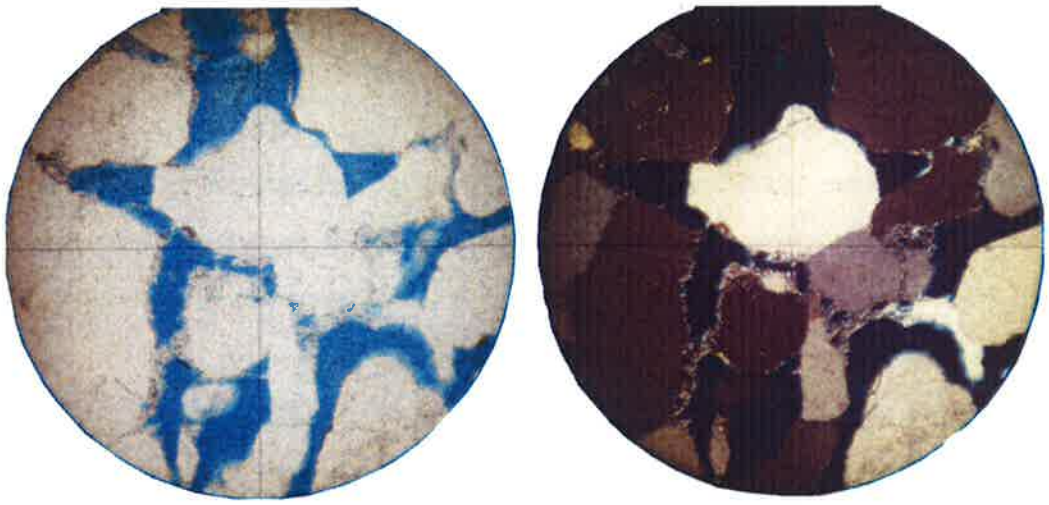
Mikroskopiske undersøgelser indbefatter her undersøgelse af tyndslib i mikroskop og undersøgelse af udskåret prøve med SEM.

På grund af projektets begrænsede tidsramme og midler, har det ikke været muligt at få lavet mikroprobe-undersøgelse af sandstenen. De undersøgte slib er forsynede med dækglas og kunne derfor ikke undersøges i SEM eller med mikroprobe, hvilket ville have været praktisk i forbindelse med endelig identifikation af mineraler observeret i mikroskop. Der tages derfor forbehold for

misfortolkninger på grund af utilstrækkelig data.
PPL står for planpolariseret lys og XPL for krydspolariseret lys.

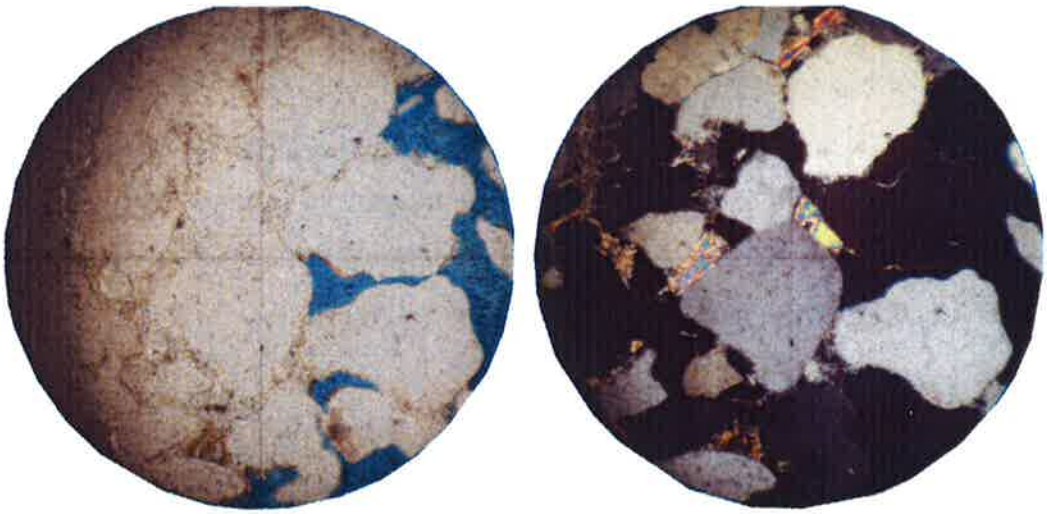
5.2.1 Tyndslib

Ved at betragte tyndslib nr. 4 uden mikroskop, kan det (på grund af andvendelse af blå epoxy til indstøbning) konstateres at porøsiteten stiger mod midten, se figur 4b. Dette kan skyldes tab af materiale da prøven blev udskåret med stensav, eller være et oprindeligt fænomen.
I tyndslib ses kvarts, der hovedsageligt er monokrystalline korn. Ganske få polykrystalline korn er fundet, formodentlig lithoklaster.
Der ses tegn på trykopløsning langs korngrænserne. På detritale korn findes syntaksiale kvartsovervoksninger, der danner bjergartens cement. Det kan være svært at skelne syntaksiale overvoksninger fra detritale korn, men det er muligt at se *dust rimms* enkelte steder. Disse rimms består sandsynlig vis af samme type mineral, der også ses udbredt i porerum. Under XPL er udslukningen af kvartskornene hovedsageligt ensartet.
Mellem korn og kvartscement findes lermineraler, samt større anhydrit-korn, figur 11a og 11b. Især på slib 4, i sekundær porøsitet, findes på kornoverflader tilsyneladende rimme af hvad der kan have udgjort en tidligere cement (ikke kvarts), figur 10a og 10b. Der er observeret forekomst af opakke mineraler som euhedrale korn, muligvis anatas, se figur 13a og 13b.



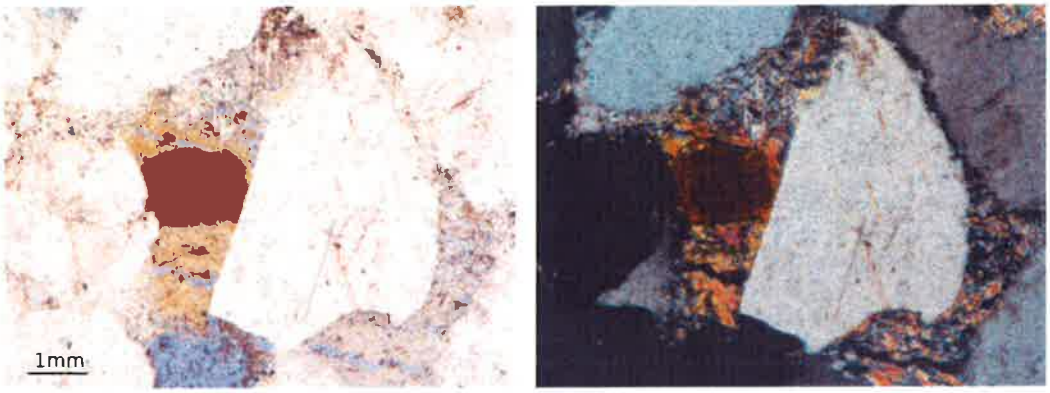
(a) (b)

Figur 10: (a) tynslib 4, PPL. (b) samme, med XPL. Kvartskorn med kappe af lermineraler i porøst område af slib 4.



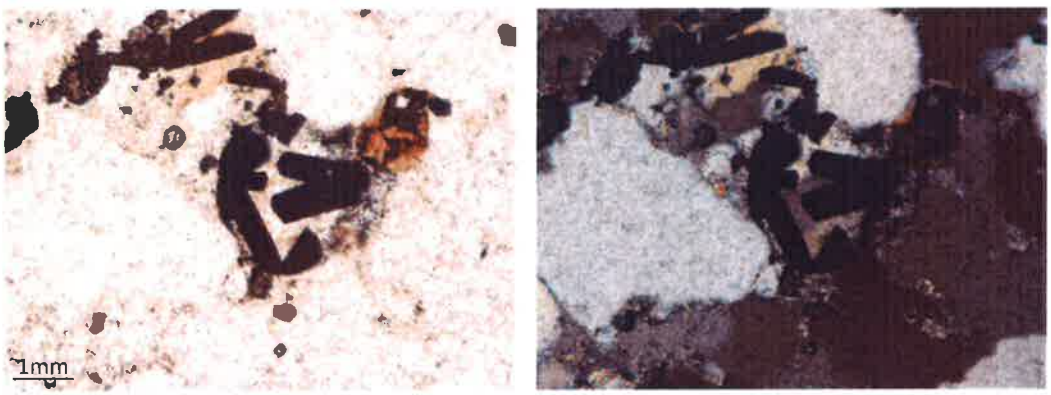
(a) (b)

Figur 11: (a) tynslib 1, PPL. (b) samme, med XPL. Kvartskorn med kappe af lermineraler i porøst område af slib 1.



(a) (b)

Figur 12: (a) tynslib 1, PPL, (b) samme, med XPL. Kvartskorn med cement, formentlig i form af lermineraler. Det brune mineral i centrum af billedet er ikke identificeret.



(a) (b)

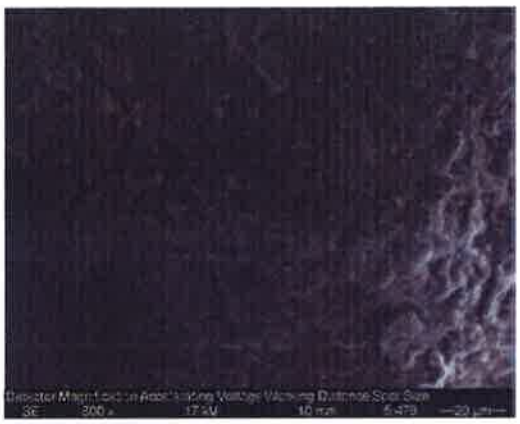
Figur 13: (a) tynslib 2, PPL og opakke mineraler, (b) samme, XPL. Kvartskorn med euhedrale korn af opakt mineral, ud fra krystalform og habitus, muligvis anatas (TiO_2).

5.2.2 Scannende Elektron Mikroskopi (SEM)

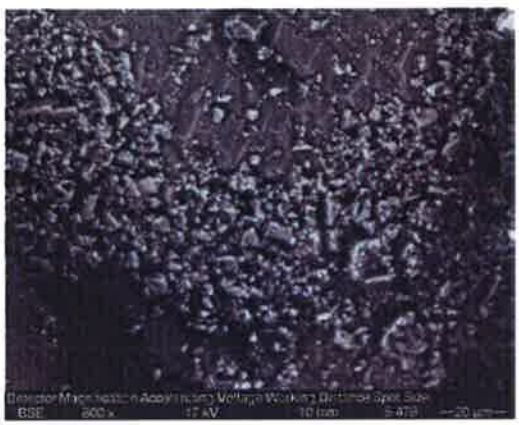
På figur 6a ses den ene halvdel en porøs, sfærisk struktur fundet ved gennemskæring af prøve 2 (figur 3a). Den anden halvdel er undersøgt med SEM. Overfladen af detritale kvatskorn i porøst område synes delvist dækket af yderst finkornet materiale, se figur 14a og 14b. Ved røntgenanalyse konstateres tilstedeværelse af andre grundstoffer end Si og O, se figur 14c for grundstofsammensætning.

Grundstofsammensætningen peger i retning af fyllosilikater, måske glauconit $(K, Na)(Fe^{3+}, Al, Mg)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$ eller omdannelsesprodukt heraf, kaolin $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ eller i tilfældet på figur 15c, hvor der ses et Mn-peak, kunne mineralet være chlorit $(Mg, Fe, Mn, Al)_{4-6}(Si, Al)_4O_{10}(OH, O)_8$. Der findes flere muligheder og sammensætningen ville kunne be- eller afkræftes ved undersøgelse med mikroprobe, hvilket dog i dette tilfælde ikke har været muligt.

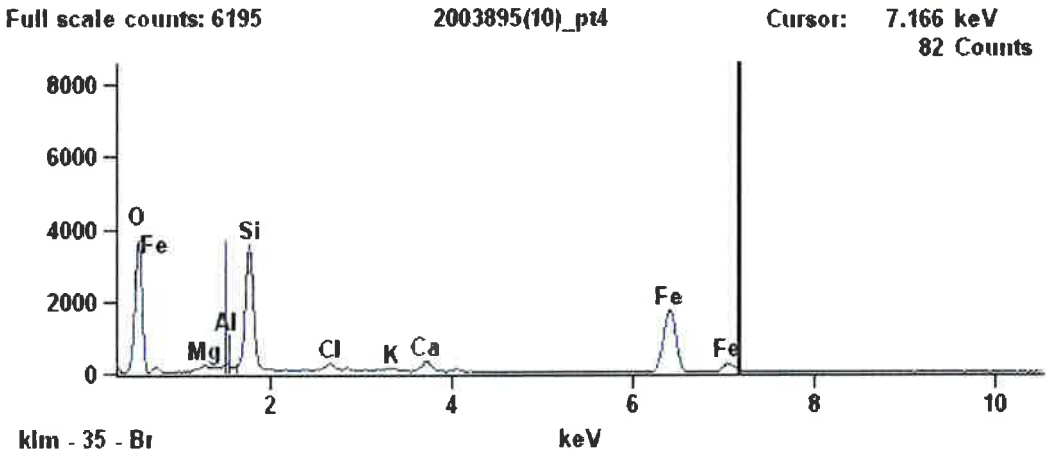
I tyndslib ser ingen af mineralerne grønlige ud i PPL, hvilket ville forventes ved chlorit og glauconit.



(a)

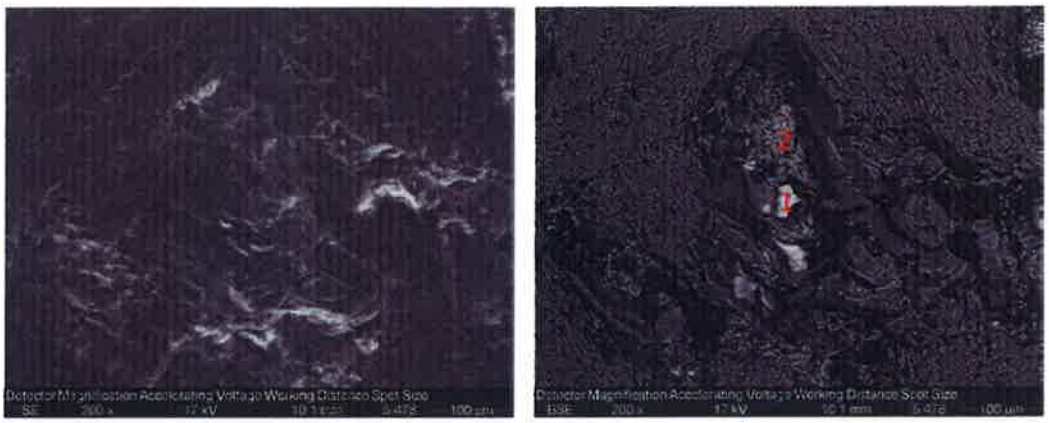


(b)

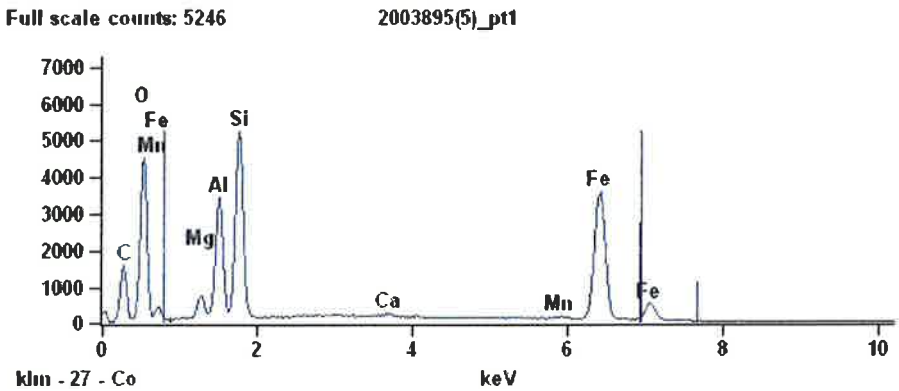


(c)

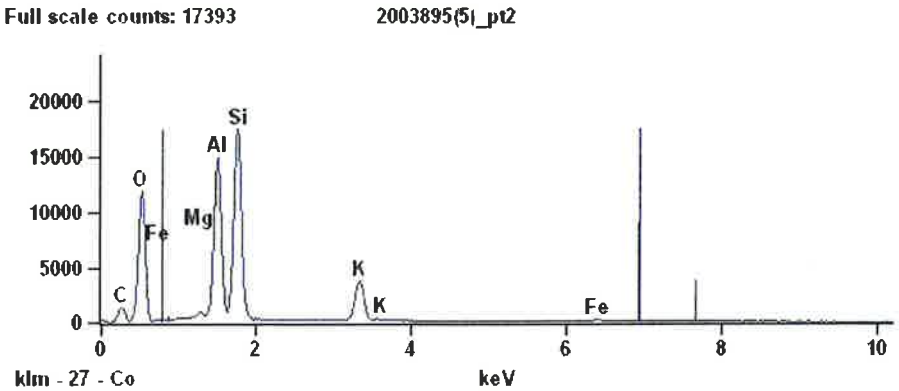
Figur 14: (a) kvartskorn (øverste del) delvist dækket af korn af andet mineral (nederste del) (b) samme billede som 14a, men med BSE-probe. (c) resultat af analyse af grundstofsammensætning af punkt på den nedre del (på billedet) af kornet.



(a) (b)



(c)



(d)

Figur 15: (a) Porerum i cementeret del af prøven, med SE-probe (b) samme billede som 15a, men med BSE-probe. (c) Resultat af grundstofanalyse af punkt 1, (d) resultat af grundstofanalyse af punkt 2.

6 Diskussion

Strukturerne synes kun at forekomme lokalt, og findes således ikke i Borggårdkernen eller i Pedersker Sandsstensbrud (der dog formentlig tilhører et andet led af formationen). Der kan være analogier til strukturerne der findes blottet i den øvre del af Rispebjerg Led blottet langs Læsåen. Nærmere undersøgelse kræves for at kunne afgøre dette.
Der fandets ingen belæg for at de observerede strukturer repræsenterer sporfossiler i form af vertikale gravegange. Strukturerne er sfæriske og der kendes ingen fossiler i Hardeberga Formationen af sådan udformning.

Procenter opgivet i afsnit 3.2.1 viser at bjergarten ikke har nogen nævneværdig porøsitet i sin nuværende form, bortset fra de ucementrede sfæriske strukturer behandlet i denne rapport. Den intergranulare volumen ligger på omkring 20% (Møller & Friis 1999) og rhombohedral pakning af solide kugler efterlader en minimumsporøsitet på 25,95% (Neuendorf, James P. Mehl & Jackson 2005).
Det betyder at bjergarten stort set ikke har været kompakteret, før cementen blev afsat. De sidste 6% mindre porøsitet, i forhold til rhombohedral pakning, kan skyldes forskelle i kornstørrelse og irregulær kornform, der kan medføre tættere pakning Det kan også skyldes lille grad af kompaktion. Der er observeret trykopløsning mellem korngrænser, men denne opløsning ligger langs grænser mellem kvartsovervoksninger, og ikke detritale korn. Trykopløsning må derfor have foregået efter kvartscementering.

Undersøgelse af tyndslib samt analyse med SEM, viser tilstedværelse af andre mineraler en kvarts i bjergarten. Møller & Friis (1999) har også fundet anden cement end kvarts, se afsnit 3.2.1. I tyndslib er der observeret noget

der formentlig er lermineraler, mellem kvartskornene, både i cementeret og ucementerede områder. Nogle steder som en slags kappe over kornene i porøse områder og som *dust rimms*.
Røntgenanalyse i SEM giver grundstofsammensætning, der muligvis kunne tyde på tilstedværelse af glauconit eller chlorit. Disse mineraler kan være afsat under tidlig diagenese, inden udfældning af kvarts som cement, da lermineralerne kan findes som *dust rimms* under syntaksiale overvoksninger.

Ifølge Poulsen (1966), kunne strukturerne være opstået ved migration af "gasbobler" fra underliggende bitumenholdige lag. Hvilke bitumenholdige underliggende lag der er tale om, specificeres ikke. Poulsen (1966) behandler ikke emnet nærmere. Der er dog evidens for indhold af pyrobitumen i Hardeberga Formationen på Bornholm, også i Strøby Sandstensbrud (Bruun-Petersen 1973).
Det antages at en gas, efter dannelse, vil bevæge sig op igennem sedimentet af en rute defineret af lithologi eller trykgradienter, mod lavere tryk. Gassen må have haft et højere tryk end porevandet, og skal kunne flytte den omgivende væske, sediment eller begge, under sin opstigning. Der ses ingen deformationsspor under de sfæriske strukturer.
Gassen formodes at indstille sin opstigning, når trykket i boblen er den samme som uden for boblen, eller på grund af lithologiske barrierer. Fordelingen af de sfæriske strukturer er, som demonstreret i afsnit 5, umiddelbart usystematisk og ikke bundet til særlige strata.
Denne migration af gas skal have foregået inden cementering af bjergarten, og mens der stadig har været tilstrækkelig porøsitet til stede, men inden for gasdannelsesvinduet. Måske har gassen lokalt ændret kemien, således at udfældning af kvarts retarderes, men forklarer ikke dannelse af strukturer

som vist på figur 5a. Det har ikke været muligt at finde en eventuel forklaring på, hvordan sådanne gasbobler skulle kunne bevares under givne forhold.

Manglende kvartscement i sfæriske strukturer, og en porøsitet der antages at svare til primærporøsiteten, kunne også tyde på at der har været en tidligere form for konkretionsdannende cement, der senere er blevet opløst. Denne eventuelle cement forhindrede således dannelse af kvarts i porerummene.
Eftersom porøsiteten er bevaret, må denne fjernelse af cement have forgået enten efter kvartscementering, eller i processens slutfase. Hvis fjernelsen har involveret gennestrømmende vand, skal der have været en vis porsøsitet til stede på tidpunktet for fjernelse af cement i de sfæriske struktuterer.
I dag fungerer Hardeberga Formationen som grundvandsreservoir på Bornholm (Nielsen et al. 2006). Permeabiliteten skyldes formentlig sprækker og frakturer, men det må alligevel tages i betragtning at det i dag er muligt at pumpe vand op fra et reservoir bestående af Hardeberga sandsten, og at vand derfor kan strømme i bjergarten. Alternativt kan processen have været diffusiv.
På trods af mangel på cement i de sfæriske strukturer, findes de udbredt fremstående som små toppe. Andre steder er der kun fordybninger tilbage, formentlig efter bortforvitring af materiale. Denne fremtrædende form er derfor næppe et resultat af forvirtring af den omkringlæggende bjergart, med blotlæggelse af strukturerne til følge, som foreslået af Bromley (2002), men et mere oprindelig karakteristikum, som det også ses af de strukturelle forhold skitseret på figur 5b. Det er muligt at dette er opstået som resultat af langsomt voksende konkretioner, der har fortrængt og derformeret det omgivende sediment i processen. De sfæriske struktuere følger ikke de sedimentære strukturer i sandstenen, hvilket også tyder på postdepositionel dannelse.

Et forslag til en tidlig, diagentisk genereret cement kan være carbonat, for eksempel calcit. Hvis det antages at de eventuelt tidligere calcitcementerede noduler optager 10% af sedimentet, vil den mængde biogent materiale der skal have været aflejret sammen med sandet, blot udgøre 3% af hele sedimentmængden (Walderhaug & Bjørkum 1998).
Hvis det også antages at der blev aflejret biogent carbonat sammen med sedimentet, må der have været carbonatdannende organismer til stede, i form af for eksempel skalbærende invertebrater som trilobitter og små brachiopoder. Manglen på skalfragmenter i formationen kan skyldes at carbonaten er blevet opløst og det kan være svært at konstatere om der på et tidligt stadie har været biogent carbonat til stede, da de siliciklastiske korn vil bevæge sig ind og opfylde den plads der tidligere udgjordes af det biogene carbonat. De fleste skalfragmenter består af aragonit eller høj-Mg-calcit, der er mindre stabile end lav-Mg-calcit. Skaller vil derfor i de fleste tilfælde blive opløst og replaceret eller genudfældet som en mere stabil form for carbonat eller et andet mineral, efter dyrets afdød. Enten i skallens oprindelige form, eller transporteret væk med f.eks. strømmende vand.
Carbonaten kan også være kommet fra CO_2 eller HCO_3^- dannet af bakterier dybt under havbunden, ved nedbrydning af organisk materiale. Walderhaug & Bjørkum (1998) mener dog at det er usansynligt at der generelt kan dannes signifikante mængder af calcit på den bekostning.

Det er sandsynligt at der har været organisk materiale til stede i de mellemliggende skifferlag. Der er fundet krybespor i skifferen (se afsnit 5) der formentlig stammer fra græssende dyr, der har afsøgt sedimentet for organisk materiale.

Fordelingen af sfæriske strukturer tyder på, at nuklationen kan være foregået omkring kim bestående af skalfragmenter. Der er også tilstrækkeligt med porerum i centrum af de undersøgte sfæriske strukturer, til at der kan have været plads et sådan fragment. Denne "mangel" på materiale kan være sekundær, og skyldes måske at materialet simpelthen er gået tabt under forarbejdning, f.eks. ved udskæring af prøve med stensav.

7 Konklusion

De observerede strukturer består af sfæriske områder af ucementeret kvartssand, omgivet af kvartscementeret sandsten. Nogle steder er sandet eroderet væk, og har efterladt skålformede hulninger på lagfladerne. Disse porose områder findes usystematisk fordelt i bjergarten, både i top, bund og internt i sandstensbænkene, men der er ikke fundet nogle i skifferen. Der er ikke fundet belæg for at de sfæriske strukturer har nogen relation til sporfossiler af typerne *Skolithos*, *Diplocraterion*, *Planulites* eller lignende, typisk for Hardeberga Formationen. Der er dog fundet sprofossiler der kan være *Planulites* i skifferlagene. Ud fra synspunkterne i afsnit 6 synes hypotesen om gasbobler usandsynlig. De skålformede strukturer observeret i den øvre del af Rispebjerg Led har visse ligheder med dem fundet i Strøby Sandstensbrud, men ikke så overvældende at det på baggrund af indsamlede resultater kan konkluderes at de har samme oprindelse. Yderligere undersøgelser af dette er påkrævet. Det synes mest sandsynligt at strukturerne er et produkt at opløsning af tidligt udfældede konkretioner, der efter opløsning har efterladt områderne ucementerede. Hvilken type cement der har udgjort disse konkretioner bør undersøges nærmere. Der er fremført argumenter for en carbonat-, eventuelt calcitcement.

Litteratur

Bromley, R. G. (2002), 'Field meeting: Bornholm, denmark, 28 august to 4 september, 2000', *Proceedings of the Geologists' Association* (113), 77–88.

Bruun-Petersen, J. (1973), '"conical structures"in the lower cambrian balka sandstone, bornholm (denmark), and in the lower devonian coblenz sandstone, marburg (western germany)', *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. Monatshefte* (9), 513–528.

Buchardt. B. & Nielsen, A. T. (1985), 'Carbon and oxygen isotope composition of cambro-silurian limestone and anthraconite from bornholm: Evidence for deep burial diagenesis', *Bulletin of the Geological Society of Denmark* **33**. 415–435.

Buchardt, B., Nielsen, A. T. & Schovsbo, N. H. (1997), 'Alun skiferen i skandinavien', *Geologisk Tidsskrift* **3**, 1–30.

Clausen, C. K. & Vilhjálmsson, M. (1986), 'Substrate control of lower cambrian trace fossils from bornholm, denmark', *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (56), 51–68.

Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L. & Michael, J. (2003), *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 3 edn, Springer.

Gravesen, P. (1996), *Geologisk set: Bornholm*, 1. edn, Geografforlaget.

Hamberg, L. (1990), Tidevands- og stormdominerede aflejringsmiljøer i den nedre kambriske hardeberga formation i skåne og på bornholm, *in* 'Årsskrift for 1987-89', Dansk geologisk Forening, pp. 15–20.

Hamberg, L. (1991), Tidal and seasonal cycles in a lower cambrian shallow marine sandstone (hardeberga fm.) scania, southern sweden, *in* D. Smith, G. Reinson, B. Zaitlin & R.A.Rahmani, eds, 'Clastic tidal sedimentology', Vol. 16, Canadian Society of Petroleum Geologists, pp. 255–274.

Hansen, K. (1936), *Die Gesteine des Unterkambriums von Bornholm*, Vol. 62 of *II*, Danmarks Geologiske Undersøgelse.

Møller, L. N. N. & Friis, H. (1999), 'Petrographic evidence for hydrocarbon migration in lower cambrian sandstones, bornholm, denmark', *Danmarks Geologiske Undersøgelse* **45**(2).

Neuendorf, K. K., James P. Mehl, J. & Jackson, J. A. (2005), *Glossary of Geology*, 5 edn, Springer Science & Business. American Geological Institute.

Nielsen, A. T., Klitten, K. & Hansen, H. P. B. (2006), 'Borggård-1 - ny stratigrafisk kernboring på bornholm', *Geologisk nyt* (6), 18–24.

Nielsen, A. T. & Schovsbo, N. H. (2007), 'Cambrian to basal ordovician lithostratigraphy in southern scandinavia', *Bulletin of the Geological Society of Denmark* (53), 47–92.

Poulsen, M. L. K., Svendsen, J. & Friis, H. (2000), 'Naturbornholm og hadeborgprofilet - en geologisk lokalitet ved naturbornholm', *Geologisk Nyt* (5), 9–11.

Poulsen, V. (1966), 'Cambro-silurian stratigraphy of bornholm', *Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening* **16**, 117–137.

Surlyk, F. (1980), 'Phanerozoic dynamic stratigraphy', *Geology of the european countries Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden. Dunod, and Comité National Francaís de Géologie (C.N.F.G.) on the occasion of the 26th International Geological Congress* p. 50.

Vejbæk, O. V., Stouge, S. & Poulsen, K. D. (1994), 'Palaeozoic tectonic and sedimentary evolution and hydrocarbon prospectivity in the bornholm area', *Danmarks Geologiske Undersøgelse* **serie A**(34).

Værdifulde geologiske områder (2008), Miljøministeriet - By- og Landskabsstyrelsen. URL:http://www.blst.dk/NR/rdonlyres/DDC986A5-CD0A-401D-9BAF-821276DCE3F9/67183/Bornholm.pdf.

Walderhaug, O. & Bjorkum, P. (1998), Calcite cement in shallow marine sandstones: growth mechanisms and geometry, *in* S. Morad, ed., 'Carbonate Cementation in Sandstones', Vol. 26, Blackwell Science, pp. 179–192.