



Denne SRP-besvarelse lever i høj grad op til kravene om korrekt formalia. Der kan dog være eksempler på afvigelser herfra.

Resumé

I denne opgave undersøges klimaforandringernes påvirkning af havet som økosystem. Opgavens fokus er på forsuren af verdenshavene, og der redegøres derfor i opgaven for de fysiske og kemiske forhold, som har betydning for denne forsuren, samt hvilke konsekvenser den har for konkrete økosystemer i havet. Det konkluderes, at havets komplekse kemiske miljø ændres af den stigende koncentration af kuldioxid i atmosfæren. Ændringer, som har store konsekvenser for kalkdannende organismer, hvorfor opgaven særligt behandler konsekvenserne for organismer som muslinger og koraller samt økosystemerne muslinge- og koralrev. For at illustrere udvalgte aspekter af forsuren og konsekvenserne for netop kalkdannende organismer designes forsøg, hvorefter de og resultaterne beskrives, analyseres og diskuteres. På baggrund af forsøgene kan det konkluderes, at CO_2 , der opløses i vand, medfører et fald i pH, og at des surere miljøet er, des hurtigere opløses kalk heri. Derudover beskrives en anvendt biologisk metode, der er blevet anvendt til at vurdere forsurenens konsekvenser for et økosystem i havet. Her konkluderes, at metoden påviste eksperimentel forsurens indflydelse på de udsatte muslingers afkom, hvis populationsstørrelse blev mindre. Efterfølgende vurderes metoden, som er et laboratorieforsøg, til at være særligt brugbar grundet den store variabelkontrol. Slutteligt diskuteres forsurenens konsekvenser for havet som økosystem nu og i fremtiden, og opgaven konkluderer, at en større forsuren af havet er forventelig, hvilket vil medføre dårlige levevilkår for de kalkdannende organismer. Biodiversiteten i havet vil deraf mindskes, og dette vil påvirke havets fødenet i stor grad. Det konkluderes ydermere, at disse konsekvenser vil have en selvforstærkende effekt på havet og klimaforandringerne.



Indholdsfortegnelse

Resumé	1
1.0 Indledning.....	3
2.0 Carbonkredsløbet - reservoirer i ubalance.....	3
3.0 Havets kemiske miljø	4
3.1 Henrys lov - gassers opløselighed i vand	4
3.2 Et surere hav	5
3.2 Temperatur og fysiske forhold	5
3.4 Puffersystemet i havet	6
3.5 De fysiske og kemiske forhold - delkonklusion	7
4.0 Det sure liv - konsekvenser for kalkdannende organismer.....	7
4.1 Karbonat - den livsvigtige anion	7
4.2 Muslinger - havets ingeniører.....	9
4.2.1 Biologiske konsekvenser	9
4.2.2 Muslingerevet - forsuringens konsekvens	9
4.3 Koraller og furealger - mutualistisk symbiose.....	10
5.0 Aspekter af forsuringen - en analyse	11
5.1 Forsøg 1: CO_2 og pH.....	11
5.2 Forsøg 2: Surhedsgradens indvirkning på kalks opløselighed.....	12
6.0 Laboratorieundersøgelse - biologisk metode.....	14
6.1 Metodebeskrivelse	15
6.2 Vurdering af metode - fordele og begrænsninger.....	17
7.0 Havet som økosystem nu og i fremtiden	17
7.1 Konsekvenserne står i kø.....	17
7.2 Perspektivering: Konsekvenser for mennesket.....	19
8.0 Konklusion	20
Litteraturliste	21
Bilag	22
Bilag 1: Øvelsesvejledning og data til forsøg 1	22
Bilag 2: Øvelsesvejledning og data til forsøg 2.....	26

1.0 Indledning

Klimaforandringer er en kompleks størrelse med mange forskellige aspekter, der påvirker liv overalt på jorden. Konsekvenserne, som den stigende koncentration af kuldioxid i atmosfæren medfører, er alvorlige, men grundet særligt én faktor er effekten blevet begrænset; havet. Indtil nu har organismer i havet levet i samliv med hinanden og deres omgivelser, hvilket omtales som havets økosystem. Samlivet og funktionen af dette økosystem trues dog af klimaforandringerne, som havet, og dets levende organismer, selv modvirker ved at optage atmosfærens kuldioxid. Der hersker nemlig en direkte sammenhæng mellem koncentrationen af kuldioxid i henholdsvis atmosfæren og i havet. Udviklingen i denne sammenhæng siden industrialiseringen har resulteret i en forsurening af verdenshavene, der har omfattende indflydelse på livet i havet samt en tilbagevirkende øget effekt af klimaforandringerne. Netop forsuringen er fokus for denne opgave. Mere specifikt vil der i følgende blive redegjort for de fysiske og kemiske forhold, som har betydning for forsuringen af havet, og hvad ændringerne i disse har af konsekvenser for konkrete eksempler på organismer og økosystemer i havet. Som eksempler benyttes særligt kalkdannende organismer, som muslinger og koraller, grundet deres store indflydelse på havets optag af kuldioxid og dermed forsuringen. Hertil illustreres nogle af forsuringens aspekter og betydningen for netop kalkdannende organismer gennem opstillingen af selvdesignede forsøg. Desuden inddrages en anvendt biologisk metode, der bruges til at vurdere forsuringens konsekvenser for et økosystem i havet, idet metoden beskrives og efterfølgende vurderes. Slutteligt diskuteres forsuringens konsekvenser for havet som økosystem nu og i fremtiden kort. Fokus i opgaven er valgt ud fra den fremtrædende sammenhæng, der er mellem den stigende koncentration af kuldioxid i atmosfæren, udviklingen i havets kemiske og fysiske miljø, dets påvirkning af organismene i havet og den tilbagevirkende effekt som konsekvenserne har for klimaforandringerne. Det er denne sammenhæng som i opgaven vil blive gransket ved brug af biologi- og kemifaglige metoder.

2.0 Carbonkredsløbet - reservoirer i ubalance

Essentielt for forståelsen af klimaforandringernes påvirkning af havets kemiske miljø er carbonkredsløbet. Kredsløbet beskriver, hvordan carbon, der indgår i en lang række forskellige kemiske forbindelser, findes i såkaldte reservoirer som fx søer, have og atmosfæren, og hvordan det transporteres imellem disse reservoirer.¹ Stofstrømmene, som disse transporteringer kaldes, har gennem lang tid været i balance, så der bliver tilført og afgivet lige meget stof, hvilket er afgørende for livsprocesserne overalt på kloden. Netop denne balance er dog følsom, og specielt siden industrialiseringens begyndelse har mennesket påvirket den. Aktiviteter som afbrændingen af fossile brændstoffer og fældningen af regnskove har fået de samlede emissioner af CO_2 til at vokse eksponentielt med en årlig vækst på 3,4% siden år 2000 - og heri består ubalancen.²

¹ Nyvad, Anette & Henrik Parbo (2010): 43

² Nyvad, Anette & Henrik Parbo (2010): 49

Den enorme mængde CO_2 , som vi mennesker har produceret, har dog ikke resulteret i en tilsvarende stigning i atmosfærens indhold af CO_2 , hvilket i høj grad skyldes havet, der dækker ca. 70% af jordens overflade, og som har optaget omkring halvdelen af den 'ekstra' CO_2 .³ Dette optag skyldes dels kemiske forhold, der i senere afsnit vil blive beskrevet og dels den mekanisme, som kaldes 'den biologiske pumpe'. Mekanismen, der i al sin enkelthed går ud på, at bl.a. oceanernes planktonalger og kalkdannende organismer optager og omdanner CO_2 , hvorefter det, som en del af deres livscyklus, ved deres død transporteres til havbunden.⁴

3.0 Havets kemiske miljø

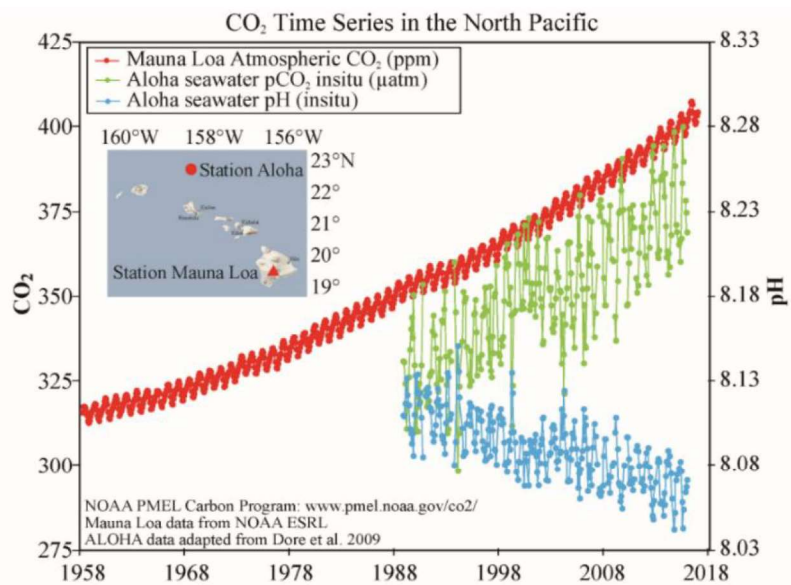
Dette optag af CO_2 fra atmosfæren, som er en del af den delsløjfe i carbonkredsløbet, der består af udvekslingen af CO_2 mellem havet og atmosfæren, er dog under pres, da optaget medfører ændringer i havets kemiske miljø. Én af disse ændringer er en øget surhedsgrad i havet, som populært sagt kaldes forsuring. I det følgende vil de fysiske og særligt kemiske forhold, der har betydning for dette fænomen, blive redegjort for.

3.1 Henrys lov - gassers opløselighed i vand

Som tidligere nævnt stiger koncentrationen af CO_2 i atmosfæren, hvilket medfører, at havet absorberer mere CO_2 . Denne sammenhæng følger Henrys lov, der lyder: "Opløseligheden af en gas i en væske er proportional med gassens partialtryk over opløsningen."⁵

Figur 1 påviser tydeligt, hvordan denne lov gør sig gældende i praksis i forbindelse med det stigende indhold af CO_2 i atmosfæren (rødt data) og den tilsvarende stigning i havvandets CO_2 indhold (grønt data). Sammenholdes dataene med vandets pH-værdi, er det påfaldende, at der sker et fald i denne. Men hvorfor betyder en større koncentration af CO_2 i havet et surere miljø?⁶

Det skyldes blandt andet den kemiske ligevægt, der indstiller sig mellem carbondioxid i atmosfæren og carbondioxid i overfladevandet:



Figur 1: Udviklingen af carbondioxid i atmosfæren og havet og dens effekt på havets pH-værdi. Kilde: Se fodnote 6

³ Richardson, Katherine & Lone Thybo Mouritsen (2006): 6

⁴ Vire, Anne-Mette m.fl. (2012): 30

⁵ Axelsen, Vibeke m.fl. (2010): 66

⁶ Mathis, Jeremy T. (2019): 4



$$K_H = \frac{[CO_2(aq)]}{p(CO_2)} \quad (2)$$

hvor K_H kaldes Henry-konstanten, og det er fra dette udtryk, at Henrys lov er udledt, hvorfor den proportionale sammenhæng ses tydeligt, når ligevægten skrives op på følgende måde:

$$[CO_2(aq)] = K_H \cdot p(CO_2) \quad (3)$$

Henry-konstanten, og dermed også carbondioxidets opløselighed i vand, aftager, når temperaturen hæves⁷, hvilket skyldes, at opløsning af carbondioxid i vand er en exoterm reaktion. Det betyder altså, at der kan opløses mindre carbondioxid i varmt vand end i koldt vand. Den omtalte ligevægt, der indstiller sig mellem atmosfæren og havet, er en såkaldt heterogen ligevægt, hvilket vil sige, at der indgår stoffer i forskellige tilstandsformer. Som følge af 'den biologiske pumpe' fjernes carbondioxid dog fra overfladevandet og transporteres ned på havets bund, og dermed bliver koncentrationen af carbondioxid i overfladevandet mindre. Ligevægten forskydes altså, så havet fortsat kan optage carbondioxid fra atmosfæren. Gennem tiden har denne biologiske transport af carbondioxid til havets bund været så effektiv, at en reel ligevægt aldrig er opnået.⁸

3.2 Et surere hav

Når havet af denne grund fortsætter med at optage CO_2 fra atmosfæren, frigives flere hydroner (H^+), som følge af reaktionerne:



Herefter afgiver kulsyren en hydron og danner bikarbonat:



pH - eller surhedsgraden - angiver koncentrationen af hydroner, og jo højere koncentration er, des lavere er pH-værdien. Forsuringen opstår altså idet, der konstant frigives flere hydroner i havet som følge af kulsyre-reaktionen (5), som afhænger direkte af den stigende koncentration af carbondioxid i atmosfæren (3). Hvis denne udvikling fortsætter, forventes et fald på 0,5 pH-enheder inden år 2100, hvilket svarer til en tredobling i koncentrationen af hydroner i havet.⁹

3.2 Temperatur og fysiske forhold

Det fremgår altså nu, og vil blive uddybet senere, at CO_2 optræder på forskellige former i havet, hvoraf 91% findes som bikarbonat (HCO_3^-). Denne høje koncentration af base giver havet evnen til at fungere som puffer, hvilket præsenteres nærmere senere (afsnit 3.4), mod ændringer i pH, og koncentrationen af baser refereres herefter i opgaven til som havets totale alkalinitet. Begrebet dækker netop over evnen til at neutralisere en syre. Des større koncentration af baser, des større total alkalinitet, og derfor mindskes denne altså, når der frigives hydroner i havet (5), da de reagerer med de negativt ladede baser. Denne række af reaktioner, som den menneskeskabte CO_2 har

⁷ Axelsen, Vibeke m.fl. (2010): 66-67

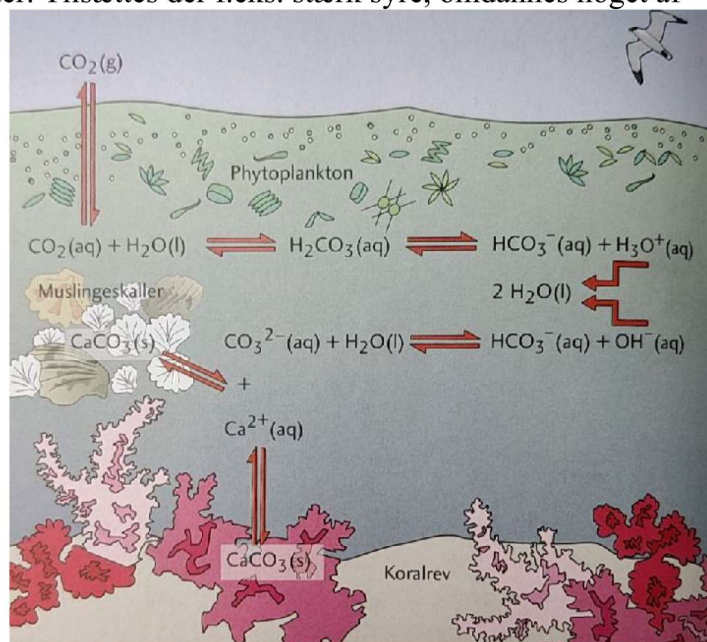
⁸ Nyvad, Anette & Henrik Parbo (2010): 55-57

⁹ Richardson, Katherine & Lone Thybo Mouritsen (2006): 5

medført, er dog ikke den eneste tendens, der forårsager et fald i koncentrationen af baser. Stigninger i afstrømningen fra gletschere og smeltningen af havis, som begge er processer, der delvist er blevet accelereret af mennesket, mindsker havets totale alkalinitet og er altså også medvirkende til forsuren. Både 'gletscher-afstrømning' og smeltet havis har lave koncentrationer af total alkalinitet, så når de blandes med overfladevand, reducerer de havets totale alkalinitet og fortynder havvandets koncentration af baser.¹⁰ Smelteprocesserne, som mindsker havets evne til at stå imod ændringer i pH, kan tilskrives havets stigende temperatur, der som nævnt også skyldes den menneskeskabte udledning af CO_2 i atmosfæren. Drivhusgassen tillader ikke solens reflekterede langbølgede varmestråling at passere, hvorfor resultatet bliver en opvarmning af kloden.¹¹ Generelt har den stigende temperatur en lang række konsekvenser for havet som økosystem, men i dette behandles udelukkende dets indflydelse på forsuringen.

3.4 Puffersystemet i havet

Havets pufferegenskaber har betydet, at pH i havet i millioner af år har haft en værdi på ca. 8. En pufferopløsning indeholder en ikke-stærk syre og dens korresponderende base, hvilket er tilfældet i verdenshavene, der netop indeholder kulsyre (H_2CO_3) og dens korresponderende base HCO_3^- . Puffersystemet har evnen til at stabilisere pH-værdien, idet den kan neutralisere tilsætning af stærk syre eller stærk base i mindre mængder. Tilsættes der f.eks. stærk syre, omdannes noget af pufferens base til den korresponderende syre og omvendt, hvorfor det er klart, at pufferkapaciteten - opløsningens evne til at modvirke pH-ændringer, er stor, når koncentrationen af både syren og den korresponderende base er høje og næsten lige store. Det betyder altså, at pufferkapaciteten i havet er forholdsvis lille, da koncentrationen af HCO_3^- er meget højere end H_2CO_3 .¹² Grunden til, at pH-værdien har ligget så stabilt i mange år kan derimod tilskrives den store totale alkalinitet, som bliver ved med at neutralisere hydroxiderne, men i høj grad også det faktum, at havvandets bikarbonat er i ligevægt med atmosfærens carbondioxid og havbundens aflejring af calciumcarbonat.



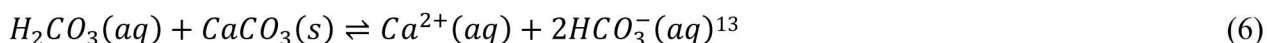
Figur 2: Bikarbonat i ligevægt. Kilde: Se fodnote 12

Som tidligere nævnt betyder en øget koncentration af carbondioxid i atmosfæren en større koncentration af kulsyre i havet. Her træder ligevægten dog ind. Calciumcarbonat opløses nemlig af kulsyren, som det fremgår af figur 2, og omdanner den til bikarbonat ved afgivelse af en hydron:

¹⁰ Mathis, Jeremy T. (2019): 3

¹¹ Vire, Anne-Mette m.fl. (2012): 32

¹² Nyvad, Anette & Henrik Parbo (2010): 62-63



3.5 De fysiske og kemiske forhold - delkonklusion

Det konkluderes dermed, at det bl.a. er grundet denne ligevægt og den totale alkalinitet, at havet i mange år har kunnet modvirke ændringer i surhedsgraden. Men hastigheden, hvormed kuldioxid optages og omdannes i havet i nyere tid, er så høj, at selv ikke havets meget komplekse kemiske miljø kan følge med. Udviklingen i koncentrationen af hydroner i havets overfladevand påvirker ikke kun den totale alkalinitet, men også bikarbonat-ligevægten (6), hvilket nu vil blive set nærmere på. Alt i alt en ond spiral, der, som mange andre sammenhænge i naturen, har faktorer, der påvirker hinanden gensidigt. Resultatet af de ændrede kemiske og fysiske forhold: Først og fremmest et fald i pH, men hvilke konsekvenser har det for det marine liv?

4.0 Det sure liv - konsekvenser for kalkdannende organismer

Et surere kemisk miljø i havet påvirker en stor del af det marine liv. Fødekæder, næringstilgængelighed og hele økosystemer trues, mens enkelte organismer og processer trives bedre under disse vilkår. Noget af det liv, der i særlig grad rammes negativt, er de kalkdannende organismer, og med udgangspunkt i konkrete eksempler på sådanne vil nogle af forsuringens konsekvenser for økosystemer i havet i det følgende blive redegjort for.

4.1 Karbonat - den livsvigtige anion

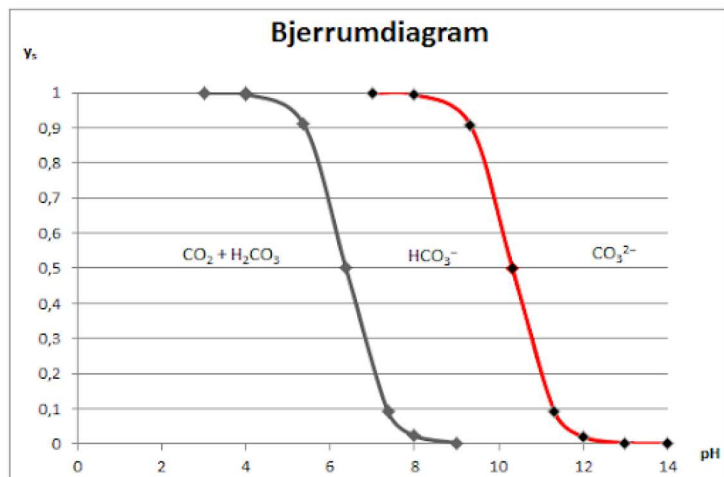
De kalkdannende organismer findes på de fleste trofiske niveauer i havets økosystem. Der er både primærproducenter som kalkflagellater og konsumenter som muslinger og koraller. Som bekendt strømmer energien gennem de forskellige niveauer i økosystemet, og per definition er alle organismerne afhængige af hinanden og det omgivende miljø. Ændringer i populationsstørrelser, biodiversitet eller dødelighed har derfor afgørende indflydelse på forskellige mekanismer i økosystemet og dets funktioner.¹⁴ Netop disse ændringer ses som konsekvenser i havet, når pH falder og koncentrationen af hydroner stiger. Disse reagerer nemlig med karbonationerne i vandet og danner bikarbonat:



¹³ Nyvad, Anette & Henrik Parbo (2010): 65-66

¹⁴ Vire, Anne-Mette m.fl. (2012): 13

Koncentrationen af karbonat falder dermed, når CO_2 opløses i havet, hvilket for det første mindsker havets totale alkalinitet en smule, men også har en anden afgørende konsekvens.¹⁵ Forinden denne granskes, fremgår sammenhængen mellem den relative fordeling af de former, som CO_2 findes på i havet, og vandets pH-værdi af figur 3. Ved havets pH-værdi på omkring 8 ses det, hvordan stort set alt findes på form som bikarbonat. Yderligere viser bjerrumdiagrammet tydeligt, at hvis pH falder yderligere bliver koncentrationen af karbonat endnu mindre.¹⁶¹⁷



Figur 3: Bjerrumdiagram for kulsyre. Kilde: Se fodnote 15

Ved forsurening falder koncentrationen af karbonat altså, og det er denne mangel på karbonationer, som hæmmer de kalkdannende organismers mulighed for at danne kalciumkarbonat, som de bl.a. bruger til at opbygge skaller og skeletter. Følgende ligevægt beskriver dannelsen og opløsningen af kalciumkarbonat:

← *Dannelse af $CaCO_3$*



Opløsning af $CaCO_3$ →

Af ligevægten fremgår det, hvordan den faldende koncentration af karbonat forskyder ligevægten mod højre og altså fremmer opløsningen af skaller og skeletter hos kalkdannende organismer, mens dannelsen af kalciumkarbonat hæmmes. Denne forskydning formindsker virkningen af den faldende koncentration af karbonat og kan beskrives ved det generelle princip:

”Et ydre indgreb i et ligevægtssystem fremkalder en forskydning, som *formindsker* virkningen af indgrebet.”¹⁸

Reglen kaldes Le Chateliers princip, og i dette tilfælde er det ydre indgreb altså menneskets udledning af CO_2 til atmosfæren, som forårsager en faldende koncentration af karbonat. Dette fremkalder derfor en forskydning, som formindsker virkningen af dette indgreb ved altså at opløse kalciumkarbonat. En sådan kalkdannende organisme, der påvirkes af denne forskydning, kunne fx være de mikroskopiske kalkflagellater, der afstøder kalkplader, hvis densitet er større end havvandets og altså synker til bunds. Kalkflagellaterne tager altså del i mekanismen ’den biologiske pumpe’ og den vigtige transport af CO_2 fra overfladen til havets bund, hvorfor det er yderst kri-

¹⁵ Richardson, Katherine & Lone Thybo Mouritsen (2006): 5

¹⁶ Sivebæk, Birte (2013): ”Bjerrumdiagram for Kulsyre”

¹⁷ Nyvad, Anette & Henrik Parbo (2010): 65

¹⁸ Axelsen, Vibeke m.fl. (2010): 41

tisk, hvis forsuren truer deres eksistens. Ingen ved endnu helt med sikkerhed, hvordan kalkflageletterne vil reagere på ændringerne i surhedsgraden, men laboratorieundersøgelser tyder på voldsomme misdannelser i kalkstrukturerne.¹⁹

4.2 Muslinger - havets ingeniører

Et konkret eksempel på en organisme, hvor den biologiske indflydelse af forsuren kendes, er muslinger, og i det følgende vil disse biologiske konsekvenser blive koblet til ændringer i de funktioner, som økosystemet muslingerev har.

4.2.1 Biologiske konsekvenser

Muslinger er kalkdannende organismer, der altså bruger calciumkarbonat i deres strukturer. Stadiet, hvor muslinger gennemgår deres tidlige udvikling, er identificeret som særligt sårbar overfor forsuren, som har potentialet til at ændre populationsstørrelse og -dynamikker. Mange forsøg, hvoraf ét af dem vil blive beskrevet i et senere afsnit, har derfor undersøgt muslingers 'larvestadie' for dets respons på forsuren. Konsekvenserne inkluderer bl.a. reduceret sperm-mobilitet og fertiliseringssucces, og da opbygningen af skal begynder i dette stadie og har enorm betydning for beskyttelse, anskaffelse af mad, pH regulering m.m. er påvirkningen af denne 'kalcificering' kritisk. Det resulterer i misdannelse af skallen, reduceret vækst og svagere skeletter, hvorfor muslingelarver i de potentielle fremtidige vilkår vil komme til at opleve højere dødelighed, mindre kropsstørrelse og ændrede skal-egenskaber. Desuden stresser forsuren de individuelle muslinger, da de forsøger at regulere eller opretholde fysiologisk funktion, hvilket har indflydelse på i forvejen energikrævende processer som bevarelsen af syre-base balance, bevægelse og opbygningen af skal, der nu behøver yderligere energi. Dette menes at påvirke deres evne til at overleve på senere livsstadier, da deres konkurrenceevne og fitness simpelthen er forværret.²⁰ Muslingers dødelighed under naturlige vilkår i deres miljø overgår normalt 90%, hvorfor påvirkning af fitness i 'larvestadiet' kan have enorm betydning i forbindelse med størrelsen af den voksne population. Faktisk taler man om, at en reel flaskehals-effekt er realistisk, hvor antallet af individer mindskes kraftigt og dermed også genfrekvensen. Altså vil den genetiske variation og biodiversiteten blive mindre. Slutteligt kan det tilføjes, at selvom voksne muslinger ser ud til bedre at kunne modstå forsuren, så opleves nogle af de samme konsekvenser her; større skal-opløselighed, højere dødelighed og mindre skal-densitet.²¹

4.2.2 Muslingerevet - forsurens konsekvens

Hvad betyder det så for muslingerevet som økosystem og dets funktioner? Det er naturligvis stadig relativt uklart præcist hvilke konsekvenser, forsuren vil have på populations- og økosystemniveau, men det forventes, at der vil blive en form for restrukturering med både 'vindere' og 'tabere'. De interspecifikke interaktioner mellem de forskellige trofiske niveauer menes for eksempel at blive ændret, da muslinger bliver mere sårbare over for prædation. Påstanden bygger bl.a. på undersøgelser, der har vist, at rovfisk konsumerede flere muslinger i forsuret miljø end i et

¹⁹ Richardson, Katherine & Lone Thybo Mouritsen (2006): 6

²⁰ Lemasson, Anaëlle J. m.fl. (2017): 50

²¹ Lemasson, Anaëlle J. m.fl. (2017): 51

kontrol miljø, hvilket igen menes at være grundet det øgede energibehov hos rovfiskene. De formodede ændringer byder både på tab af biodiversitet, mindre klima-regulering og lavere grad af kystbeskyttelse, hvilket vil blive uddybet kort i det følgende.

Muslinger er både allogene og autogene ingeniører, hvorfor de bidrager med en lang række funktioner. Det kan fremhæves, at de bygger unikke tredimensionelle rev, der fungerer som habitater for mange organismer, hvilket sikrer en stor genetisk variation. Forsuringen kan have direkte negativ indflydelse på denne rev-struktur, som vil ødelægge habitater, skabe flaskehalseffekt og mindske biodiversiteten, da antallet af tilgængelige nicher mindskes. Derudover vil forsuringen i høj grad påvirke muslingernes evne til at sedimentere CO_2 , hvilket er afgørende i reguleringen af klimaet, som det blev fastlagt tidligere. Slutteligt skal det nævnes, at muslingerev yder beskyttelse mod erosion og stabiliserer kystlinjer, hvilket er én af de mest værdifulde funktioner, som økosystemet bidrager med. Evnen trues dog netop af forsuringens reduktion af revets størrelse, der vil nedsætte effekten.²²

At muslingerevet som økosystem er truet af forsuringen står altså udenfor diskussion, men i hvilket omfang og i hvor høj grad kan kun tiden vise. Ændringerne i de funktioner, som det bidrager med, vil alle have stor indflydelse på havet som økosystem, men særligt den reducerede klima-regulering er interessant, da det er medvirkende til en kaskadeeffekt, som får konsekvenser for en lang række organismer; heriblandt koraller og deres symbiotiske partner: furealgen.

4.3 Koraller og furealger - mutualistisk symbiose

Kaskadeeffekten bunder i den mindskede effekt af 'den biologiske pumpe', da muslingerevet potentielt ikke vil kunne optage og omdanne CO_2 i samme grad. Herved kan havet ikke længere optage CO_2 fra atmosfæren i samme grad, da ligevægten ikke forskydes så meget som tidligere, hvorfor drivhuseffekten vil forstærkes. Dermed stiger temperaturen på jorden, og altså også i havet. Nogle af konsekvenserne ved den stigende temperatur er allerede blevet omtalt, men det har også en afgørende indvirkning på den mutualistiske symbiose imellem koraller og furealgen.

Ved mutualistisk symbiose er samlivet til gensidig fordel for begge parter, hvilket altså er tilfældet mellem furealgen og koraller.²³ Furealger er autotrofe, hvilket vil sige, at de selv kan danne næringsstoffer ved fotosyntese, mens koraller er heterotrofe, dvs. at de er afhængige af energi udefra. Da lavvandede tropiske havområder er ekstremt næringsfattige, er der altså opstået et behov for korallen, og herved er symbiosen startet. Furealgerne forsyner korallerne med energi og medvirker til dannelsen af deres kalkskelet, mens korallerne yder beskyttelse.²⁴ Furealgerne er dem, som giver farve til de ofte meget flotte og farverige koralrev.

Men bliver korallerne udsat for høje temperaturer over en længere tidsperiode, frastøder de furealgerne, hvorefter de fremstår hvide. Fænomenet kaldes: koralblegning. For det meste kommer ko-

²² Lemasson, Anaëlle J. m.fl. (2017): 52-58

²³ Vire, Anne-Mette m.fl. (2012): 49

²⁴ Vire, Anne-Mette m.fl. (2012): 167

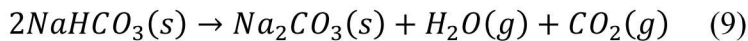
rallerne sig, da algerne vender tilbage, men i de mest ekstreme tilfælde, og hvis temperaturstigningen fortsætter, vil koralrevne dø.²⁵ F.eks. døde 90% af koralerne ved Seychellerne i 1988 grundet varmere havtemperaturer²⁶

5.0 Aspekter af forsuren - en analyse

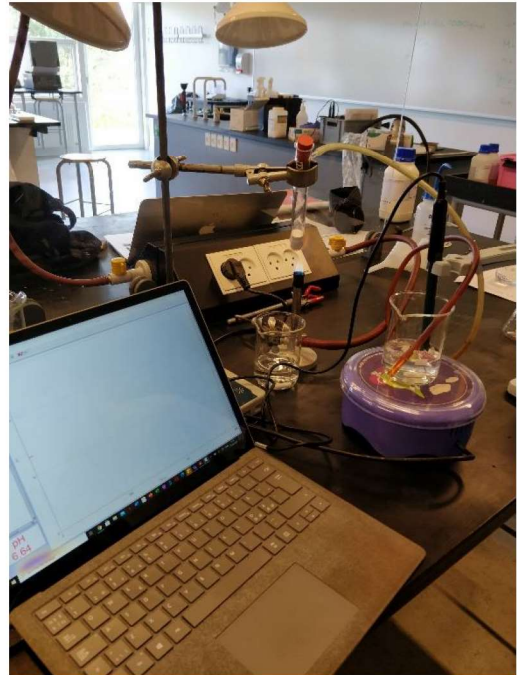
Det er nu blevet afdækket, hvilke fysiske og kemiske forhold, der har betydning for forsuren af havet, samt nogle af de konsekvenser denne har for bestemte økosystemer i havet. I det følgende vil udvalgte aspekter af forsuren og dens påvirkning af kalkdannende organismer blive illustreret ved beskrivelsen af udførte forsøg, som jeg selv har udviklet og opstillet, og anvendelse af dertilhørende data.

5.1 Forsøg 1: CO_2 og pH

Med det formål at illustrere faldet i pH-værdi, når CO_2 opløses i vand, opstilledes et forsøg, hvor vandhanevand henholdsvis blev og ikke blev gennemboblet med kuldioxid over en periode på 200 sekunder. Forsøgsopstillingen fremgår af figur 4. Ved at afbrænde natron ($NaHCO_3$) produceres kuldioxid på gasform som følge af reaktionen:



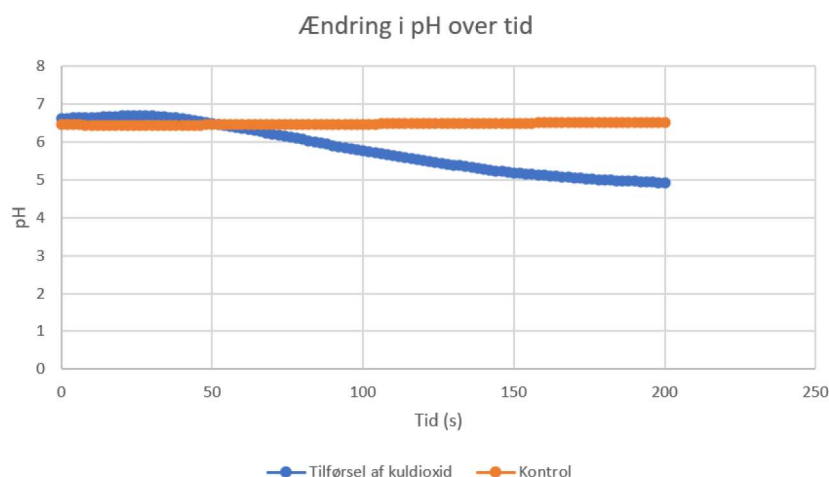
Gennem en slange blev kuldioxiden tilført vandhanevandet i bægerglasset, hvorefter pH-værdien blev målt med et pH-meter og data opsamlet i LoggerPro. Det tilføjes, at vanddampen fortættedes og derfor ikke blev tilført bægerglasset. Herefter udførtes et kontrolforsøg med samme fremgangsmåde blot uden tilførsel af kuldioxid. Alle datapunkter i begge måleserier fremgår af bilag 1, og nedenfor ses de afbilledet grafisk i figur 5:



Figur 4: Forsøgsopstilling til at illustrere fald i pH

²⁵ Ukendt forfatter (2016): 1:30-3:00

²⁶ Ukendt forfatter (2021): "Koralblegning"



Figur 5: Grafisk afbildning af data fra forsøg 1: tilførsel...

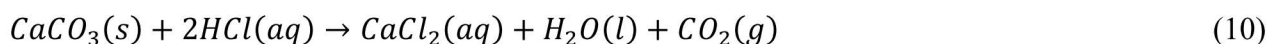
Det ses tydeligt, hvordan kontrolforsøgets pH-værdi ikke ændres i løbet af tidsperioden, mens vandet, hvor kuldioxid tilføres, oplever et fald i pH-værdi på op mod 1,5 enheder. Desuden bemærkes det, at grafens hældning er forholdsvis flad i starten, og at den stagnerer mod enden, hvilket bl.a. kan tilskrives, at temperaturen i starten skulle blive høj nok til, at forbrændingen kunne foregå, mens mængden af natron gjorde, at der i slutningen ikke blev dannet mere kuldioxid. Det pointeres dog, at resultatet ikke er helt sammenligneligt med opløsning af CO_2 i havvand, da havet, som tidligere nævnt, har en forholdsvis høj total alkalinitet samt både har pufferegenskaber og en kemisk ligevægt, der til en vis grad kan neutralisere syre-tilsætning. Dette må naturligvis omtales som en begrænsning i den valgte metode. Ud fra formålet, at illustrere faldet i pH-værdi - et aspekt af forsurening - når CO_2 opløses i vand, har resultatet dog stadig en rigtig fin relevans, så længe det haves in mente, at et så kraftigt fald på så kort et tidsrum ikke vil kunne opleves i havet grundet dets kemiske egenskaber.

Med reference til reaktionerne (4) og (5) bliver det altså i forsøget illustreret, at opløsning af CO_2 i vand medfører et fald i pH-værdi, da der frigives hydroner. Det er denne forsurening - blot i mindre grad og over længere tid - der opleves i verdenshavene, og som potentielt kan medføre katastrofale konsekvenser for økosystemer og organismer; herunder de kalkdannende.

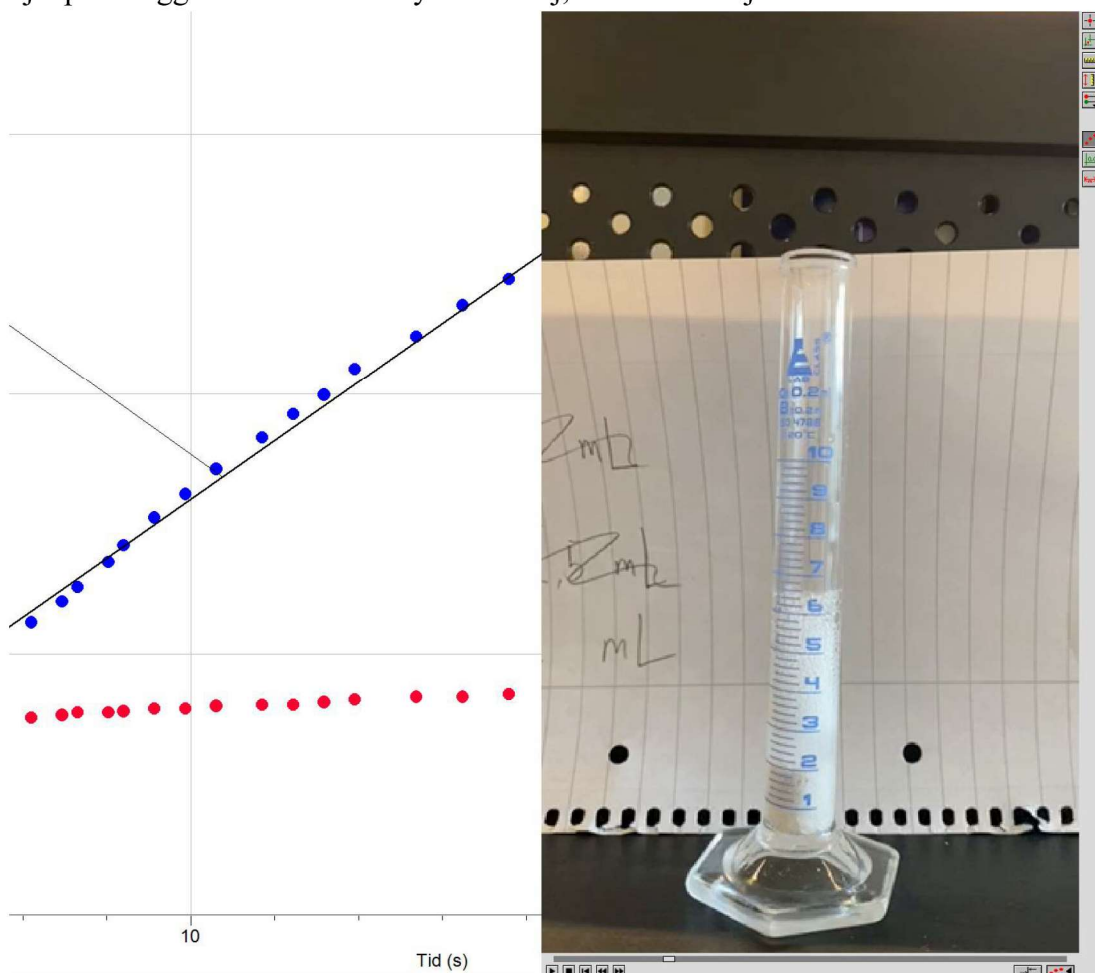
5.2 Forsøg 2: Surhedsgradens indvirkning på kalks opløselighed

For netop at undersøge én af disse konsekvenser for de kalkdannende organismer udførtes et forsøg med fokus på opløsningen af kalk i surt miljø. Formålet var at undersøge, hvorvidt kalk opløses hurtigere des surere miljøet er - en sammenhæng, som blev omtalt tidligere.

Til forsøget blev tavlekridt, som er en form for kalksten og derfor oplagt til undersøgelsen, brugt, hvor dets opløsning i miljøer af varierende surhedsgrad med hhv. $pH=0$, $pH=0,125$ og $pH=0,3$ blev observeret. De små, men helt lige store, stykker tavlekridt (2 cm høje) droppes ned i opløsningerne, som det ses på figur 6, alt imens en video af reaktionen optages. Videoen skulle nemlig gøre det muligt at logge skumudviklingen i reaktionen, idet den må være direkte proportional med reaktionshastigheden:

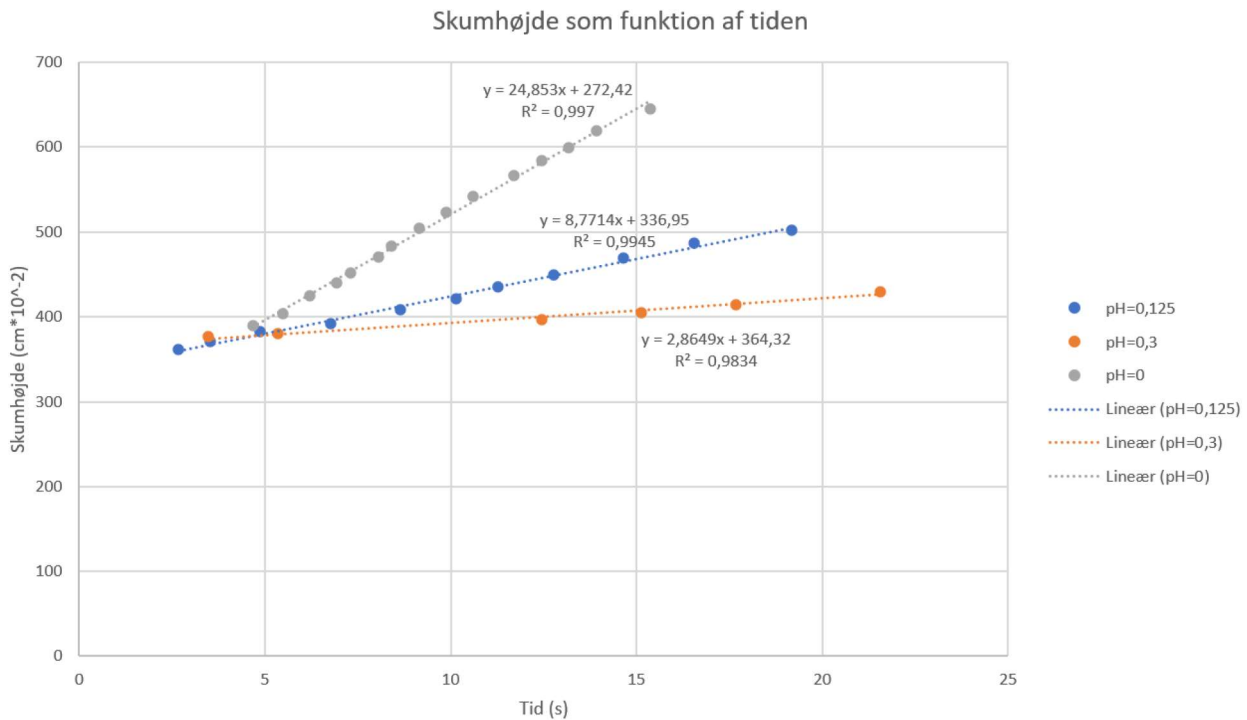


Forholdende mellem koefficienterne for henholdsvis calciumkarbonat og kuldioxid er 1:1, hvorfor skumhøjden kan bruges som indikator for reaktionshastigheden. Data-opsamlingen foregik ved hjælp af LoggerPro's videoanalyse værktøj, hvor skumhøjden blev markeret frame for frame.



Figur 6: logning af skumhøjde

Efter endt videoanalyse ved hver af de tre opløsninger var det muligt at udføre en lineær regressionsanalyse på måleserierne. Det bemærkes, at metodens præcision angående samme mængde af observationer og helt samme tidsintervaller ikke er helt perfekt, men da formålet var at tydeliggøre den mulige tendens, at reaktionshastigheden var større des surere miljø, anses dette ikke som en metodisk begrænsning. Metodens styrke må dog tværtimod være, at reaktionshastigheden gøres håndgribelig, da forskellen imellem opløsningerne kan observeres med det blotte øje, idet skumudviklingen udnyttes, og der bruges meget lav pH-værdi. For at fremhæve den nævnte tendens er regressionsanalysen begrænset til det tidsinterval, hvor der stadig kan observeres en målbar proportional udvikling. Observationerne begynder dog først efter intervallet 3-5 sekunder grundet variation i, hvor lang tid, der gik før kridtet blev droppet i opløsningerne. Nedenfor ses resultaterne, hvoraf hele datasættet fremgår af bilag 2, behandlet i figur 7:



Figur 7: Skumhøjde som funktion af tiden

Resultaterne viser tydeligt, hvordan reaktionshastigheden (tendenslinjernes hældningskoefficienter) bliver større, når pH falder. Kalk opløses altså hurtigere des surere miljøet er. Resultaterne er ikke retvisende for miljøet i havet, da pH er meget højere i havet (ca. 8), men tendensen tydeliggøres af den relative forskel mellem de meget lave pH-værdier, hvilket er i tråd med undersøgelsens formål.

Forsøgene illustrerede altså to aspekter af forsuringen, der viste, at opløsning af CO_2 i vand medfører en lavere pH-værdi, og at dette resulterer i en hurtigere opløsning af kalk. Det efterfølgende afsnit vil dog fokusere på en anvendt biologisk metode, som bruges til at vurdere forsuringens konsekvenser for økosystem i havet.

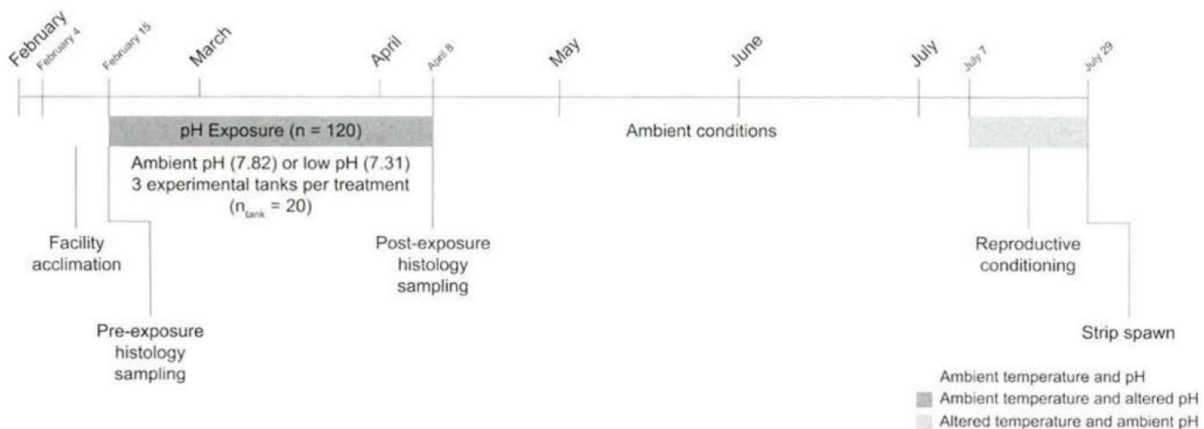
6.0 Laboratorieundersøgelse - biologisk metode

I biologien anvendes forskellige metoder til at undersøge sammenhænge og andre aspekter af den virkelige verden. Et eksempel på en sådan metode er laboratorieundersøgelsen, hvor en opstilling designs for at vise en specifik del af den "virkelige verden". I 2019 udførte en gruppe forskere fra 'University of Washington' netop en laboratorieundersøgelse med det formål at afdække, hvilken effekt forsuring har på flere generationer. Metoden blev altså anvendt til at vurdere forsuringens konsekvenser for en specifik muslingeart, som er en del af en række økosystemer i havet herunder det førnævnte muslingerev. Denne metode vil nu blive beskrevet, hvorefter dens fordele og begrænsninger vurderes.

6.1 Metodebeskrivelse

Mere specifikt søger undersøgelsen at bestemme, hvordan muslingelarver af stillehavsarten *C. Gigas* påvirkes af forældrenes udsættelse for midlertidig eksperimentel forsuring inden de danner kønsceller. Forståelsen af denne sammenhæng er en vigtig brik for at kunne vurdere forsuringens samlede effekt på et økosystem, hvor denne art indgår. Før undersøgelsen startede var flere studier, hvor forældre blev udsat for forsuring under dannelsen af kønsceller, gametogenese, blevet gennemført med varierende resultater. Forskellige muslingearter viste forskellige reaktioner på forældrenes udsættelse for forsuring, hvor nogle larver blev større og udviklede sig hurtigere end under naturlige vilkår, mens andre arter oplevede negative effekter. Studierne viste vigtigheden af vilkårene, som forældrene lever i imens, de danner kønsceller, for afkommet. Dette laboratorieforsøg er dog det første til at undersøge, hvordan populationsstørrelsen af afkommet til forældre af muslingearten *C. Gigas*, påvirkes, når forældrene er blevet udsat for eksperimentel forsuring før gametogenese. Studiet demonstrerer yderligere, hvordan uro i miljøet før dannelsen af kønsceller påvirker den efterfølgende generation, selv når stress-faktoren er længe fjernet.²⁷

I laboratorieundersøgelsen blev voksne rugeri-opdrættede *C. Gigas* brugt, hvor de først blev akklimatiseret i 10 dage og herefter udsat for enten lav eller naturlig pH i 48 dage. Dernæst blev muslingerne placeret i omgivelser med naturlig pH og vandtemperatur i 90 dage. Som det sidste blev muslingerne gjort klar til reproduktion i 22 dage, hvorefter de blev parret i et kontrolleret miljø ved metoden 'strip spawning'. Det er en operation, hvor henholdsvis æg- og sædceller, dvs. gameterne, fjernes fra muslingerne og derefter kombineres i det kontrollerede miljø. 18 timer efter fertilisationen blev larverne talt. Et overblik over forsøgsperioden ses i figur 8 nedenfor²⁸:



Figur 8: Overblik over forsøgsperioden.²⁹

I alt blev 120 muslinger af arten *C. Gigas* fordelt på seks forsøgstanke, hvoraf halvdelen havde et henholdsvis lavt pH niveau (pH=7,31), og halvdelen havde et normalt pH niveau (pH=7.82). Surhedsgraden blev kontrolleret af flere forskellige målere, og den blev mindsket ved injektioner med CO_2 -rigt vand i tankene, hvor pH niveauet var lavt. Undervejs i forsøget blev alle tankene forsynet

²⁷ Spencer, Laura H. m.fl. (2019): 743

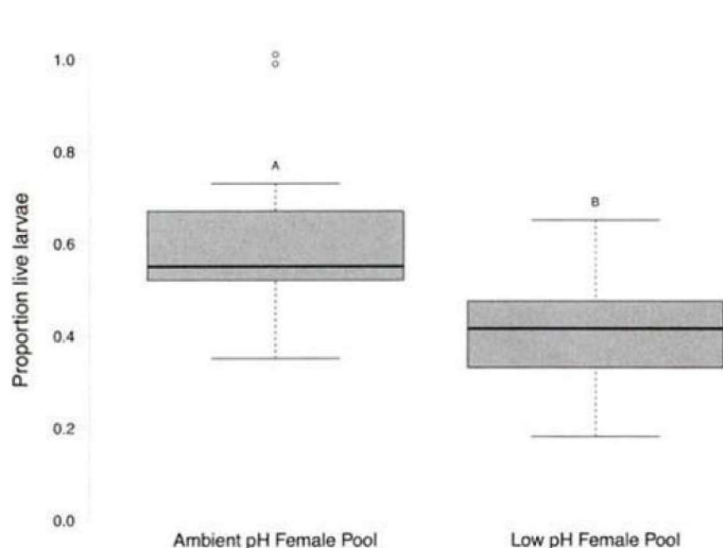
²⁸ Spencer, Laura H. m.fl. (2019): 744

²⁹ Spencer, Laura H. m.fl. (2019): 744

med alger fra et fælles reservoir. To gange om ugen opsamledes der vandprøver, hvor pH, den totale alkalinitet, CO_2 -koncentrationen, mængden af opløst uorganisk karbon, og opløseligheden af kalcit og aragonit blev målt for konstant at kontrollere vandets kemiske miljø under forsøget. Da muslingerne havde været udsat for enten lavt eller naturligt pH-niveau i syv uger, blev de alle samlet under naturlige forhold i én tank gennem otte uger. Efterfølgende, hvor muslingerne blev gjort parringsklare, ændredes de naturlige forhold til helt optimale forhold for denne praksis. Forholdene kendes fra standard rugeripraksis, hvilket blev brugt som reference. Under de optimale forhold blev temperaturen hævet til 23 grader celsius en uge inden "strip spawning". Til parringen blev udelukkende muslinger med aktive æg- og sædceller benyttet, og fire halvsøskende familier blev kreeret baseret på forældrenes udsættelse for pH:

1. pH_{lav} kvinde X pH_{lav} mand
2. pH_{lav} kvinde X pH_{normal} mand
3. pH_{normal} kvinde X pH_{lav} mand
4. pH_{normal} kvinde X pH_{normal} mand³⁰

Efter endt parring blev larverne talt. Det mest fremtrædende resultat var, at der var markant færre muslingelarver til stede i halvsøskendefamilierne, hvor mødrene var blevet udsat for lav pH, hvilket fremgår af nedenstående (figur 9):



Figur 9: Andel overlevende larver.³¹

Figuren viser to box-plot, der angiver andelen af overlevende larver mellem det første og tredje kvartil samt medianen, hvor mødrene enten blev udsat for normalt (t.v.) eller lavt pH-niveau (t.h.). Cirklerne repræsenterer såkaldte 'outliers', der adskiller sig markant fra resten af dataet. En andel på 1,0 angiver, at alle æg i familien udviklede sig til larver, hvorfor resultatet fremstår tydeligt, idet medianen er mindre i box-plottet til højre end til venstre. En større andel af larverne i de familier, hvor mødrene blev udsat for lav pH-værdi før gametogenese, døde altså. Studiet konkluderer at udsættelse for forurening inden dannelsen af kønsceller har en væsentlig indflydelse på populationsstørrelsen af den efterfølgende generation, hvorfor levevilkårene, der opleves af en maritim

³⁰ Spencer, Laura H. m.fl. (2019):744-746

³¹ Spencer, Laura H. m.fl. (2019): 747

ynglebestand inden gametogenese, skal overvejes. Ligeså skal resultaterne have in mente, når et økosystems respons til forsurening modelleres i stor skala. Slutteligt konkluderer studiet grundet tidsforskellen mellem udsættelsen for forsurening og parringen, at der er indikationer på en form for epigenetisk hukommelse, men at en fastlæggelse af dette kræver yderligere undersøgelser.³²

6.2 Vurdering af metode - fordele og begrænsninger

Studiets metode vil nu blive vurderet, hvor både fordele og begrænsninger inddrages. Metoden er i høj grad fordelagtig, når enkelte årsagssammenhænge skal belyses, men resultaterne er ofte svære at overføre til den 'virkelige verden', da forsøget ikke foregår i et naturligt miljø. Man kan dog forsøge at tilpasse forsøget, så den designede opstilling bliver tæt på lig med forholdene i det miljø, som undersøges. Her er variabelkontrol helt essentiel, som også er en af metodens klare fordele. Studiet benytter sig i meget høj grad af dette, idet de voksne *C. Gigas* muslinger ikke oplevede anden uro i deres miljø inden gametogenese end eksperimentel forsurening og modtog nok føde til succesfuld reproduktion, hvorfor resultaterne i høj grad kan tilskrives den ene, ændrede parameter; surhedsgraden. Et andet eksempel på metodens gode anvendelse af variabelkontrol er, som tidligere omtalt, at alle eksperiment-tankene blev forsynet med alger fra et fælles reservoir, hvilket altså sikrede, at dette heller ingen indflydelse på resultatet havde. Undervejs blev mange kontrolmålinger foretaget, der styrkede forsøgets sammenligningsgrundlag med den 'virkelige verden' som endnu en af metodens fordele. En række begrænsninger kan dog også nævnes i forbindelse med undersøgelsen. For det første må det siges at være en begrænsning, at metoden ikke i højere grad kan skelne mellem rugesucces og tidlig dødelighed, når resultaterne vurderes. Trods den store variabelkontrol begrænser det, hvorvidt variationen i populationsstørrelse kan tilskrives udsættelsen for forsurening. Desuden er studiet, som nævnt, det første af sin slags, hvilket gør det svært at sammenligne det andre tidligere studier, hvorfor dets brug i sammenhænge, hvor et helt økosystems respons på forsurening vurderes, bliver begrænset.

7.0 Havet som økosystem nu og i fremtiden

Forsuringen, og de mest betydningsfulde fysiske og kemiske forhold for denne, er nu blevet af-dækket med et særligt fokus på konsekvenserne for kalkdannende organismer som muslinger og koraller samt økosystemerne muslinge- og koralrev. Med udgangspunkt i dette, de illustrerede aspekter af forsurening og det beskrevne biologiske studie vil forsuringens konsekvenser for havet som økosystem nu og i fremtiden kort blive diskuteret og vurderet. Dertil vil en perspektivering af udvalgte konsekvensers indflydelse på mennesket følge.

7.1 Konsekvenserne står i kø

Klimaforandringerne ændrer havets kemiske miljø. Vi har set, at atmosfærens indhold af kuldioxid er på himmelflugt, men faktisk har koncentrationen af CO_2 i atmosfæren tidligere været langt

³² Spencer, Laura H. m.fl. (2019): 747-749

højere end i dag. Faktisk menes det, at jorden i dens tidlige stadie for omkring 4,5 milliarder år siden havde en atmosfære med et indhold af kuldioxid, som var 20 gange større end det opleves nu, hvorfor der ingen grund er til at antage, at havet ikke tidligere har oplevet - og overlevet - perioder med forsuring. Forskellen er dog, at forsuringen er langt mere akut i dag grundet den tidligere omtalte hastighed, hvormed den atmosfæriske CO_2 -koncentration stiger. Havets naturlige pufferkapacitet, den totale alkalinitet, kan nemlig ikke følge med, når så drastiske ændringer opleves. En stor del af havets baser, der har muligheden for at neutralisere syredannelsen i overfladevandet, befinder sig nemlig i bundvandet. Havet har tidligere selv kunne modvirke syredannelsen ved dets naturlige opblandingsprocesser, hvor netop bund- og overfladevand blandes, men dette foregår over tidshorisonter på titusinder af år. Deraf må graden af forsuringen antages at blive langt større end nogensinde før og med henvisning til figur 1, er det også det, der opleves i f.eks. Stillehavet.³³

Medvirkende til at øge bundvandet og havets generelle koncentration af baser er de kalkdannende organismer, som altså har en stor betydning for havets totale alkalinitet. Den mere drastiske forsuring, som sandsynligvis vil opleves, vil øge opløseligheden af disse kalkstrukturer, hvilket *forsøg 2* viste, hvorfor de får svært ved at overleve. En formodning, der understøttes af det beskrevne studie (afsnit 6), samt afsnittet om konsekvenser for kalkdannende organismer. Populationstørrelserne af de kalkdannende organismer må altså antages at blive mindre, hvilket vil resultere i et tab af biodiversitet og potentielt en reel flaskehalseffekt, hvor den genetiske variation mindskes kraftigt. De mindre populationsstørrelser resulterer, som tidligere fastlagt også i mindre grad af regulerende funktioner fra økosystemerne. Muslingerevet begrænser kystbeskyttelse vil fx resultere i en højere grad af erosion, da bølgenes energi ikke længere afdæmpes i samme grad. Hvordan dette vil påvirke livet i havet kan endnu ikke vurderes.³⁴ Korallrevet rammes desuden også hårdt af klimaforandringerne, og da koraller danner den mere syrefølsomme kalkform, aragonit, forventes disse at være endnu mere sårbare overfor forsuringen. Det forudses, at der inden år 2065 ikke vil herske gunstige kemiske betingelser for koraller til at danne kalk, hvis den nuværende udvikling i atmosfærens CO_2 fortsætter. Sammenholdt med koralblegningerne, der også skyldes klimaforandringerne, er konsekvenserne for korallrevet altså også store.³⁵

Tabet eller formindskelsen af disse to betydningsfulde økosystemer forventes at påvirke havets fødenet i høj grad. Uden muslinge- og/eller korallrevet til at give habitat, vil utroligt mange dyre- og plantearter i havet mangle de nødvendige nicher for at kunne overleve. Dette vil altså resultere i, at fødekæderne ændres, idet organismer på hvert trofiske niveau vil gå tabt. Det er kendt, at netop biodiversiteten er essentiel for et økosystems funktion, hvorfor det altså forventes at have store konsekvenser for havet som økosystem i fremtiden, men helt præcist hvordan vides endnu ikke.³⁶

Afslutningsvis skal det kommenteres, hvordan hele denne følgeproces af konsekvenser er selvforstærkende. I begyndelsen af denne tekst blev det omtalt, hvordan karbonkredsløbet er i ubalance,

³³ Richardson, Katherine & Lone Thybo Mouritsen (2006): 7

³⁴ Lemasson, Anaëlle J. m.fl. (2017): 49-58

³⁵ Richardson, Katherine & Lone Thybo Mouritsen (2006): 6

³⁶ Lemasson, Anaëlle J. m.fl. (2017): 49-58

og det er altså en tendens, som udelukkende bliver værre og værre. Forsuringen, forårsaget af de stigende CO_2 koncentrationer, medfører færre kalkdannende organismer, hvilket reducerer kulstoftransporten til havets bund og med reference til (1), forskydes ligevægten ikke i lige så høj grad længere. Havet kan altså ikke optage CO_2 i samme grad, hvorfor temperaturerne på kloden, grundet drivhuseffekten, vil stige markant mere end de allerede gør i dag. Igen styrker det udelukkende forsuringen, da det bl.a. mindsker den totale alkalinitet og sådan fortsætter det. Der er altså tale om en ond spiral, som vil få enorme konsekvenser for havet som økosystem nu og i fremtiden medmindre, at der findes en løsning på problemet. Det blev dog fastlagt i redegørelsen (afsnit 3.1), at der kan opløses mindre CO_2 i det varmere vand, hvilket muligvis vil mindske graden af forsuring en smule, men kun vil bidrage til den øgede drivhuseffekt. Det vurderes dog i denne sammenhæng, at der vil være forskel, grundet varierende temperaturer, hvilke konsekvenser de forskellige dele af havene vil opleve. F.eks. vil de kolde arktiske og antarktiske have blive mere syreholdige end resten af verdens have.³⁷ Med konsekvenserne af forsuringen for havet som økosystem nu og i fremtiden diskuteres, perspektiveres opgaven nu dets betydning for mennesket.

7.2 Perspektivering: Konsekvenser for mennesket

Udover de højere temperaturer har forsuringen af havet også andre konsekvenser for mennesket. Konsekvenser, som hidtil ikke har fået så meget opmærksomhed, hvorfor der nu vil blive perspektiveret til udvalgte af disse. I første række står den marine økonomi, og de mennesker som er afhængig af den, til at blive påvirket. Konsekvenserne for havet som økosystemet vil med al sandsynlighed resultere i dårligere fangster af diverse marine organismer, hvilket vil skade fiskerierhvervet og ramme tilgængeligheden af mad for mange mennesker. Allerede nu er der eksempler på, at forsuringen har katastrofale konsekvenser for muslingeopdrættere langs den nordvestlige stillehavskyst, hvor rugerier næsten gik konkurs, da de, uvidende, kom til at pumpe forsuret vand ind i deres foretagender. Udover økonomiske og fødevareremæssige konsekvenser for alle, der er afhængige af regelmæssige og succesfulde fangster af liv fra havet, påvirker forsuringen i den grad også turismen. Tidligere blev koralblegningerne omtalt som katastrofale for livet i havet i forbindelse med tab af habitater m.m. men koralrevet er også grundlag for enorm turisme, da mange mennesker hvert år har rejst til områder med koralrev for at dykke i de farvestrålende og levende omgivelser. Uden dette som attraktion til at trække turister til vil mennesker afhængig af denne turisme opleve alvorlige økonomiske konsekvenser. Hvor store afhænger af graden af forsuringen i fremtiden, og hvorvidt det lykkes at stoppe eller mindske klimaforandringerne.³⁸

³⁷ Richardson, Katherine & Lone Thybo Mouritsen (2006): 6

³⁸ Mathis, Jeremy T. (2019): 5

8.0 Konklusion

På baggrund af problemformuleringen kan det konkluderes, at temperaturen samt kemiske forhold som kuldioxid-ligevægten mellem atmosfæren og havet, havvandets totale alkalinitet og bikarbonatligevægten (6) har stor betydning for forsuring af havet, idet deres evne til at neutralisere syredannelsen i havets overfladevand påvirkes af drastiske stigninger i koncentration af kuldioxid i atmosfæren. Forsuringen resulterer i mangel på karbonationer, som har store konsekvenser for de kalkdannende organismer og de økosystemer, hvori de indgår. Disse oplever en række biologiske konsekvenser, herunder: misdannelse af skallen, reduceret vækst, svagere skeletter og højere dødelighed. Alt sammen fører det til en mindskning i populationsstørrelserne, hvorfor deres respektive økosystemer ikke kan bidrage med samme grad af regulerende funktioner længere. Dette omhandler bl.a. klimaregulering og kystbeskyttelse. I denne sammenhæng konkluderes det ydermere, at forsuringen også har store konsekvenser for koralrevet, hvor særligt koralblegninger er fremtrædende. På baggrund af de opstillede forsøg kan det konkluderes, at udvalgte aspekter af forsuringen, nemlig faldet i pH, når CO_2 opløses i vand, og dets indvirkning på opløseligheden af kalk, blev illustreret. Sidstnævnte forsøg viste, at kalk opløses hurtigere des surere det kemiske miljø er. Derudover konkluderes det, at en biologisk metode, laboratorieforsøget, påviste forsurings indflydelse på efterfølgende populationer af muslinger. Metoden vurderes at være særligt brugbar grundet den store variabelkontrol. Afslutningsvist kan det konkluderes, at havet forventes at opleve en større forsuring i fremtiden, hvilket vil resultere i en større grad af opløsning af kalk og dermed dårlige levevilkår for de kalkdannende organismer. Korallblegninger og ødelæggelsen af mindre økosystemer i havet formodes at mindske biodiversitet og påvirke havets fødenet i stor grad. Slutteligt konkluderes det, at disse konsekvenser vil have en selvforstærkende effekt på havet og klimaforandringerne.

Litteraturliste

- Axelsen, Vibeke m.fl. (2010): *Basiskemi B*, Haase og Søns Forlag
- Lemasson, Anaëlle J. m.fl. (2017): "Linking the biological impacts of ocean acidification on oysters to changes in ecosystem services", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 492, s. 49-62
- Mathis, Jeremy T. (2019): "Ocean Acidification." *AccessScience*, McGraw-Hill Education
- Nyvad, Anette & Henrik Parbo (2010): *Kend Kemien 3*, Gyldendal
- Richardson, Katherine & Lone Thybo Mouritsen (2006): "På vej mod et surt hav", *Aktuel Videnskab*
- Sivebæk, Birte (2013): "Bjerrumdiagram for kulsyre", net.biolyt.dk (besøgt: 15-03-2021)
<http://net.biolyt.dk/index.php?SID=927>
- Spencer, Laura H. m.fl. (2019): "Larval response to parental low pH exposure in the pacific oyster *Crassostrea Gigas*", *Journal of Shellfish Research*, Vol. 38, Nr. 3, s. 743-750
- Ukendt forfatter (2021): "Koralblegning", *Koralrev.dk* (besøgt: 19-03-2021)
<http://www.koralrev.dk/main.asp?id=474>
- Ukendt forfatter (2016): "Coral bleaching explained: The story of Frank the coral", *The Coral Garden*, youtube.com (besøgt: 18-03-2021),
https://www.youtube.com/watch?v=UyEw_Rl8mqM
- Vire, Anne-Mette m.fl. (2012): *Økologibogen*, Nucleus

Bilag

Bilag 1: Øvelsesvejledning og data til forsøg 1

Tilførsel af kuldioxid

Kontrollforsøg

Tid (s)	pH		Tid (s)	pH
0	6,610884		0	6,443035
2	6,609891		2	6,441788
4	6,622806		4	6,440852
6	6,626449		6	6,440541
8	6,634397		8	6,438669
10	6,641351		10	6,438046
12	6,643669		12	6,43711
14	6,651948		14	6,435863
16	6,660227		16	6,435239
18	6,667182		18	6,434927
20	6,670493		20	6,434615
22	6,679104		22	6,434304
24	6,685727		24	6,434304
26	6,685727		26	6,434615
28	6,684402		28	6,434304
30	6,677779		30	6,435551
32	6,666519		32	6,434927
34	6,653935		34	6,435239
36	6,639364		36	6,435551
38	6,622806		38	6,436175
40	6,596644		40	6,436798
42	6,574788		42	6,438358
44	6,553924		44	6,438358
46	6,527762		46	6,439293
48	6,51286		48	6,440541
50	6,483056		50	6,440852
52	6,457225		52	6,441164
54	6,434375		54	6,441164
56	6,406888		56	6,441476
58	6,379071		58	6,442412
60	6,350591		60	6,443659
62	6,322111		62	6,444906
64	6,292968		64	6,444906
66	6,266144		66	6,44553



SILKEBORG GYMNASIUM

68	6,229716		68	6,445842
70	6,203886		70	6,445842
72	6,174081		72	6,448025
74	6,142621		74	6,449584
76	6,111491		76	6,449896
78	6,083343		78	6,45052
80	6,056187		80	6,45052
82	6,02572		82	6,450832
84	5,999227		84	6,450832
86	5,971078		86	6,452079
88	5,931008		88	6,453015
90	5,90021		90	6,455198
92	5,873386		92	6,45738
94	5,84888		94	6,455509
96	5,823049		96	6,456133
98	5,793244		98	6,45894
100	5,768738		100	6,460187
102	5,739265		102	6,462058
104	5,713103		104	6,463929
106	5,684623		106	6,465489
108	5,65813		108	6,4658
110	5,632631		110	6,466112
112	5,605806		112	6,467672
114	5,579976		114	6,469543
116	5,556463		116	6,470478
118	5,532288		118	6,470478
120	5,50712		120	6,470478
122	5,480627		122	6,47079
124	5,45579		124	6,472349
126	5,433271		126	6,473909
128	5,409758		128	6,47578
130	5,385915		130	6,477651
132	5,363727		132	6,479834
134	5,342532		134	6,480457
136	5,31902		136	6,481081
138	5,298157		138	6,48264
140	5,280936		140	6,483888
142	5,252456		142	6,485135
144	5,233249		144	6,485135
146	5,217353		146	6,486071
148	5,199139		148	6,487318
150	5,181919		150	6,489189



SILKEBORG GYMNASIUM

152	5,167016		152	6,489813
154	5,152114		154	6,490125
156	5,135556		156	6,490125
158	5,119329		158	6,490748
160	5,106082		160	6,492308
162	5,094492		162	6,493867
164	5,082239		164	6,494802
166	5,067668		166	6,495114
168	5,056077		168	6,495426
170	5,045148		170	6,496985
172	5,030908		172	6,499168
174	5,01998		174	6,500416
176	5,009714		176	6,501351
178	5,001766		178	6,503222
180	4,993156		180	6,50447
182	4,982228		182	6,505094
184	4,973617		184	6,505094
186	4,966994		186	6,505405
188	4,959709		188	6,505405
190	4,951098		190	6,505094
192	4,944806		192	6,505717
194	4,936527		194	6,506653
196	4,927917		196	6,508524
198	4,921625		198	6,509148
200	4,91467		200	6,510083
202	4,909041		202	6,510395
204	4,904736		204	6,510395
206	4,900099		206	6,511019
208	4,89182		208	6,512266
210	4,888178		210	6,513514
212	4,882879		212	6,514761
214	4,878905		214	6,516008
216	4,872282		216	6,516944
218	4,867314		218	6,517568
220	4,862016		220	6,519127
222	4,860691		222	6,520062
224	4,854068		224	6,520374
226	4,8491		226	6,520686
228	4,846451		228	6,520998
230	4,842146		230	6,522557
232	4,838172		232	6,523805
234	4,835523		234	6,52474



236	4,830555		236	6,52474
238	4,825919		238	6,52474
240	4,825257		240	6,52474
242	4,821945		242	6,52474
244	4,819296		244	6,52474
246	4,815653		246	6,525364
248	4,811679		248	6,526299
250	4,809692		250	6,527859

Tabel 1: Rådata (forsøg 1)

Øvelsesvejledning:

Formålet med forsøget var at illustrere, at der sker et fald i pH-værdi, når CO_2 opløses i vand. Derfor var der ikke behov for præcise mængdeberegninger eller målinger undervejs. Fremgangsmåden lyder som følgende:

- Kalibrér et pH meter og tilslut det til en computer, så der er klar til målinger
- Forbered to bægerglas med vandhanevand (50 mL)
- Forbered et reagensglas med en teskefuld natron i
- Stil forsøget op som det fremgår af figur 4.
- Lad pH-måleren indstille sig på en fast pH-værdi i vandhanevandet, inden der tændes for bunsenbrænderen
- Tænd nu for bunsenbrænderen samtidig med, at der trykkes ”opsaml” i LoggerPro.
- Opsamlingen af data stoppes efter 250 sekunder
- Gentag nu forsøget, men uden opvarmningen af natron

Bilag 2: Øvelsesvejledning og data til forsøg 2

pH=0.3		pH=0.125		pH=0	
Tid (s)	Skumhøjde (cm*10 ⁻²)	Tid (s)	Skumhøjde (cm*10 ⁻²)	Tid (s)	Skumhøjde (cm*10 ⁻²)
3,47	376,3004147	2,668333	361,1711197	1,36833	298,7158425
5,338333	380,3216751	3,536667	371,2242708	1,46833	321,83809
12,44333	396,4067169	4,871667	382,282737	1,635	333,9018714
15,13233	405,4545529	6,773333	392,3358881	1,80167	343,9550225
17,67167	414,5023889	8,641667	408,4209298	2,06833	356,0188038
21,57067	429,5821155	10,14167	421,4900263	3,03667	369,0879002
		11,27667	435,5644378	4,67	390,1995175
		12,77833	449,6388493	5,47167	403,268614
		14,64667	469,7451516	6,205	424,3802313
		16,54833	486,8355084	6,94	440,465273
		19,18333	501,9152351	7,30667	451,5237392
				8,04	470,6247263
				8,40667	483,6938228
				9,14167	504,8054401
				9,875	522,9011121
				10,61	542,0020992
				11,71	566,1296618
				12,445	584,2253338
				13,1783	599,3050604
				13,9117	619,4113626
				15,38	644,5442404
				16,4817	668,671803
				17,5817	688,7781052
				19,05	712,9056679
				20,1517	731,0013399

Figur 10: Forsøgsdata tilhørende forsøg 2

Øvelsesvejledning:

Formålet med undersøgelsen var at illustrere, at des surere en opløsning er, des hurtigere opløses kalk. Inden forsøgets start blev tre opløsninger i 10 mL måleglas lavet - hver med forskellige pH-værdi:

Måleglas 1:

- pH-værdi: 0,3
- $c(\text{HCl}) = 0,5 \text{ M}$

Måleglas 2:

- pH-værdi: 0,125
- $c(\text{HCl}) = 0,75 \text{ M}$

Måleglas 3:

- pH-værdi: 0
- $c(\text{HCl}) = 1 \text{ M}$



Herefter var fremgangsmåden som følger:

- Afmål tre 2 cm høje stykker tavlekridt
- Film tre videoer, der alle varer ca. 35 sekunder, hvor stykkerne droppes ned i hvert sit målebæger
- Udfør regressionsanalyse på videoerne via LoggerPro's videoanalyseværktøj