

A photograph of a narrow stream flowing through a dense thicket of tall green grasses. A small, flat-bottomed boat is positioned in the middle of the stream. The boat is equipped with various scientific instruments, including a white rectangular device, several blue and red tubes, and a red cable. The water in the stream is dark and reflects the surrounding greenery. The overall scene is lush and natural.

Måling af CO₂ afgasning fra vandløb

Et feltstudie i Lindenberg Å og Guldbækken

Titel: Måling af CO₂ afgang fra vandløb - Et feltstudie i Lindenberg Å og Guldbækken.

Projektperiode: 1/11/14 - 19/9/15

Deltager:

Cathrine Balle Christensen

Vejleder: Morten Lauge Pedersen

Oplagstal: 3

Sideantal: 62

Afsluttet: 19. september 2015

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatteren.

Synopsis

Undersøgelser har vist, at der fra vandløb afgasses betydelige mængder CO₂ til atmosfæren som følge af, at vandløb er overmættet med CO₂.

Kvantificeringen af denne afgang har stor betydning for opstillingen af regionale og globale kulstofbudgetter, der anvendes til at forudse globale forandringer. Dette vanskeliggøres da vandløb udgør dynamiske miljøer med forskellige kemiske og morfologiske forhold, der påvirker de fysiske og kemiske parametre, der er styrende for gasudvekslingen mellem vand og atmosfære. I Danmark er der foretaget en undersøgelse af de langsgående variationer i CO₂ afgang fra to kanaliserede vandløb, hvori der blev fundet en sammenhæng mellem gasudvekslingskoefficienten (piston velocity) og vandløbenes hydrauliske parametre. Følgende undersøgelse foretoges i to mæandrerende vandløb, Lindenberg Å og Guldbækken, hvori det undersøges *om gasudvekslingen mellem vand og atmosfære er betinget af småskala variationer i vandløbs hydrauliske forhold eller om den er den samme i hele vandløbet?* Dette undersøges ved opstilling af hypoteserne: *Afgasningen er større fra stryg end fra høller på grund af en større turbulens her og: Der er en sammenhæng mellem piston velocity og strømhastigheden.* I undersøgelsen anvendes et flux kammer til at måle CO₂ afgang på meso-habitat niveau fra høller og stryg, hvorefter piston velocity kan bestemmes. I analysen anvendes en to-vejs ANOVA for at klarlægge om der er en sammenhæng mellem de hydrauliske forhold i høller og stryg og piston velocity.

Resultaterne af undersøgelsen viste, at der ikke var en signifikant forskel i afgang fra høller og stryg i de to vandløb. Samtidig blev der heller ikke fundet en sammenhæng mellem piston velocity og vandløbenes hydrauliske parametre. Det var således ikke muligt at verificere de opstillede hypoteser.

Forord

Dette Speciale er udarbejdet i perioden 1/11/2014 til 19/9/2015 i samarbejde med vejleder Morten Lauge Pedersen. Specialet udgør 60 ECTS og er afslutningen på specialiseringen i Naturgeografi på Aalborg Universitet.

Kilderne er angivet efter Harvard metoden og findes bagest i rapporten. Supplerende oplysningen er vedlagt som bilag ligeledes bagest i rapporten nummeret fra 1-5.

Abstract

Recent studies have shown that inland waters particularly headwater streams contribute with a significant amount of CO₂ to the atmosphere as it degasses from their surfaces. In this thesis CO₂ evasion rates and piston velocity were measured in the upper reaches of the two Danish low-land streams of Lindenberg stream and Guldbækken. The purpose was to establish whether the water-air gas exchange is conditioned by small scale variations in stream hydraulics or whether they are similar throughout the stream. For that reason measurements were performed at six stations represented by three riffles and three pools in each stream. Measurements of evasion rates were performed using a flux chamber and piston velocity was calculated based on CO₂ concentrations in the above stream air and in-stream CO₂ concentration calculated from pH and alkalinity. This study found that in-stream CO₂ concentration in both streams exceeded the above atmospheric concentration. A two-way ANOVA was performed to analyze whether there was a difference in degassing rates in riffles and pools based on piston velocity. Based on the results from this study it was not possible to establish a correlation between small scale variations in stream hydraulics and CO₂ degassing. For that reason further studies are recommended to include larger streams.

Indhold

1. Indledning.....	1
2. Kulstofdynamik i vandløb	3
2.1 CO ₂ i vandløb	3
2.1.1 Vandløbenes stofomsætning.....	3
2.1.2 Tilførslen af grundvand.....	3
2.2 Carbonatsystemet, pH og alkalinitet	4
2.2.1 Ledningsevne.....	5
2.3 CO ₂ udvekslingen mellem vandet og atmosfæren.....	5
3. Problemformulering	9
4. Lokalitetsbeskrivelse.....	11
4.1 Lindenberg Å.....	11
4.1.1 Geologi	12
4.2 Guldbækken.....	13
4.2.1 Geologi	14
5. Metode	15
5.1 CO ₂ afgasning	15
5.2 Hydrauliske målinger	16
5.2.1 Strømhastighed, dybde og bredde	16
5.2.2 Vandspejlshældning	17
5.3 Vandkemiske målinger	17
5.3.1 pH, iltmætning, ledningsevne og temperatur.....	17
5.3.2 Alkalinitet og CO ₂ koncentration.....	17
5.4 Atmosfærisk CO ₂ koncentration.....	18
5.5 Piston velocity	18
5.6 Databehandling.....	18
5.6.1 To-vejs ANOVA.....	18
5.6.2 ANCOVA analyse.....	19
6. Resultater	21
6.1 Vandløbenes hydrauliske forhold	21
6.1.1 Bredde og dybde.....	21
6.1.2 Strømhastighed	21
6.1.3 Variationer i dybde og strømhastighed.....	22

6.1.4 Vandspejlshædning	24
6.2 Vandkemiske parametre.....	24
6.2.1 Ledningsevne og iltmætning	25
6.2.2 Alkalinitet, pH og temperatur.....	25
6.2.3 CO ₂ koncentrationen i vandløbene.....	25
6.3 CO ₂ afgangning	27
6.4 Piston velocity	30
6.5 Variansanalyse.....	30
6.5.1 Kovariansanalyse	33
7. Diskussion	37
8. Konklusion.....	41
9. Bibliografi	43
BILAG 1	47
BILAG 2.....	48
BILAG 3.....	49
BILAG 4.....	50

1. Indledning

Kulstof indgår i alle biologiske processer (Mackenzie & Lerman, 2006) og udgør dermed et centralt element, der er afgørende for livet på jorden (Prairie & Cole, 2009). Herunder har atmosfærisk kulstof i form af CO₂ afgørende betydning for biologiske organismers primærproduktion, hvorigennem uorganisk kulstof omdannes til organisk (Mackenzie & Lerman, 2006). Samtidig udgør CO₂ i atmosfæren en drivhusgas, der er med til at opretholde en temperatur, der er egnet til livet på jorden. Ændringer i den atmosfæriske CO₂ koncentration har derfor global betydning, hvilket ses af de klimatiske ændringer forårsaget af en øget menneskelig CO₂ udledning (Mackenzie & Lerman, 2006). Det atmosfæriske CO₂ indhold er dog ikke kun betinget af menneskelige påvirkninger men også af biogeokemiske og klimatiske processer, der interagerer med kulstofkredsløbet. Et kendskab til disse processer og deres rolle i kulstofkredsløbet er derfor af stor betydning for at kunne forudsige fremtidige globale ændringer (Fatkowski, et al., 2000).

Det globale kulstofkredsløb kan overordnet inddeles i tre store reservoirer: landjorden, havet og atmosfæren, hvorimellem kulstof er ulige fordelt (Cole, et al., 2007). I tidligere simple opstillinger af kulstofkredsløbet har det været afbilledet som bestående af havet og landjorden som to biologisk aktive kasser, der gennem gasudvekslinger er forbundet med atmosfæren som den tredje kasse (Cole, et al., 2007). En sådan simplificering af kulstofkredsløbet har medført, at der er fremkommet flere mangler i forbindelse med opstillingen af regionale og globale kulstofbudgetter. I kraft af flere underinddelinger af kredsløbet skabes der en bedre forståelse for, hvorledes sammenspillet er mellem forskellige mindre reservoirer i kulstofkredsløbet og dermed mulighed for at opstille mere præcise regionale og globale kulstofbudgetter (Cole, et al., 2007).

I kulstofkredsløbet spiller vandløb en væsentlig rolle, da de gennem en række biogeokemiske processer forbinder de største kulstofreservoirer: landjorden, havet og atmosfæren (Khadka, et al., 2014). Tidligere blev vandløb anset for blot at være inaktive dræn, der transportererede kulstof fra terrestriske økosystemer til havet og indgik derfor ikke eksplicit som en del af kulstofkredsløbet (Cole, et al., 2007). Denne opfattelse har ændret sig, da flere undersøgelser har vist, at der undervejs i transporten af kulstof fra landjorden til havet sker både omdannelser og tab af kulstof i vandløbet (Cole, et al., 2007). Ved at undersøge mængden af kulstof, der transporteres fra landjorden til havet har det vist sig, at mængden af kulstof der tilføres vandløbene, overstiger den mængde, der eksporteres til havet. Det er her estimeret, at der tilføres 2,7 Pg C år⁻¹ fra terrestriske økosystemer, hvoraf 0,6 Pg C år⁻¹ sedimenteres undervejs i vandløbet, mens der kun eksporteres 0,9 Pg C år⁻¹ til havet. Dermed udgør de resterende 1,2 Pg C år⁻¹ den mængde, der afgasses fra vandløbene til atmosfæren i form af CO₂ (Battin, et al., 2009). Medtages denne parameter ikke i opstillingen af kulstofbudgetter, kan det resultere i en undervurdering af den terrestriske respiration, hvormed landjorden vil fremstå som et større kulstof reservoir end den reelt er (Cole, et al., 2007). Derfor er vandløbenes CO₂ afgasning inddraget i den seneste IPCC rapport som en væsentlig faktor, der skal medtages i opstillingen af kulstofbudgetter (Ciais, et al., 2013).

2. Kulstofdynamik i vandløb

For at kunne opstille regionale og globale kulstofbudgetter er det væsentligt at kunne kvantificere udvekslingen af CO₂ mellem vandmiljøet og atmosfæren (Alin, et al., 2011). På nuværende tidspunkt har der hovedsageligt været målt CO₂ afgang fra floder og større vandløb, hvorfor viden om mindre vandløbs betydning for tilførslen af CO₂ til atmosfæren endnu ikke er tilstrækkeligt undersøgt og veldokumenteret (Battin, et al., 2009).

Inkluderingen af mindre vandløb i kulstofbudgetter er imidlertid problematisk, da vandløbene er dynamiske og omskiftelige i deres morfologi og kemi (Wallin, et al., 2013), der gør det vanskeligt at bestemme *gasudvekslingskoefficienten (piston velocity)* på tværs af vandløbstyper og størrelser (Cole, et al., 2007). Samtidig skal der i vandløbene både tages højde for den nedstrøms transport af opløst og partikulært kulstof og den vertikale transport i form af afgang til atmosfæren. Derudover er den arealmæssige udbredelse af mindre vandløb ikke veldokumenteret, hvilket vanskeliggør opstillingen af regionale og globale kulstofbudgetter yderligere (Wallin, et al., 2013).

2.1 CO₂ i vandløb

På baggrund af ovenstående vil der i det følgende blive redegjort for et vandløbs kulstofdynamik, med særligt fokus på CO₂, med det formål at beskrive de processer, der har indflydelse på CO₂ udvekslingen mellem vand og atmosfære. Afsnittet vil dermed udgøre projektets teoretiske baggrund. Heri redegøres der som det første for de biogeokemiske processer, der er afgørende for vandløbs CO₂ indhold. Efterfølgende gøres der rede for, hvilken betydning CO₂ har for et vandløbs kemiske komposition, hvor der samtidig præsenteres målbare parametre, der kan anvendes til at bestemme et vandløbs CO₂ indhold. Slutteligt redegøres afsnittet for de parametre, der anvendes til at bestemme gasudvekslingen mellem vandet og atmosfæren.

2.1.1 Vandløbenes stofomsætning

Tilførslen af organisk kulstof udgør en essentiel energikilde for vandløbenes stofomsætning (Allan & Castillo, 2007). Det organiske kulstof der tilføres vandløbene, inddeles ud fra deres oprindelse i to overordnede kategorier, henholdsvis *allochtont* og *autochtont*, hvor det allochtone kulstof bestående af partikulært (POM) og opløst organisk kulstof (DOM) tilføres fra landmiljøet, mens det autochtone kulstof produceres af planterne i vandløbet (Sand-Jensen & Lindegaard, 2004). Tilførslen af organisk kulstof øger vandløbets iltforbrug som følge af organismernes respiration ved nedbrydelsen af kulstoffet, hvorved vandløbets CO₂ indhold stiger. Modsat optages CO₂ ved planternes fotosyntese, der øger vandløbets iltindhold. Disse biologiske processer er derfor med til at regulere vandløbenes CO₂ indhold (Allan & Castillo, 2007).

2.1.2 Tilførslen af grundvand

Udover stofomsætning i vandløbet påvirkes CO₂ koncentrationen af tilstrømningen af grundvand, der er overmættet med CO₂ (Allan & Castillo, 2007). Når regnvand føres ned gennem jordprofilet, vil dets CO₂ indhold ændre sig, så det går fra at være i ligevægt med atmosfærens koncentration til at blive overmættet med CO₂, der optages fra røddernes og jordorganismernes respiration. Det høje indhold af CO₂ i jordvandet vil i jordprofilet opløse

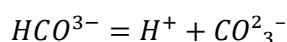
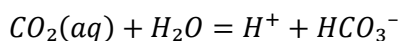
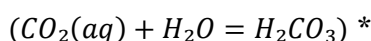
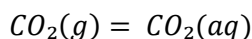
kalk og lerminerale, der let forvitres (Sand-Jensen & Lindegaard, 2004), da CO_2 agerer som en syre, der reagerer med de basiske bjergarter. Opløsningen af CaCO_3 er givet ved følgende reaktion:



Dermed har den kemiske forvitring af kalk stor betydning for tilførslen af bicarbonat (HCO_3^-), der i vandløb indgår i syre-base reaktioner, som har indflydelse på vandets alkalinitet og pH (Stumm & Morgan, 1996).

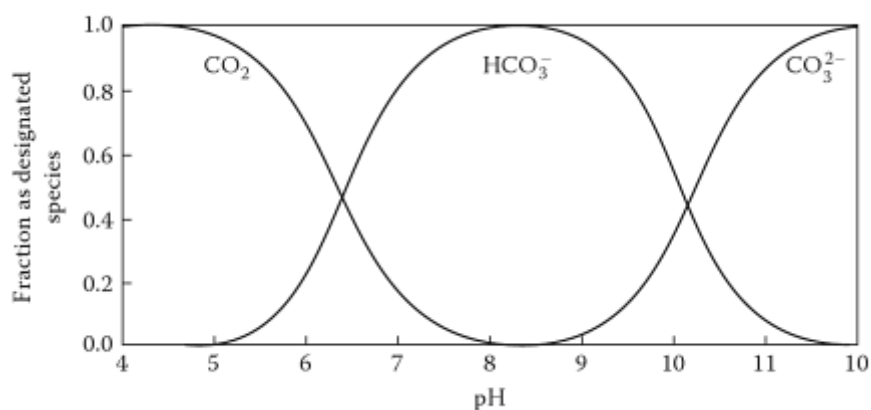
2.2 Carbonatsystemet, pH og alkalinitet

Når CO_2 opløses i vand, reagerer det med vandet og producerer de negativt ladede carbonationer bicarbonat (HCO_3^-) og carbonat (CO_3^{2-}), der sammen med CO_2 (aq) udgør den samlede koncentration af opløst uorganisk kulstof (DIC) (Mackenzie & Lerman, 2006). Dette sker gennem følgende reaktioner:



Den opløste CO_2 udgøres reelt af frit CO_2 og dens hydrerede form H_2CO_3 . CO_2 udgør ikke i sig selv en syre, da molekylet ikke er forbundet med protoner, men reagerer med H_2O og danner den diprotiske syre H_2CO_3 , som det fremgår af ovenstående reaktion*. I enhver given opløsning, der indeholder CO_2 , vil der også være H_2CO_3 til stede (Pankow, 1991), men i kemiske reaktioner angives CO_2 og H_2CO_3 som en samlet pulje og benævnes enten H_2CO_3^* eller $\text{CO}_2(aq)$ (Cole & Prairie, 2009), hvoraf sidstnævnte vil blive anvendt i det efterfølgende.

Tilsammen udgør $\text{CO}_2(aq)$, HCO_3^- og CO_3^{2-} carbonat-buffersystemet, der er ansvarlig for reguleringen af pH og alkalinitet i vandløb. Den forholdsmæssige fordeling af de forskellige komponenter i forhold til hinanden er med til at bestemme vandets pH. Ved en pH på omkring 5, vil kun $\text{CO}_2(aq)$ være til stede, mens HCO_3^- vil være den dominerende komponent ved en pH på 8,3. Først ved en pH omkring 9 vil der være CO_3^{2-} til stede i vandet (Cole & Prairie, 2009). I figur 2.1 er den forholdsmæssige fordeling af carbonationer afhængig af pH illustreret.



Figur 2.1: Fordelingen af carbonationer i forhold til pH (Manahan, 2011).

Mens pH er et udtryk for vandets surhedsgrad, svarende til koncentrationen af protoner (Mattson, 2009), er alkalinitet et udtryk for vandløbets evne til at neutralisere syre (H^+) (Stumm & Morgan, 1996). I ferskvand udgør HCO_3^- og CO_3^{2-} de største buffere, hvoraf HCO_3^- er den største, der modvirker ændringer i vandets pH (Mattson, 2009). Alkalinitet kan således udtrykkes med følgende ligning:

$$[Alk] = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [OH^-] + [H^+] \quad (\text{Stumm \& Morgan, 1996})$$

Alkalinitet kan bestemmes gennem syre-titrering af en vandprøve til pH omkring 4,5. Ved denne pH vil der kun være $CO_2(aq)$ tilstede i vandet. Ud fra målinger af pH og alkalinitet, er det således muligt at bestemme koncentrationen af de enkelte carbonationer i en vandprøve (Mattson, 2009).

2.2.1 Ledningsevne

Vandets indhold af opløste ioner, kan tilnærmelsesvis bestemmes ud fra vandets ledningsevne, der er et udtryk for den elektriske ledningsevne i vandet. Her vil tilstedeværelsen af ioner mindske modstanden på elektronstrømningen, mens der vil være en større modstand i vand med lavt indhold af opløste ioner (Allan & Castillo, 2007).

Sammenhængen mellem mængden af opløste ioner og ledningsevnen kan tilnærmelsesvis anvendes som et udtryk for et vandløbs produktivitet, da et vandløb med et højt indhold af næringsstoffer vil have en høj ledningsevne (Dodds, 2002).

2.3 CO_2 udvekslingen mellem vandet og atmosfæren

Gasudvekslingen mellem vand og atmosfære er styret af både kemiske og fysiske parametre. Den kemiske del af gasudvekslingen er knyttet til ændringer i koncentrationsgradienten mellem atmosfæren og vandet, hvor ændringer i vandets CO_2 koncentration er styret af ovennævnte biogeokemiske processer, der tilsammen forbruger eller tilfører CO_2 (Bade, 2009). I det efterfølgende vil der således blive gjort rede for de fysiske parametre, der er styrende for

gasudvekslingen mellem vand og atmosfære og som anvendes til at bestemme CO₂ afgangningen.

CO₂ udvekslingen mellem vand og atmosfære finder sted som følge af en uligevægt i CO₂ koncentrationen mellem disse (Bade, 2009). I den sammenhæng er koncentrationen af en gas ofte udtrykt som dens partialtryk, der defineres som det tryk en given gas vil udøve, hvis den alene optager samme volumen som den samlede blanding af gas. Dermed udgøres det totale tryk en gasblanding vil udøve af summen af de enkelte gassers partialtryk (Fitts, 2002). For en gas opløst i vand gælder det ifølge Henrys lov, at hvis denne gas er i ligevægt med atmosfæren, så vil partialtrykket også være lig med partialtrykket af gassen i atmosfæren. Dette kan udtrykkes som følgende:

$$pCO_{2(vand)} = pCO_{2(atm)} \text{ (Cole \& Prairie, 2009)}$$

Da CO₂ koncentration i vandløb varierer både over tid og rum, vil CO₂ koncentrationen dog ofte være langt fra den i atmosfæren. Her vil en sammenligning af pCO_2 i vandet og pCO_2 i atmosfæren kunne afgøre, hvorvidt der sker en afgangning af CO₂ fra vandløbet eller en tilførsel af CO₂ fra atmosfæren (Cole & Prairie, 2009).

Størrelsesordenen på udvekslingen af CO₂ mellem vandet og atmosfæren, afhænger af følgende to parametre; Dels af koncentrationsgradienten mellem vandet og atmosfæren, der her udtrykkes som forskellen mellem den faktiske CO₂ koncentration i vandet og den koncentration vandet ville have, hvis den var i ligevægt med atmosfæren, men også af gasudvekslingskoefficienten (piston velocity) (Raymond, et al., 1997). Til at beskrive afgangningen af CO₂ til atmosfæren, anvendes en omskrivning af Ficks første lov om diffusion, givet ved:

$$F = k * K_h(pCO_{2(vand)} - pCO_{2(atm)}) \text{ (Cole \& Prairie, 2009) (2.1)}$$

Hvor F er CO₂ afgangningen [mol CO₂ m⁻² t⁻¹], k er piston velocity [m t⁻¹], K_h er den temperatur afhængige Henrys konstant og $pCO_{2(vand)}$ og $pCO_{2(atm)}$ angiver partialtrykket for CO₂ i henholdsvis vandet og atmosfæren [ppm] (Cole & Prairie, 2009). Denne ligning kan omskrives idet $K_h * pCO_2$ giver CO₂ koncentrationen. Dermed kan CO₂ afgangningens omfang udtrykkes ved:

$$F = k(CO_{2(vand)} - CO_{2(atm)}) \text{ (Cole \& Prairie, 2009) (2.2)}$$

Hvor CO_{2(vand)} er koncentrationen i vandet og CO_{2(atm)} angiver den koncentration som vandet ville have, hvis det var i ligevægt med CO₂ koncentrationen i atmosfæren. Piston velocity, k , er et udtryk, der angiver den fysiske hastighed, hvormed der sker en gasudveksling med atmosfæren. k angives eksempelvis i [m t⁻¹], da den angiver højden på vandet, der ækvilibrerer CO₂ med atmosfæren over en given tidsperiode (Cole & Prairie, 2009). Denne parameter kan påvirkes af turbulens i grænsefladen mellem vandet og atmosfæren (Jähne & Haußecker, 1998), og stiger ved øget vind- og strømhastighed (Cole & Prairie, 2009). Derfor kan k variere

alt efter hvilket miljø den måles i, da de fysiske forhold, der kontrollerer den, kan ændre sig (Kremer, et al., 2003). Det er derfor vanskeligt at bestemme piston velocity nøjagtigt. Derimod kan $CO_{2(vand)}$ og $CO_{2(atm)}$ let måles i felten og samtidig kan F måles direkte. Derfor kan piston velocity beregnes ved en omskrivning af ligning 2.2:

$$k = F(CO_{2(vand)} - CO_{2(atm)})^{-1} \text{ (Vachon, et al., 2010) (2.3)}$$

I denne undersøgelse vil ligning 2.3 blive anvendt til beregningen af piston velocity, da CO_2 afgang måles direkte. Den anvendte metode vil senere blive detaljeret beskrevet.

3. Problemformulering

I Danmark er der foretaget en undersøgelse af CO₂ afgasningen fra vandløbene Pøle Å og Havelse Å. Disse vandløb afvander hovedsageligt landbrugsarealer, men også urbane områder og skovområder. Begge vandløb er kanaliseret og har relativt ensartede dybder. I undersøgelsen blev der set på de rumlige variationer i CO₂ afgasningen i langsgående retning, ved at foretage målinger af CO₂ afgasningen flere steder på hele vandløbsstrækningen. Udover målingen af CO₂ afgasningen testede undersøgelsen blandt andet forholdet mellem piston velocity og forskellige hydrauliske parametre, der kan påvirke turbulensen i vandløb, hvor der blev fundet en sammenhæng mellem strømhastigheden og piston velocity (Sand-Jensen & Staehr, 2012). I ovenstående teori beskrives det imidlertid, hvorledes gasudvekslingen kan påvirkes af fysiske ændringer og variere alt efter, hvilket miljø den måles i. På baggrund heraf finder dette projekt det interessant at foretage målinger af CO₂ afgasningen fra to mæandrerende vandløb, hvori der findes større variationer i de hydrauliske forhold med henblik på at undersøge følgende:

Er CO₂ udvekslingen mellem vandet og atmosfæren betinget af småskala variationer i de vandløbshydrauliske forhold eller er der samme udveksling i hele vandløbet?

For at undersøge dette foretages der i to vandløb målinger af CO₂ afgasningen fra høller og stryg, der repræsenterer to mesohabitater, hvori der hersker forskellige hydrauliske forhold. Ved samtidig at måle forskellige hydrauliske parametre i disse områder, er det muligt at undersøge, hvilke der har indflydelse på piston velocity. I den forbindelse opstilles der følgende to hypoteser:

Afgasningen er større fra stryg end fra høller på grund af en større turbulens her

Der er en sammenhæng mellem piston velocity og strømhastigheden

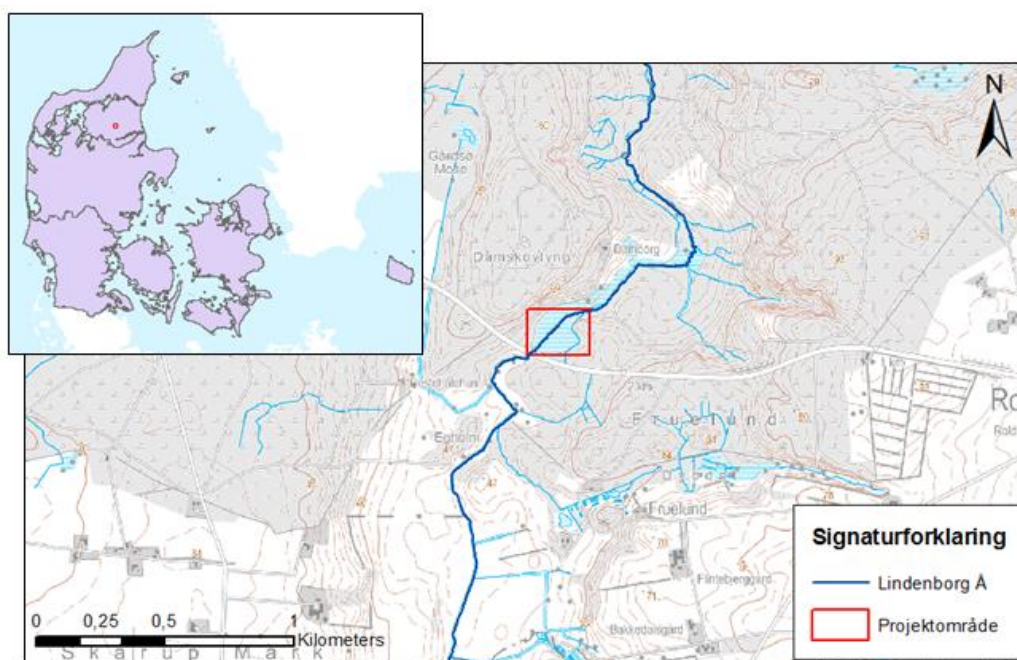
Denne undersøgelse foretages i vandløbene Lindborg Å og Guldbækken, der er udvalgt på baggrund af deres naturlige forløb og deres beliggenhed i samme landskabstype, hvilket gør det muligt at sammenligne resultaterne vandløbene imellem. De to vandløb som dermed udgør projektlokaliteterne beskrives nærmere i det følgende.

4. Lokaltetsbeskrivelse

I følgende afsnit vil de to vandløb Lindenberg Å og Guldbækken, som danner rammen om denne undersøgelse, blive præsenteret. Der er i de to vandløb udvalgt to strækninger, hvori der foretages målinger af CO₂ afgangningen, samt af hydrauliske og vandkemiske parametre. Herunder redegøres der for de landskabsmæssige og geologiske forhold omkring vandløbene.

4.1 Lindenberg Å

Lindenberg Å er 50 km lang (Danmarks Naturfredningsforening, u.d.) og løber gennem det østlige Himmerland. Den har sit udspring mellem Ravnkilde og Nysum syd for Rold skov fra kilderne Nysum Vældet og Lille Ravnkilde, der formelt regnes for åens udspring. Åen modtager dog vand på den første kilometer fra langt flere mindre kildevæld. Fra sit udspring løber åen mod nordøst og har sit udløb i Limfjorden (Nordjyllands Amt, 2004). I dens øvre del har Lindenberg Å et naturligt mæandrerende forløb, hvor den løber gennem uberørte naturområder i den sydlige del af Rold skov (Nordjyllands Amt og Miljøcenter Aalborg, 2007). Den udvalgte strækning af Lindenberg Å, hvori der foretages målinger, er beliggende i dette område, se kort 4.1. Den efterfølgende beskrivelse vil derfor fokusere på de landskabsmæssige forhold omkring denne strækning.



Kort 4.1 viser projektområdet i Lindenberg Å (Indeholder data fra Geodatastyrelsen, Kort 25, september 2015).

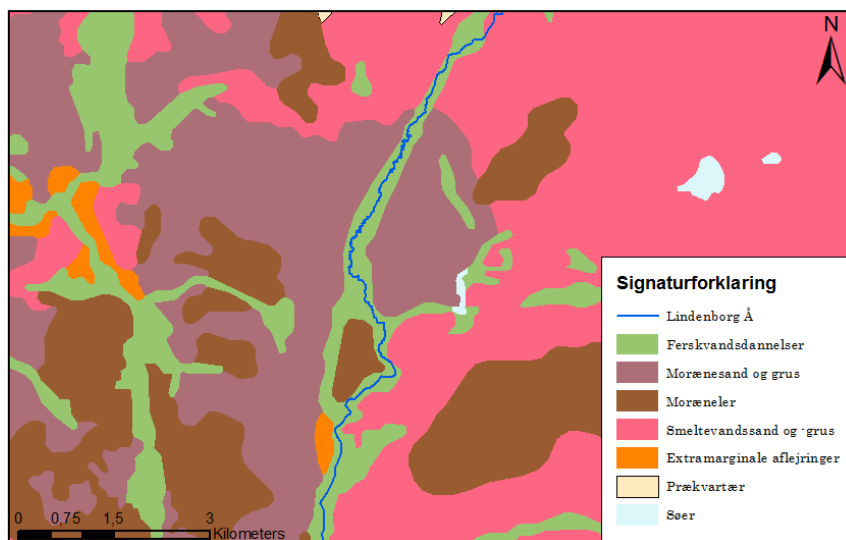
Lindenberg Å løber i undersøgelsesområdet gennem et åbent landskab, hvor bevoksningen hovedsageligt består af høje græsser, der grænser helt ned til bredden af vandløbet. Langs bredden i vandløbet findes der en stor udbredelse af gul iris, der på en del af strækningen mindsker åens løb. I vandløbet er der desuden observeret mindre udbredelser af vandranunkel. Bundforholdene i Lindenberg Å består i strygene af sandbund med sten, mens der i høllerne findes en mere mudret sandbund. Nedenstående figurer illustrerer disse forhold i Lindenberg Å.



Figur 4.1 viser eksempler på bundforholdene i høl (venstre) og stryg (højre) i Lindenberg Å.

4.1.1 Geologi

Landskabet omkring Lindenberg Å udgøres af det Østhimmerlandske højland, der er resultatet af flere isfremstød under Saale og Weischel (Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2012). Området er gennemskåret af flere dale, der efter istiden er dannet ved vand- og vinderosion (Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2013). Lindenberg Å løber her gennem en syd nordgående tunneldal, der oprindeligt er dannet som følge af tektoniske bevægelser i området for senere at blive udgravet af isfremstød (Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2012). I undergrunden findes prækvartære aflejringer i form af Skrivekridt og Danien kalk (Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2013). Nedenfor ses et kort over de terrænnære jordlag omkring Lindenberg Å.

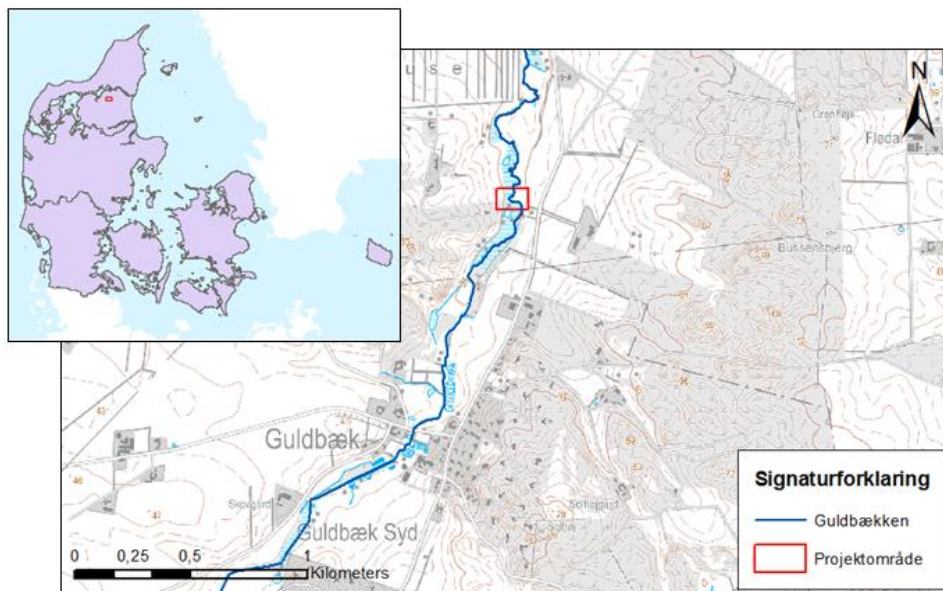


Kort 4.2 viser de terrænnære jordlag i området omkring Lindenberg Å.

Heraf fremgår det, at de terrænnære jordlag omkring vandløbet er domineret af morænesand og grus samt af smeltevandssand og grus, mens der i området findes spredte forekomster af moræneler.

4.2 Guldbækken

Guldbækken er 13,5 km lang og løber gennem det nordvestlige Himmerland sydvest for Aalborg. Åen har sit udspring i Næsum mose og løber mod nordøst, hvor den udløber i Østerå (By og Landskabsforvaltningen, 2015). Kort 4.3 viser Guldbækken, hvor projektområdet er markeret.



Kort 4.3 viser projektområdet i Guldbækken (Indeholder data fra Geodatastyrelsen, Kort 25, september 2015).

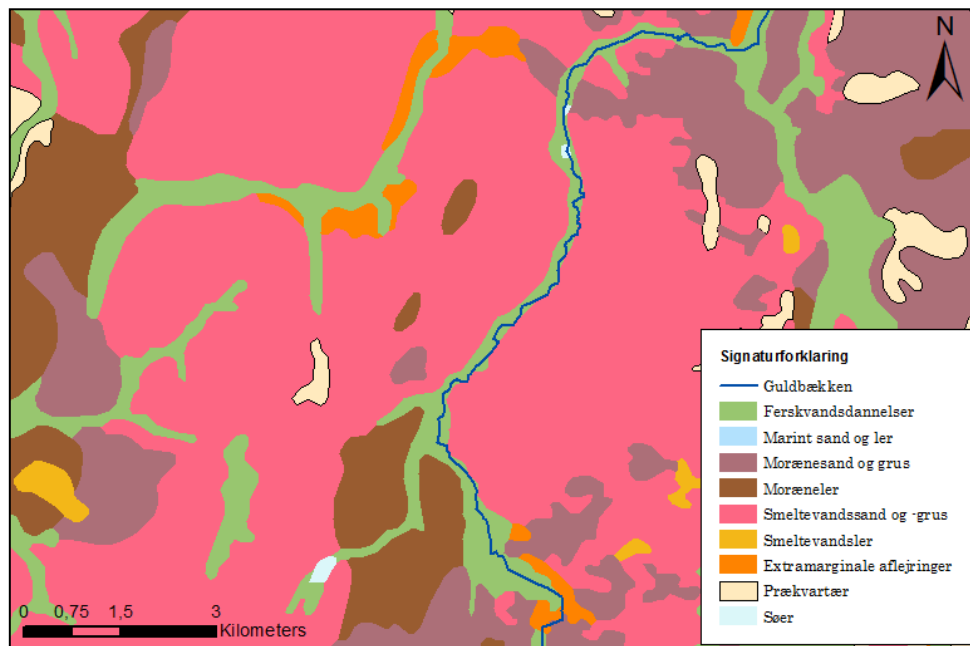
Ved målestationerne er guldbækken omgivet af landbrugsjord, der ned til vandløbet er afgrænset af bræmmer med høj græsbevoksning. I vandløbet er der en stor udbredelse af vandplanter både i høl og stryg. Der er i strækningen observeret en stor udbredelse af sideskærm og en mindre udbredelse af vandranunkel. Bundforholdene i Guldbækken består overvejende af sandbund med sten både i høl og stryg. Figur 4.2 viser disse forholdene i et høl og et stryg i Guldbækken.



Figur 4.2 viser eksempler på bundforholdene i høl (venstre) og stryg (højre) i Guldbækken.

4.2.1 Geologi

Landskabet omkring Guldbækken består af et storbølget højland, der fremstår som et plateau, der gennemskæres af større eller mindre dale. Dette landskab er dannet af opskudte kalkblokke, der efterfølgende er eroderet og formet af gletscheraktivitet. Dalene mellem kalkblokkene er gennem tiden blevet udhulet af vand og gletschererosion, hvorefter de igen er blevet udfyldt af sedimenter. I området omkring Guldbækken er der under kvartærtiden afsat moræneler og smeltevandssedimenter (Obicon, 2008). Nedenstående kort viser fordelingen af de terrænnære jordlag omkring vandløbet.



Kort 4.4 viser de terrænnære jordarter omkring Guldbækken.

Heraf se det, at der omkring åen hovedsageligt findes smeltevandssand og -grus, mens der findes en mindre udbredelse af moræneler, -sand og grus.

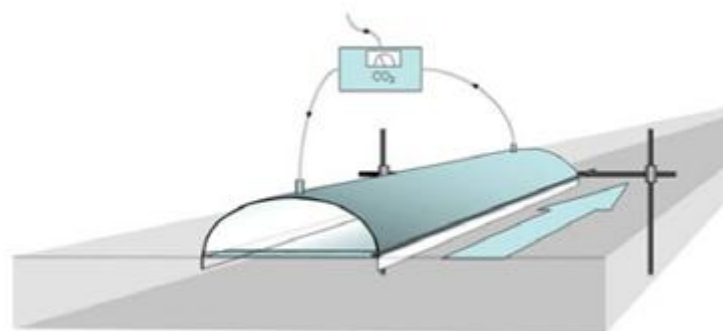
5. Metode

I følgende afsnit redegøres der for projektets metodiske fremgangsmåde. Formålet med projektet er som det første at dokumentere CO₂ afgangningen fra de to vandløb og efterfølgende at undersøge, om forskelle i vandløbenes hydrauliske forhold har betydning for CO₂ afgangningen. Dette gøres ved at teste de opstillede hypoteser, der undersøger, om der er sammenhænge mellem vandløbenes hydrauliske parametre og piston velocity. I hvert vandløb er der således udvalgt seks målestationer fordelt på tre høller og tre stryg, der repræsenterer to mesohabitater med forskellige hydrauliske forhold.

I undersøgelsen anvendes litteratur i form af videnskabelige artikler og bøger, der hovedsageligt anvendes til at danne den teoretiske baggrund for undersøgelsen. Derudover indsamles den primære data gennem fire dages feltarbejde i en vandløbsstrækning i Lindenberg Å og Guldbækken fordelt på to dage pr. vandløb. Den valgte metode til indsamling af data og efterfølgende databehandling er inspireret af Sand-Jensen og Staehr (Sand-Jensen & Staehr, 2012). Målingerne i de to vandløb foretages i samme tidsrum alle fire dage. I begge vandløb startes målingerne ved den nederste målestation og sluttet ved den øverste for at sikre, at vandløbet ved målestationerne er uforstyrret. De i alt 12 målestationer navngives, så de angiver, hvilket vandløb der er tale om og hvor i vandløbet målingerne er foretaget. De markeres således med Li for Lindenberg Å og Gu for Guldbækken, hvortil der tilføjes H for høller og S for stryg. Målestationerne er desuden nummereret fra 1-3, hvor 1 er den øverste og 3 den nederste målestation. Dermed foretages målingerne i H3 og S3 som de første og målingerne i H1 og S1 som de sidste.

5.1 CO₂ afgangning

Til at måle CO₂ afgangningen fra Lindenberg Å og Guldbækken, anvendes et såkaldt ”*Flux chamber*”. Kammeret består af en 71,2 cm lang halvcylinder, der har en indvendig diameter på 17,9 cm. I begge ender er kammeret lukket med endevægge, der er kortere end kammerets sider, hvorpå der er fastgjort ”skørter” bestående af to gummistykker, der hviler på vandet. Ved hver ende er der desuden fastgjort en ponton, der hjælper med at holde kammeret flydende. Når kammeret nedsættes i vandet, er højden i kammeret 5,5 cm. Dermed afgrænser kammeret 4673 cm³ atmosfærisk luft over et areal af vandoverfladen på 1246 cm².



Figur 5.1 viser en forsimplet tegning af måleopstillingen (Sand-Jensen & Staehr, 2012).

I vandløbene placeres kammeret parallelt med strømretningen og fastgøres ved hjælp af to pløkker og snor til bredden, så det ligger stabilt under målingerne. Akkumuleringen af CO₂ i kammeret måles med en infrarød gasanalyser (Li-820 CO₂ Gas Analyzer), der fra dens indløb og udløb kobles til kammerets top via lufttætte slanger. Målingen af CO₂ afgasningen foretages over minimum én time ved hver målestation, hvor CO₂ koncentrationen i kammeret logges hvert 10 s med en datalogger.

CO₂ afgasningen kan efterfølgende beregnes ud fra den lineære stigning i CO₂ koncentrationen over tid, α [$\mu\text{l CO}_2 \text{ l}^{-1} \text{ atmosfærisk luft s}^{-1}$], baseret på 16 punkter med følgende ligning (Sand-Jensen & Staehr, 2012):

$$F = \alpha V_{ch} f V_{CO_2} (temp)^{-1} A_{ch}^{-1}$$

hvor F er CO₂ afgasningen målt i [$\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$], V_{ch} er kammerets rumfang, f omregner afgasningen fra sekunder til timer og cm^2 til m^2 , $V_{CO_2}(temp)$ er volumen af 1 mol CO₂ ved den faktiske temperatur og en atmosfæres tryk og A_{ch} er arealet af vandoverfladen (Sand-Jensen & Staehr, 2012).

5.2 Hydrauliske målinger

Der foretages ved hver målestation målinger af vandløbenes hydrauliske parametre. Målingerne foretages ved kammerets position for at klarlægge vandløbenes hydrauliske forhold, hvor CO₂ afgasningen måles. Dermed kan det undersøges, hvilken betydning forskelle i de hydrauliske forhold har for CO₂ afgasningen. De hydrauliske målinger foretages alle umiddelbart før eller efter målingen af CO₂ afgasningen. Dermed undgås det, at bevægelser i vandet, i forbindelse med disse målinger, vil kunne skabe unaturlig turbulens omkring kammeret.

5.2.1 Strømhastighed, dybde og bredde

Strømhastigheden bestemmes ud fra tre målinger, der foretages i forskellige dybder på samme sted, hvorfor dybden måles og noteres umiddelbart inden strømhastighedsmålingerne. Som udgangspunkt måles strømhastigheden ved en dybde ca. 5 cm over bunden, ca. 10 cm under overfladen og en måling i midten af disse, hvor dybden kan variere alt efter den samlede dybde. Til at måle strømhastigheden, anvendes en propelmåler, der monteres på en metalstang. Denne nedsænkes i vandløbet med propellen vendt mod strømmen. Ved at notere antallet af propelomdrejninger kan strømhastigheden efterfølgende beregnes. Ved samme position måles og noteres bredden af vandløbet.

I forbindelse med målingen af strømhastigheden sikres det, at metalstangen med propellen holdes lodret, for at undgå at målingerne påvirkes af bevægelser. Det sikres samtidig at stangen ikke synker ned i bunden, således målingerne foretages i den korrekte dybde. Ved at montere en metalplade i bunden af stangen holdes den oven på bunden. Det samme gør sig gældende i forhold til målingen af dybden, hvor det ligeledes sikres at tommestokken ikke synker ned i bunden under målingen og dermed giver ukorrekte målinger.

5.2.2 Vandspejlshældning

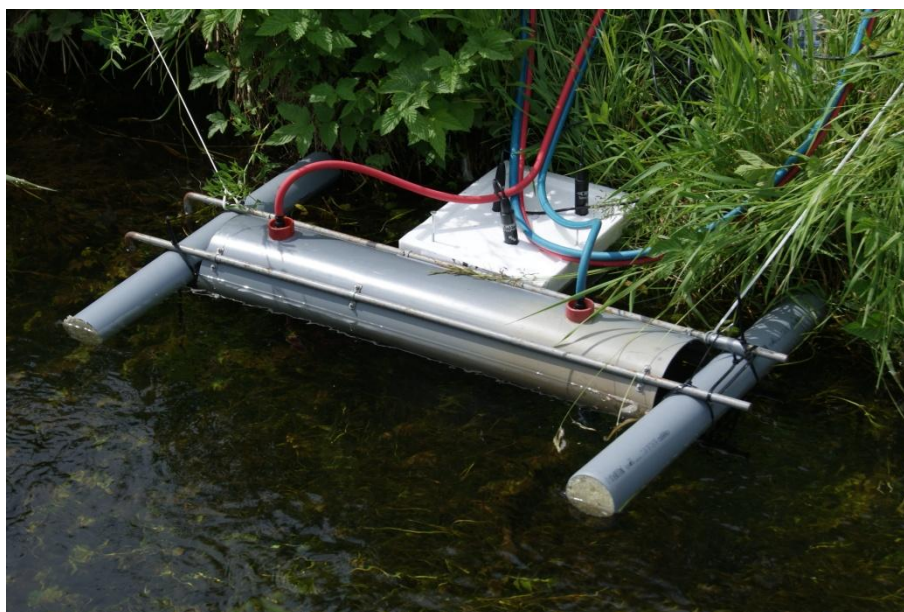
Vandspejlshældningen i de to vandløb måles ved nivellering, hvortil der anvendes et stadie og et nivellementsapparat. Der foretages målinger af højden ved øverste og nederste målestation, hvorefter forskellen mellem de to beregnes.

5.3 Vandkemiske målinger

Der foretages ved hver målestation målinger af en række vandkemiske parametre. Disse målinger består af både direkte målinger og udtagelse af vandprøver til videre analyse. Formålet med målingerne er at bestemme vandløbenes CO_2 koncentration. Ved at klarlægge vandløbenes vandkemiske parametre kan det ligeledes undersøges, hvilken betydning disse parametre har for CO_2 afgangningen.

5.3.1 pH, iltmætning, ledningsevne og temperatur

Til at måle vandløbenes pH, iltmætning, ledningsevne og temperatur anvendes en bærbar WTW 3430 Multi måler, hvortil der er koblet tre digitale sensorer. Disse sensorer måler henholdsvis pH, iltmætning og ledningsevne, mens de alle måler vandtemperaturen. Da sensorerne under målingerne skal nedsænkes i vandet anvendes et stykke flamingo, hvori der laves huller svarende til sensorerne, til at fastholde dem og sikre, at de ikke synker for langt ned i vandet. Målingerne foretages ved siden af kammeret samtidig med målingen af CO_2 afgangningen, da det vurderes, at tilstedeværelsen af sensorerne ikke forstyrrer strømningerne omkring kammeret. Opstillingen kan ses i figur 5.2.



Figur 5.2: Målingen af pH, iltindhold, ledningsevne og temperatur, her i Guldbækken, der foretages samtidig med målingen af CO_2 afgangningen.

5.3.2 Alkalinitet og CO_2 koncentration

Der udtages ved hver målestation en 50 ml vandprøve til bestemmelse af vandløbenes alkalinitet, der efterfølgende anvendes til at beregne CO_2 koncentration i vandløbene.

Prøverne udtages i plasticbeholdere med skruelåg. Ved udtagelsen af prøven skrues låget på mens beholderen er under vandet for at sikre, at prøven ikke indeholder luft. Vandprøverne udtages som det sidste hver dag, da temperaturændringer kan påvirke alkaliniteten og CO₂ koncentrationen. Prøverne holdes derfor kølige under transporten og opbevares indtil de analyseres i køleskab ved en lavere temperatur end den de udtages ved.

5.4 Atmosfærisk CO₂ koncentration

Der foretages ligeledes målinger af den atmosfæriske CO₂ koncentration ved hver målestation. Disse målinger foretages ved at frakoble slangerne fra CO₂ måleren, som placeres på bredden hævet over jorden. Den atmosfæriske CO₂ koncentration måles mellem målingerne af vandløbenes CO₂ afgang over ca. en halv time. Heraf beregnes gennemsnittet af målingen, der vil udgøre den atmosfæriske CO₂ koncentrationen ved den givne målestation.

5.5 Piston velocity

Resultaterne af CO₂ afgang samt vandløbenes og den atmosfæriske CO₂ koncentration anvendes efterfølgende til bestemmelse af piston velocity, k , ved de enkelte målestationer. Denne parameter beregnes ud fra følgende ligning:

$$k = F(CO_{2(vand)} - CO_{2(atm)})^{-1}$$

hvor F er den målte CO₂ afgang, $CO_{2(vand)}$ er CO₂ koncentrationen i vandløbene og $CO_{2(atm)}$ er ligevægtskoncentrationen, som er den CO₂ koncentration vandet vil have, hvis det er i ligevægt med den målte atmosfæriske koncentration.

5.6 Databehandling

De beregnede piston velocities vil efterfølgende blive analyseret statistisk. Formålet med den statistiske analyse er at analysere om projektets hypoteser kan verificeres. Hertil anvendes henholdsvis en tovejs variansanalyse (ANOVA) samt en kovariansanalyse (ANCOVA). ANOVA analysen anvendes til at undersøge, hvorvidt piston velocity er størst i høller eller stryg, mens ANCOVA analysen undersøger, hvorvidt der er en sammenhæng mellem piston velocity og vandløbenes hydrauliske parametre. For at kunne analysere resultaterne statistisk indeles piston velocity i grupper efter høl og stryg, samt efter Lindborg Å og Guldbækken.

5.6.1 To-vejs ANOVA

Denne analyse er særlig anvendelig i dette tilfælde, da den gør det muligt at undersøge effekten af flere *uafhængige* variabler på én *afhængig* variabel. I en tovejs ANOVA analyseres dette ved at se på variansen mellem gruppernes gennemsnit og det totale gennemsnit af samtlige værdier. Denne varians indeles yderligere i variationer, der kan forklares af undersøgelsen og variationer, der ikke kan forklares. De to uafhængige variabler i analysen udgør de variationer, der kan forklares ved undersøgelsen, givet ved de variationer, der kan tilskrives den ene og den anden variabel, samt deres interaktion. Effekten af de to variabler og effekten af deres interaktion, udtrykkes ved hver deres F-ratio. Denne værdi angiver, om der er en signifikant forskel i gennemsnittet mellem to grupper og dermed at den givne variabel har en signifikant effekt. For at der er tale om en signifikant effekt, skal der være en

sandsynlighed på under 0,05 for, at effekten er forårsaget af tilfældigheder og ikke som følge af variablernes påvirkning. Denne værdi relateres til analysens nul-hypotese, der antager, at der ikke er nogen effekt, altså at alle gruppernes gennemsnit er det samme. Opnås der i undersøgelsen et resultat større end 0,05, bør undersøgelsens hypotese forkastes. Dette betyder dog ikke at 0-hypotesen kan verificeres, da det faktum at der er en målbar effekt vil understøtte undersøgelsens hypotese. Der vil blot være usikkerhed omkring årsagen til effekten, da den ikke med sikkerhed kan tilskrives variablerne (Field, 2009). I denne undersøgelsen anvendes ANOVA analysen til at undersøge variationen i piston velocity i forhold til de to vandløb og i forhold til de to mesohabitater. Dermed er piston velocity den afhængige variabel, mens vandløbene og de to mesohabitater er de uafhængige variabler.

5.6.2 ANCOVA analyse

I en ANOVA analyse er det muligt at inkludere en eller flere kontinuertlige variabler. Disse såkaldte *kovariater* udgør variabler, der er ikke en del af den oprindelige undersøgelse, men som har en indflydelse på den afhængige variabel. En variansanalyse, hvori kovariater er inkluderet kaldes en kovariansanalyse (ANCOVA). Når kovariater inkluderes i en ANOVA analyse, er det muligt at reducere usikkerheden omkring de variationer, der ikke kan forklares med undersøgelsen, hvis disse variationer kan forklares med kovariaternes effekt. Dermed er det muligt at vurdere effekten af de uafhængige variabler mere præcist (Field, 2009). I den efterfølgende analyse vil strømhastigheden og dybden blive anvendt som kovariater, med det formål at undersøge om disse parametre har indflydelse på piston velocity.

6. Resultater

I det følgende afsnit vil resultaterne fra målingerne af henholdsvis de hydrauliske og vandkemiske parametre samt målingerne af CO₂ afgang blive præsenteret og analyseret. Som det første vil der blive redegjort for de to undersøgelsesområder, hvor de hydrauliske og vandkemiske forhold i Lindenberg Å og Guldbækken bliver klarlagt. De vandkemiske parametre anvendes videre til beregningen af vandløbenes CO₂ koncentrationer, hvorved piston velocity kan bestemmes. Efterfølgende præsenteres resultaterne for den målte CO₂ afgang. Formålet med analysen er at klarlægge, om variationerne i vandløbenes hydrauliske forhold har indflydelse på afgangningen ved at undersøge, om der er en sammenhæng mellem piston velocity og de hydrauliske parametre.

Der blev i hvert vandløb foretaget i alt seks målinger af både hydrauliske og vandkemiske parametre, samt af vandløbenes CO₂ afgang, fordelt på tre høller og tre stryg. Disse målinger er foretaget over fire dage i tidsrummet fra ca. 9:30 til ca. 15:30. Da målingerne er foretaget i samme tidsrum, er det muligt at analysere resultaterne i et tidsmæssigt perspektiv, der har betydning for de vandkemiske parametre og dermed også for CO₂ afgangningen.

6.1 Vandløbenes hydrauliske forhold

Her præsenteres resultaterne af de hydrauliske målinger foretaget i Lindenberg Å og Guldbækken, hvormed vandløbenes hydrauliske forhold klarlægges. I Lindenberg Å blev der foretaget målinger i en strækning på 53 m og i Guldbækken i en strækning på 87 m.

6.1.1 Bredde og dybde

For begge vandløb gælder det, at bredden varierer i både høller og stryg. I Lindenberg Å findes den største variation i bredden i høllerne, hvor bredden går fra 2,78 m i H1 til 1,97 m i H3. Bredden varierer mindre i strygene, hvor den største bredde på 2,5 m er målt i S2 og den mindste på 2,24 er målt i S1. I Guldbækken findes den største variation i bredden ligeledes i høllerne, der går fra 3,4 m i H1 til 2,27 m i H2. Variationen er også her mindst i strygene, hvor der er målt en bredde på 2,2 m i S3 og 2,5 m i S1. Den samlede oversigt over bredden ved alle målestationer findes i tabel 6.1.

I de to vandløb er den største dybde målt i høllerne og den laveste i strygene. I Lindenberg Å varierer dybden i høllerne fra 0,43 m i H1 til 0,58 m i H2, mens dybden i strygene går fra 0,37 m i S1 til 0,52 m i S3. I Guldbækken er den mindste dybde målt i høllerne på 0,32 m ved H1 og den største på 0,42 m ved H3, mens dybden i strygene går fra 0,28 m målt ved både S2 og S3, til 0,39 m ved S1. Den samlede oversigt over dybderne ved alle målestationer, kan ligeledes findes i tabel 6.1.

6.1.2 Strømhastighed

Strømhastigheden er, som beskrevet i 5.2.1, bestemt ud fra gennemsnittet af målingerne i tre dybder ved hver målestation. I begge vandløb findes den laveste strømhastighed i høllerne og den højeste blev målt i strygene. Der er i Lindenberg Å ved målestation H1 målt en strømhastighed på 0 m s⁻¹, mens den højeste strømhastighed i høllerne på 0,19 m s⁻¹ er målt ved H3. Ved målestationerne i strygene, er den højeste strømhastighed på 0,28 m s⁻¹ målt i

både S1 og S3, mens den laveste hastighed på $0,25 \text{ m s}^{-1}$ er målt i S2. I Guldbækken er der i H2 målt den laveste strømshastighed på $0,09 \text{ m s}^{-1}$, mens den højeste på $0,27 \text{ m s}^{-1}$ er målt i H1. Der er ved målestation S2 målt den laveste strømshastighed på $0,21 \text{ m s}^{-1}$, mens den højeste på $0,35 \text{ m s}^{-1}$ er målt ved S1. I tabel 6.1 er resultaterne for strømshastighedsmålingerne samlet.

Sted	Dybde [m]	Bredde [m]	Strømshastighed [m s^{-1}]
Gu H1	0,32	3,4	0,27
Gu H2	0,33	2,27	0,09
Gu H3	0,42	3	0,16
Gu S1	0,39	2,5	0,35
Gu S2	0,28	2,35	0,21
Gu S3	0,28	2,2	0,30
Li H1	0,43	2,78	0
Li H2	0,58	2,18	0,08
Li H3	0,44	1,97	0,19
Li S1	0,37	2,24	0,28
Li S2	0,44	2,5	0,25
Li S3	0,52	2,3	0,28

Tabel 6.1 viser resultaterne af de hydrauliske målinger. Strømshastigheden er her gennemsnittet af de tre målinger, der blev foretaget ved hver målestation.

6.1.3 Variationer i dybde og strømshastighed

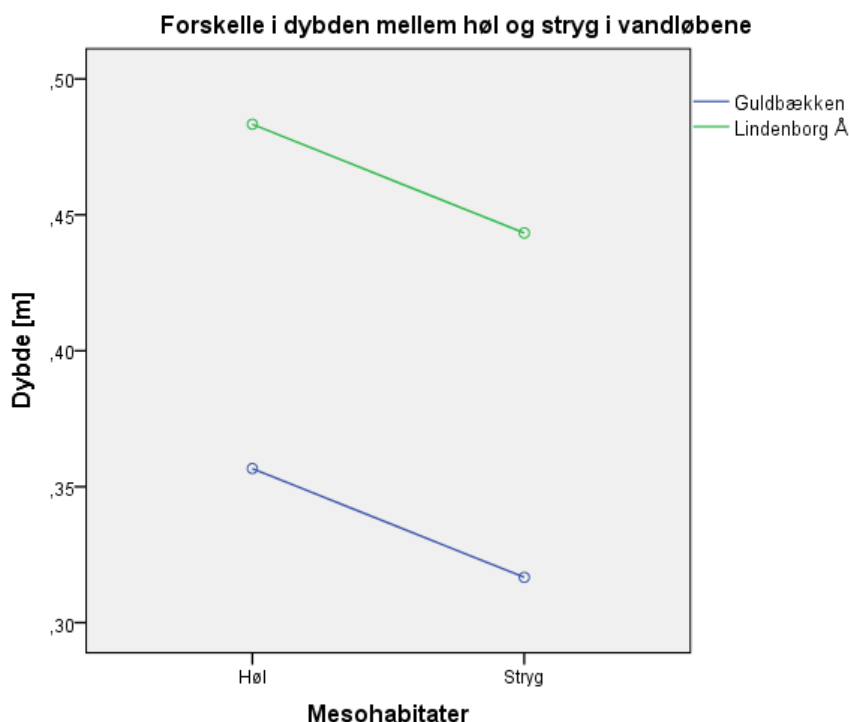
Ved at foretage to to-vejs ANOVA analyser hvori henholdsvis dybden og strømshastigheden er den uafhængige variabel med mesohabitaterne og vandløbene som de uafhængige variable, er det muligt at bestemme, hvorvidt disse parametre er betinget af mesohabitaterne. I ANOVA analysen anvendes den gennemsnitlige dybde og strømshastighed for at se, hvorledes disse parametre varierer både imellem de to vandløb, men også mellem høller og stryg.

Dependent Variable: Dybde

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	529,333	3	176,444	3,577	,066	,573
Intercept	19200,000	1	19200,000	389,189	,000	,980
Habitat	48,000	1	48,000	,973	,353	,108
Vandløb	481,333	1	481,333	9,757	,014	,549
Habitat * Vandløb	,000	1	,000	,000	1,000	,000
Error	394,667	8	49,333			
Total	20124,000	12				
Corrected Total	924,000	11				

Tabel 6.2 viser resultatet af to-vejs ANOVA analysen med dybden som den afhængige variabel.

Resultaterne af ANOVA analysen, hvor dybden er den uafhængige variabel viser, at der er en signifikant variation i dybden mellem de to vandløb, da sig. er mindre end 0,05. Derimod varierer dybden ikke signifikant mellem høller og stryg. Der er dog en variation i dybden mellem høller og stryg, omend den ikke er signifikant, hvilket er illustreret i figur 6.1.



Figur 6.1 viser forskellen i dybden mellem høl og stryg i de to vandløb baseret på den gennemsnitlige dybde.

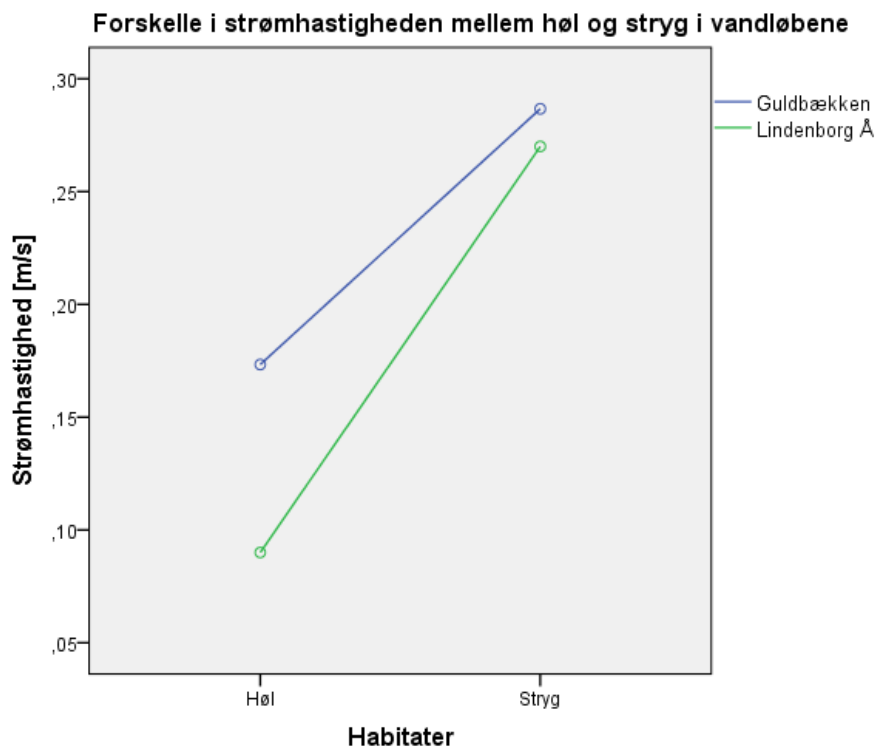
Figur 6.1 viser, at den gennemsnitlige dybde i begge vandløb er størst i høllerne og mindst i strygene. Det fremgår ligeledes, at dybden i det enkelte vandløb ikke varierer betydeligt mellem høl og stryg. Derimod findes den største variation i dybden mellem de to vandløb, hvor den gennemsnitlige dybde i Lindenberg Å er større end i Guldbækken. I Lindenberg Å er den gennemsnitlige dybde i høllerne 0,48 m og i strygene 0,44 m, mens den i Guldbækken er 0,36 m i høllerne og 0,32 m i strygene. Dermed er variationen i dybden mellem høl og stryg lige stor i begge vandløb.

Dependent Variable: Strømhastighed

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	,075	3	,025	4,433	,041	,624
Intercept	,504	1	,504	88,994	,000	,918
Vandløb	,008	1	,008	1,324	,283	,142
Habitat	,065	1	,065	11,388	,010	,587
Vandløb * Habitat	,003	1	,003	,588	,465	,068
Error	,045	8	,006			
Total	,625	12				
Corrected Total	,121	11				

Tabel 6.3 viser resultatet af to-vejs ANOVA analysen med strømhastigheden som den afhængige variabel.

I tabel 6.3 ses resultaterne af ANOVA analysen, hvori strømhastigheden er den uafhængige variabel. Heraf fremgår det, at der er en signifikant variation i strømhastigheden mellem høl og stryg da Sig. er under 0,05. Strømhastigheden varierer derimod ikke betydeligt mellem de to vandløb, hvilket er illustreret i figur 6.2.



Figur 6.2 viser forskellen i strømshastigheden mellem høl og stryg i det enkelte vandløb givet ved den gennemsnitlige strømshastighed.

I figur 6.2 ses variationen i den gennemsnitlige strømshastighed mellem høl og stryg i det enkelte vandløb. Heraf fremgår det, at strømshastigheden i begge vandløb er højest i strygene og lavest i hølterne. Den største variation findes i Lindenberg Å, hvor den gennemsnitlige strømshastighed i hølterne er på $0,09 \text{ m s}^{-1}$ og i strygene på $0,27 \text{ m s}^{-1}$. I Guldbækken er den gennemsnitlige strømshastighed på $0,17 \text{ m s}^{-1}$ i hølterne og $0,29 \text{ m s}^{-1}$ i strygene.

6.1.4 Vandspejlshældning

Vandløbenes fald er bestemt ud fra forskellen i højden målt mellem øverste og nederste målestation i hver strækning. I Lindenberg Å er der målt et fald på $0,0016 \text{ m m}^{-1}$ og i Guldbækken er faldet på $0,0033 \text{ m m}^{-1}$. Guldbækkens fald er dermed dobbelt så stort som faldet i Lindenberg Å.

6.2 Vandkemiske parametre

Resultaterne fra målingerne af de vandkemiske parametre bliver her præsenteret. Dermed redegøres der for vandløbenes vandkemiske forhold ved de enkelte målestationer. De vandkemiske parametre omfatter vandløbenes pH, iltmætning, ledningsevne, temperatur og alkalinitet. Derudover redegøres der for vandløbenes CO_2 koncentration, der er bestemt ud fra pH, temperatur og alkalinitet. Derfor gennemgås resultaterne af disse målinger forud for resultaterne af CO_2 koncentrationen. Afsnittet omfatter først en kort præsentation af de enkelte resultater, der efterfølgende bliver fulgt op af en analyse af sammenspillet mellem de forskellige parametre.

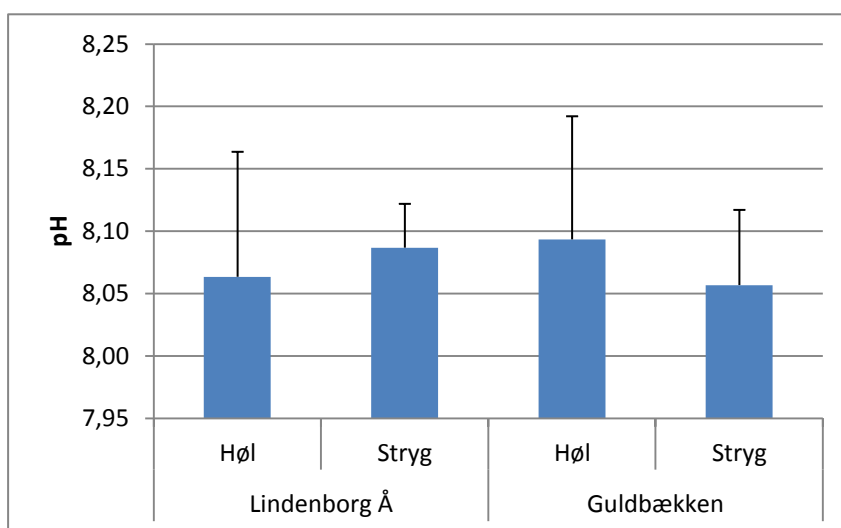
6.2.1 Ledningsevne og iltmætning

Der er i de to vandløb ikke målt betydelige forskelle i ledningsevnen mellem målestationerne i høl og stryg. Derimod er der en forskel mellem de to vandløb. I Lindenberg Å er der målt en gennemsnitlig ledningsevne på $530 \mu\text{S cm}^{-1}$, mens den gennemsnitlige ledningsevne i Guldbækken er målt til $497 \mu\text{S cm}^{-1}$. Dermed er resultatet et udtryk for, at der i Lindenberg Å er et større indhold af næringsstoffer i vandet end i Guldbækken.

Der er i Lindenberg Å målt en gennemsnitlig iltmætning på 101,00 % og i Guldbækken en iltmætning på 106,13 %. I begge vandløb er der målt variationer i iltmætningen, idet den er lavest i målingerne foretaget først på dagen og højest i de sidste målinger. Der kan ligeledes for disse målinger ikke dokumenteres en væsentlig forskel mellem iltmætningen i høl og stryg. Målingerne af ledningsevne og iltmætning er samlet i Bilag 1.

6.2.2 Alkalinitet, pH og temperatur

Alkaliniteten er bestemt i vandprøver udtaget ved hver målestation. Der er i Lindenberg Å målt en gennemsnitlig alkalinitet på $3,27 \text{ mekv L}^{-1}$, mens den i Guldbækken er målt til $3,03 \text{ mekv L}^{-1}$. Den målte alkalinitet ved de enkelte målestationer er opstillet i tabel 6.4. I begge vandløb er der målt en gennemsnitlig pH værdi på 8,1. Den forholdsmæssige fordeling af pH værdierne er illustreret i figur 6.3, mens de enkelte værdier er opstillet i tabel 6.4.



Figur 6.3 viser pH i Lindenberg Å og Guldbækken afbilledet med standardafvigelser.

Temperaturmålingerne blev ligeledes udført ved hver målestation. Her blev gennemsnitstemperaturen i Lindenberg Å målt til $12,8 \text{ }^\circ\text{C}$ og i Guldbækken målt til $12,6 \text{ }^\circ\text{C}$. De enkelte temperaturmålinger kan ligeledes findes i tabel 6.4.

6.2.3 CO₂ koncentrationen i vandløbene

På baggrund af alkalinitet, pH og temperaturen var det muligt at bestemme vandløbenes CO₂ koncentration. I Lindenberg Å er den laveste CO₂ koncentration på $2,21 \text{ mg L}^{-1}$ og den højeste på $3,5 \text{ mg L}^{-1}$ i høllerne. Ved målestationerne i strygene, er den laveste CO₂ koncentration på

2,41 mg L⁻¹ og den højeste på 2,86 mg L⁻¹. I Guldbækken er den laveste koncentration i høllerne målt ved H1 på 2,04 mg L⁻¹ og den højeste ved H3 på 3,08 mg L⁻¹. Den laveste CO₂ koncentration i strygene på 2,27 mg L⁻¹ er målt ved S1, mens den højeste på 2,98 mg L⁻¹ er målt ved S3. CO₂ koncentrationerne ved alle målestationer i begge vandløb kan ses i tabel 6.4.

Sted	pH	Temp [°C]	Alk [mekv L ⁻¹]	CO ₂ (vand)[mg L ⁻¹]	CO ₂ (atm) [mg L ⁻¹]
Gu H1	8,16	14	3,02	2,04	0,84
Gu H2	8,14	13	3,00	2,12	0,82
Gu H3	7,98	11,7	3,00	3,08	0,89
Gu S1	8,12	12,8	3,07	2,27	0,92
Gu S2	8,05	12,4	3,02	2,63	0,9
Gu S3	8	11,9	3,04	2,98	0,91
Li H1	8,16	14	3,28	2,21	0,83
Li H2	8,07	13,3	3,23	2,69	0,83
Li H3	7,96	12,6	3,26	3,5	0,85
Li S1	8,12	12,9	3,26	2,41	0,83
Li S2	8,09	12,2	3,28	2,61	0,88
Li S3	8,05	11,9	3,28	2,86	0,88

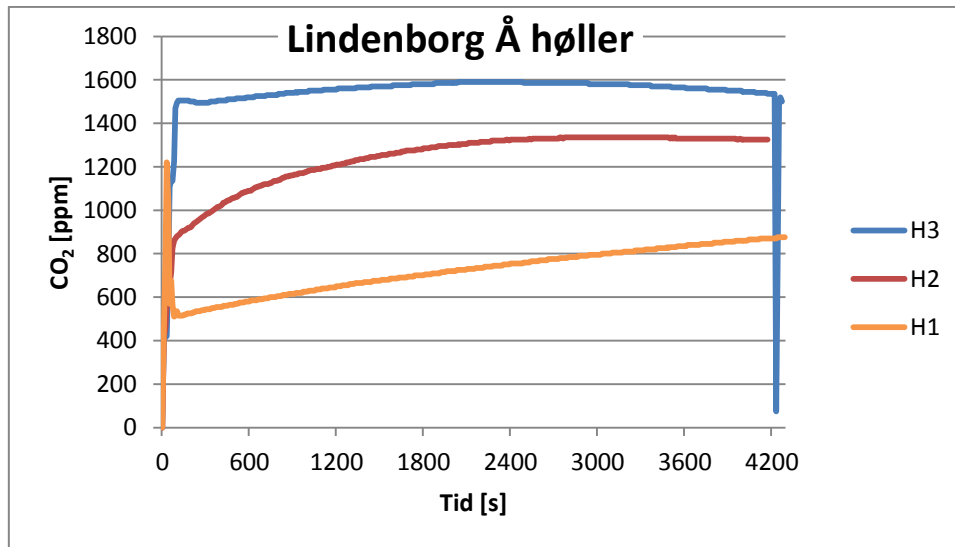
Tabel 6.1 viser Resultaterne for pH, temperatur, alkalinitet og CO₂ koncentrationen i Lindeborg Å og Guldbækken, samt resultatet af den atmosfæriske CO₂ koncentration.

I begge vandløb er målingerne i H3 og S3 foretaget først på dagen, mens målingerne ved H1 og S1 er foretaget som de sidste. Af tabel 6.4 fremgår det, at der i begge vandløb sker en stigning i temperaturen fra målingerne foretaget først på dagen til de sidste målinger. Denne variation i målingerne ses også i den målte pH, idet der sker en stigning i pH fra H3 og S3 til H1 og S1. Dermed viser resultaterne, at der i løbet af dagen sker en stigning i vandløbenes pH. Da vandets pH afhænger af den forholdsmæssige fordeling af carbonationer, kan stigningen i pH ses som et resultat af ændringer i koncentrationen af carbonationer. Det fremgår ligeledes af tabel 6.4, at der ved målestationerne i begge vandløb sker et fald i CO₂ koncentrationen fra H3 og S3 til H1 og S1. Et fald i CO₂ koncentrationen vil netop forårsage en stigning i pH. Denne variation i koncentrationen skyldes, at der i vandløb sker et naturligt fald i CO₂ koncentrationen i løbet af dagen, som følge af, at fotosyntesen producerer et overskud af ilt i forhold til forbruget ved respirationen (Sand-Jensen & Lindegaard, 2004). Dette underbygges desuden af vandløbenes iltmætning, der er stigende ved de samme målestationer.

Tabel 6.4 viser desuden resultaterne af den atmosfæriske CO₂ koncentration ved målestationerne. Disse målinger er foretaget i en højde mellem 0,7 m og 1 m over vandoverfladen. Den varierende højde skyldes forholdene ved vandløbene, der gjorde det vanskeligt at fortage målingerne i samme højde ved hver målestation. Det vurderes dog ud fra resultaterne, at højden ikke har haft indflydelse på CO₂ koncentrationen, da forskellen mellem de målte koncentrationer ikke er signifikant. Af tabel 6.4 fremgår det ligeledes, at der er en højere CO₂ koncentration i vandet i forhold til ligevægtskoncentrationen. Dermed viser resultaterne, at både Lindeborg Å og Guldbækken er overmættet med CO₂.

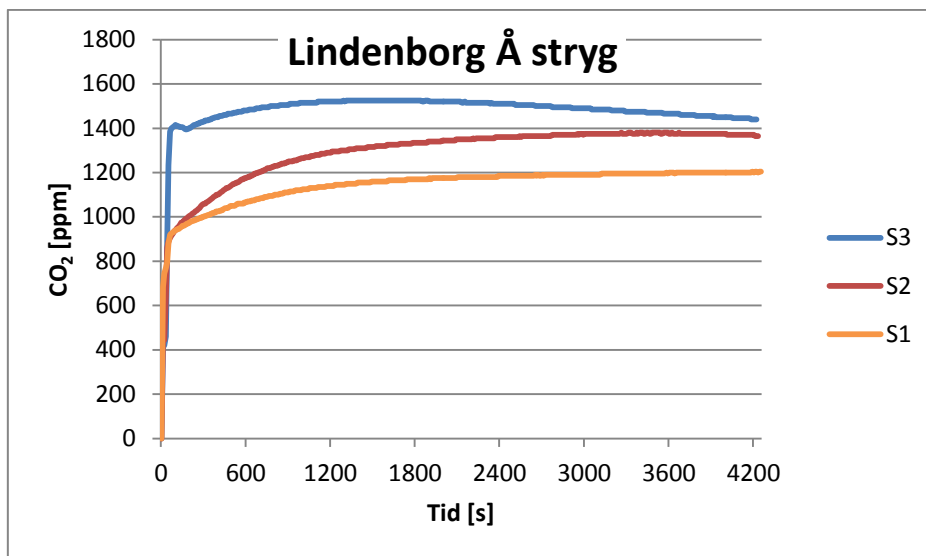
6.3 CO₂ afgasning

I det følgende præsenteres resultaterne af den målte CO₂ afgasning fra de enkelte målestationer i Lindenberg Å og Guldbækken, givet ved den akkumulerede CO₂ koncentration i kammeret målt over tid. Resultaterne fra det enkelte vandløb er inddelt i to diagrammer, der hver viser den målte afgasning fra målestationerne i henholdsvis høller og stryg. Dermed er det muligt at sammenligne, hvorledes afgasningen varierer i og mellem mesohabitaterne. Samtlige målinger er foretaget over minimum 60 minutter med aflæsning af koncentrationen hvert 10 s.



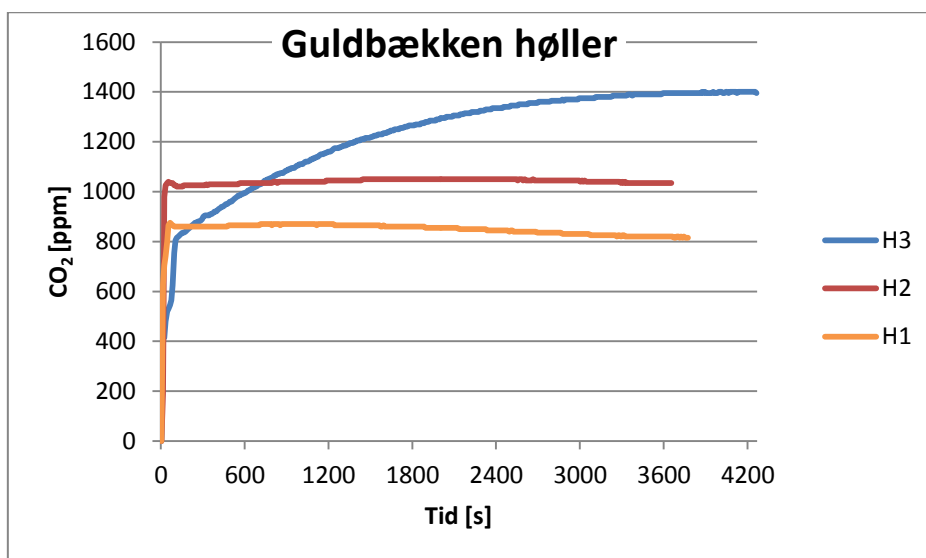
Figur 6.4 viser den akkumulerede CO₂ i kammeret målt over tid ved høllerne i Lindenberg Å.

Graferne i figur 6.4 viser, hvorledes CO₂ koncentrationen i kammeret stiger under målingerne. Den kraftigste stigning i CO₂ koncentrationen er målt ved H3, mens graferne for H2 og H1 angiver, at der her sker en langsommere stigning i koncentrationen. Ved målestationerne H2 og H3 fortsætter koncentrationen med at stige til et vist punkt, hvorefter den langsomt begynder at falde igen. Det uregelmæssige udseende af grafen i H1 skyldes, at CO₂ måleren ved målingens begyndelse blev kortvarigt afbrudt. Den efterfølgende opstartstid for måleren har således medført, at der her ikke er målt en større akkumulering af CO₂. Ved H3 topper grafen ved en CO₂ koncentration på 1590 ppm, der samtidig er den højeste koncentration målt i høllerne i Lindenberg Å. Grafen for H2 topper ved en koncentration på 1335 ppm, mens den højeste koncentration ved H1 er på 870 ppm.



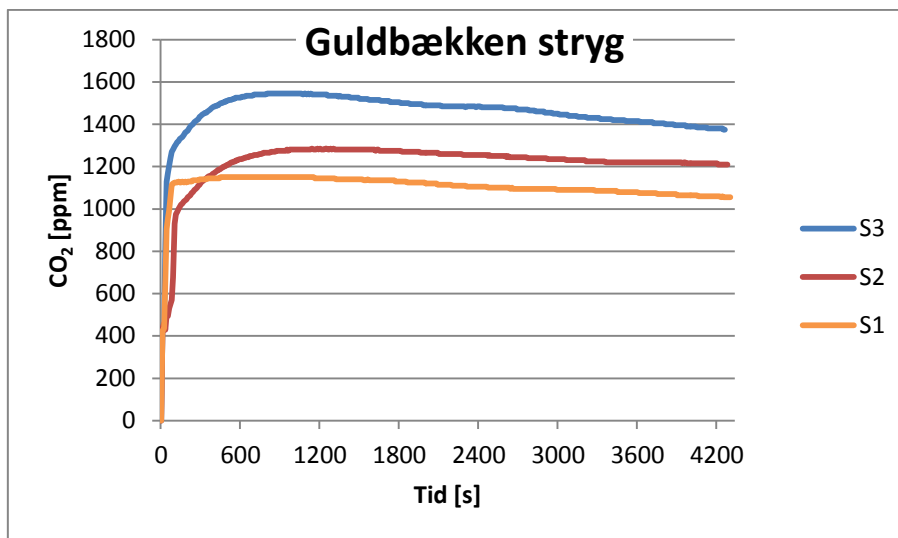
Figur 6.5 viser den akkumulerede CO_2 i kammeret målt over tid ved strygene i Lindenberg Å.

I strygene i Lindenberg Å er den største stigning i CO_2 koncentrationen målt ved S3. Grafen for denne målestation viser en hurtig stigning i koncentration, der stiger til 1525 ppm, men herefter forholdsvist hurtigt begynder at falde igen. Ved målestationerne S2 og S1 sker der en langsommere stigning i CO_2 koncentration, der ved S2 når op på 1380 ppm og ved S1 op på 1200 ppm. Sammenlignes graferne for høllerne og strygene, er der i Lindenberg Å ikke store forskelle i den målte CO_2 afgasning fra de to mesohabitater, hvis der ses bort fra målingen i H1.



Figur 6.6 viser den akkumulerede CO_2 i kammeret målt over tid ved høllerne i Guldbækken.

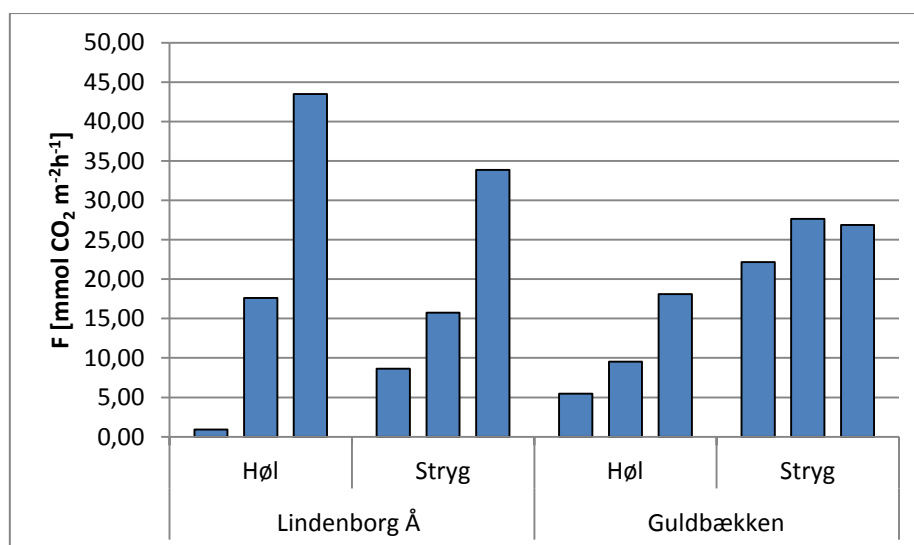
Ved målingerne i høllerne i Guldbækken er den højeste CO_2 koncentration på 1400 ppm målt i H3. Mens målingen i H2 når op på 1050 ppm. Den laveste koncentration er her på 870 ppm målt ved H1. Målingerne ved H2 og H1 viser en ensartet og hurtig stigning i koncentration, mens der i H3 forekommer en langsommere akkumulering af CO_2 i kammeret.



Figur 6.7 viser den akkumulerede CO₂ i kammeret målt over tid ved strygene i Guldbækken.

I strygene i Guldbækken er de højeste CO₂ koncentrationer på 1545 ppm, 1285 ppm og 1150 ppm målt ved henholdsvis H3, H2 og H1. De tre grafer toppes alle efter kort tid, hvorefter CO₂ koncentrationen langsomt falder igen.

De ovenstående grafer indikerer, at der i begge vandløb er større variationer i den målte CO₂ afgasning i høllerne end i strygene. Målingerne viser at den højeste akkumulering af CO₂ i kammeret forekommer ved målestationerne H3 og S3 i begge vandløb og den mindste ved H1 og S1. Dermed er der en tidlig variation i forhold til akkumuleringen af CO₂ i kammeret, der er størst i målingerne foretaget tidligst på dagen og mindst i de senest foretagne målinger, hvilket kan relateres til den faldende CO₂ koncentration. Fra graferne anvendes den lineære stigning over 16 punkter til beregning af den mængde CO₂ der afgasses fra vandløbene. I Bilag 2-5 vises målingerne af CO₂ afgasningen i en samlet graf for den enkelte dags målinger.

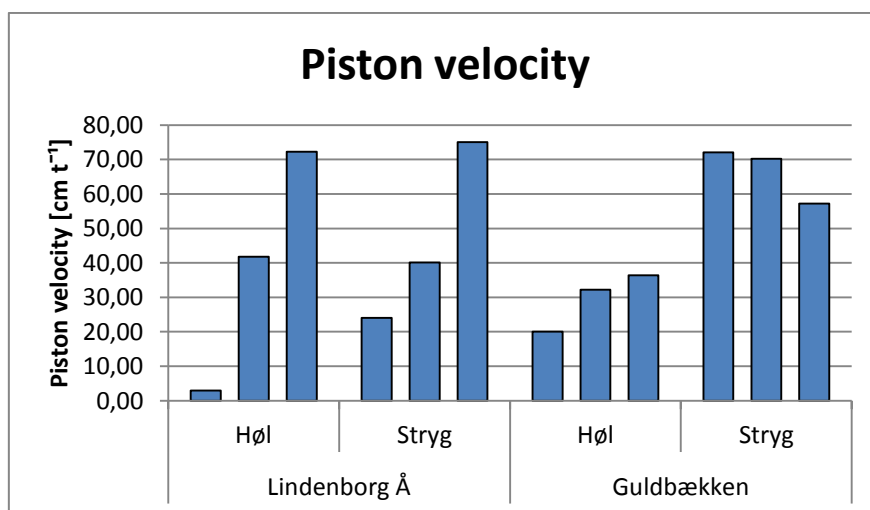


Figur 6.8: CO₂ afgasningen fra høller og stryg i Lindenborg Å og Guldbækken.

I Lindenberg Å er der fra høllerne målt en gennemsnitlig afgasning på $20,68 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, mens den gennemsnitlige afgasning fra strygene er på $19,41 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. I Guldbækken er der målt en gennemsnitlig afgasning på $11,04 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ fra høllerne og fra strygene en afgasning på $25,55 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. CO_2 afgasningen fra de to vandløb er illustreret i figur 6.8.

6.4 Piston velocity

Beregningen af piston velocity i de to vandløb er foretaget på baggrund af den målte afgasning, CO_2 koncentrationen i vandet og den beregnede ligevægtskoncentration, som vandet ville have, hvis det var i ligevægt med atmosfærens CO_2 koncentration. Se ligning 2.3 i 2.3. Resultaterne heraf viser, at piston velocity i Lindenberg Å ligger mellem $2,97$ og $75,06 \text{ cm t}^{-1}$. I høllerne varierer den fra $2,97$ til $72,22 \text{ cm t}^{-1}$, og i strygene fra $24,02$ til $75,06 \text{ cm t}^{-1}$. I Guldbækken varierer piston velocity mellem $20,07$ og $72,09 \text{ cm t}^{-1}$. Her varierer den i høllerne fra $20,07$ til $36,40 \text{ cm t}^{-1}$, og i strygene fra $57,23$ til $72,09 \text{ cm t}^{-1}$. De samlede resultater kan ses i figur 6.9.



Figur 6.9 viser den beregnede piston velocity i høller og stryg i de to vandløb.

6.5 Variansanalyse

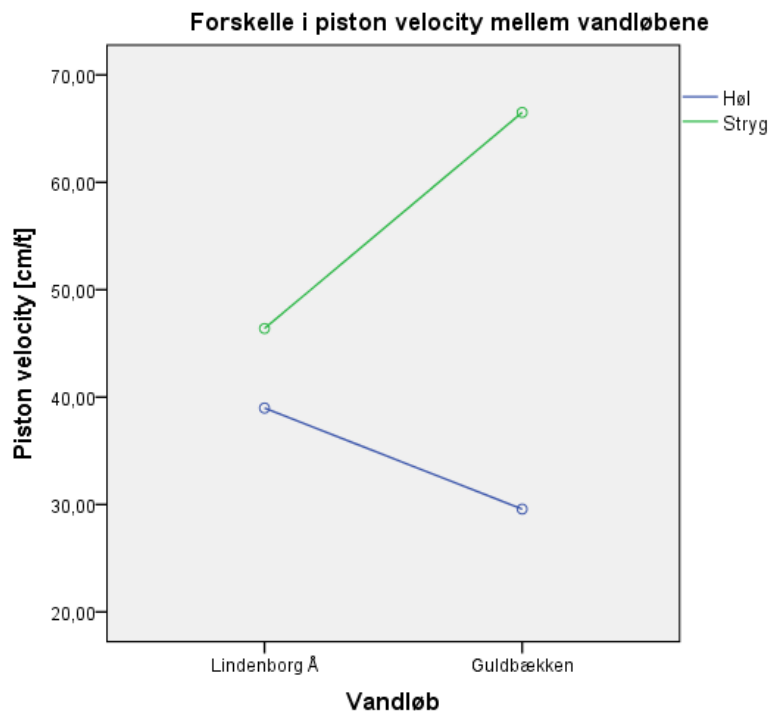
I denne del af analysen anvendes en statistisk variansanalyse til at undersøge, hvordan piston velocity varierer ved forskellene i vandløbenes hydrauliske forhold og dermed teste undersøgelsens hypoteser. Variansanalysen tester forskelle mellem en afhængig variabel, der er manipuleret af to uafhængige variabler. I denne situation er piston velocity den afhængige variabel, der testes i forhold til de to uafhængige variabler i form af de to vandløb og de to mesohabitater. Dermed klarlægger variansanalysen, hvilken variabel, der har den største effekt på piston velocity og dermed på afgasningen. Resultaterne af analysen vil vise om de uafhængige variabler har en signifikant effekt, der bestemmes ud fra variationerne, på den afhængige variabel eller ej. Det skal her pointeres, at denne analyse ikke giver svar på, hvad der forårsager variationerne i piston velocity, men blot viser, at der er variationer og om de er signifikante eller ej.

Dependent Variable: Piston velocity

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	2214,369	3	738,123	1,459	,297	,354
Intercept	24693,984	1	24693,984	48,822	,000	,859
Habitat	1474,527	1	1474,527	2,915	,126	,267
Vandløb	85,975	1	85,975	,170	,691	,021
Habitat * Vandløb	653,868	1	653,868	1,293	,288	,139
Error	4046,374	8	505,797			
Total	30954,727	12				
Corrected Total	6260,743	11				

Tabel 6.5 viser resultaterne af to-vejs ANOVA analysen markeret med de røde cirkler.

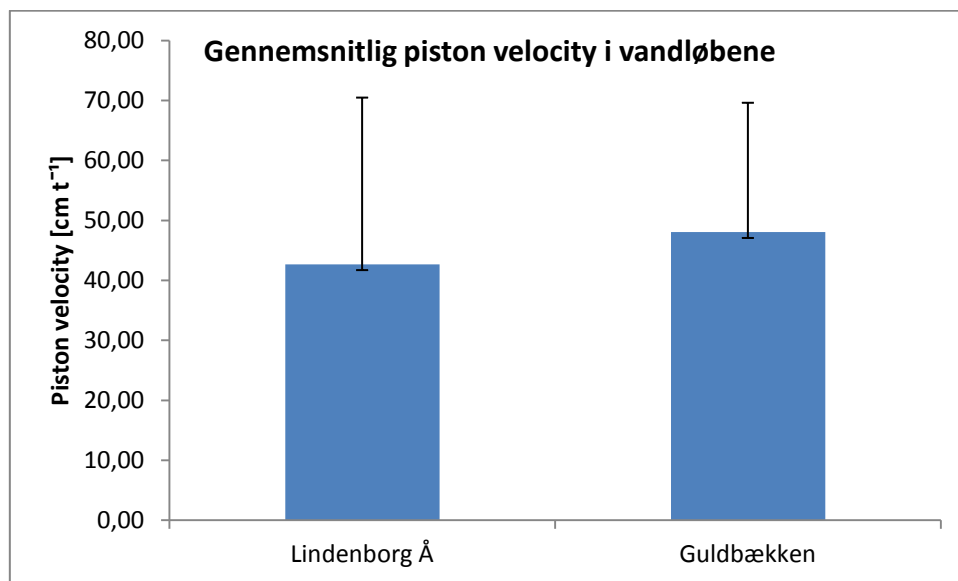
Tabel 6.5 viser resultaterne af to-vejs ANOVA analysen. I analysen er effekten af de uafhængige variabler på piston velocity blevet testet. Der er både kigget på effekten af vandløbene og mesohabitaterne, samt effekten af deres fælles interaktion. Heraf fremgår det at de uafhængige variabler ikke har nogen signifikant effekt på piston velocity, da sig. er over 0,05. Resultaterne er nedenfor afbilledet grafisk.



Figur 6.10 viser forskellene i piston velocity mellem de to vandløb i høllerne og strygene givet ved den gennemsnitlige piston velocity.

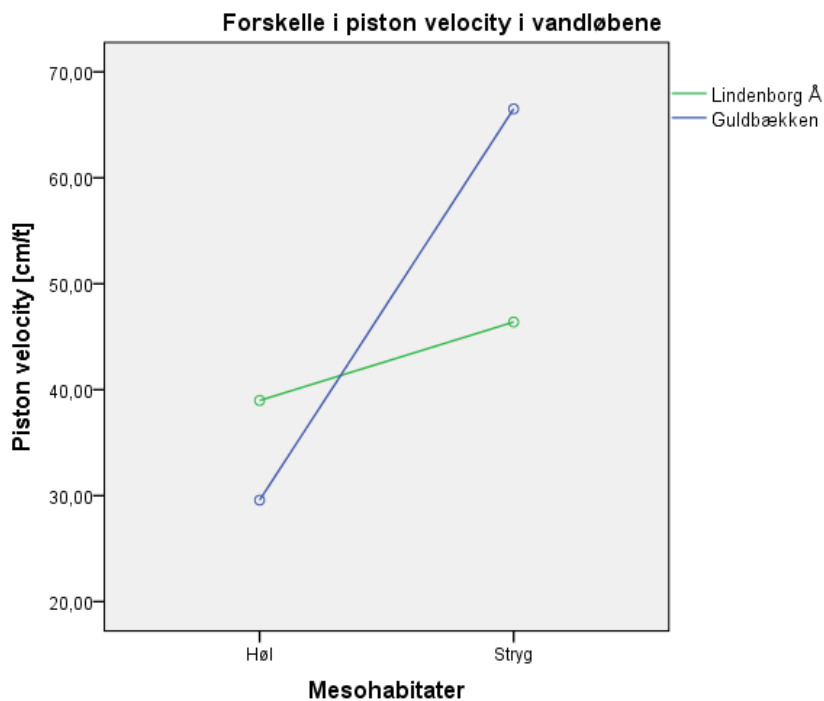
Figur 6.10 viser en sammenligning af den gennemsnitlige piston velocity i høllerne og strygene mellem de to vandløb. Her er den gennemsnitlige piston velocity i strygene i Lindborg Å på 46,39 cm t⁻¹, mens den i Guldbækken er 66,51 cm t⁻¹. I høllerne er piston velocity i Lindborg Å på 38,98 cm t⁻¹ og i Guldbækken på 29,57 cm t⁻¹. Dermed forekommer den største variation i piston velocity mellem de to vandløb i strygene, mens variationen i

høllerne er mindre udtalt. I figur 6.11 sammenlignes den samlede gennemsnitlige piston velocity vandløbene imellem.



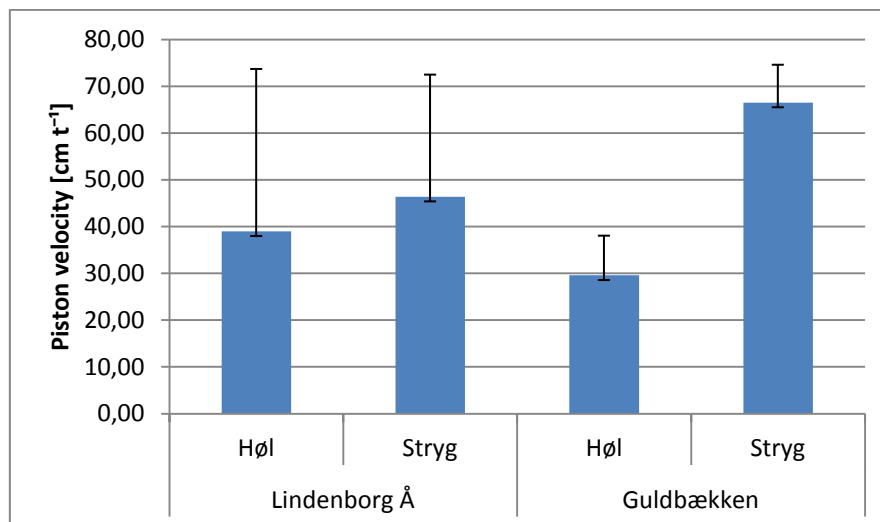
Figur 6.11 viser den gennemsnitlige piston velocity i de to vandløb når mesohabitaterne ignoreres, her afbilledet med standardafvigelser.

Heraf fremgår det, at der ikke er en væsentlig forskel i piston velocity, hvis høller og stryg ignoreres. I Lindenborg Å er den gennemsnitlige piston velocity på 42,69 cm t⁻¹, mens den i Guldbækken er på 48,04 cm t⁻¹.



Figur 6.12 viser forskellene i piston velocity i vandløbene mellem høller og stryg givet ved den gennemsnitlige piston velocity.

I figur 6.12 ses forskellene i den gennemsnitlige piston velocity i vandløbene mellem høllerne og strygene. Heraf fremgår det, at der er en betydelig variation i piston velocity mellem høller og stryg i Guldbækken, mens forskellen er mindre udtalt i Lindenberg Å. Dette resultat er desuden afbilledet i figur 6.13.



Figur 6.13 viser en sammenligning af den gennemsnitlige piston velocity mellem høller og stryg i vandløbene med standardafvigelser.

6.5.1 Kovariansanalyse

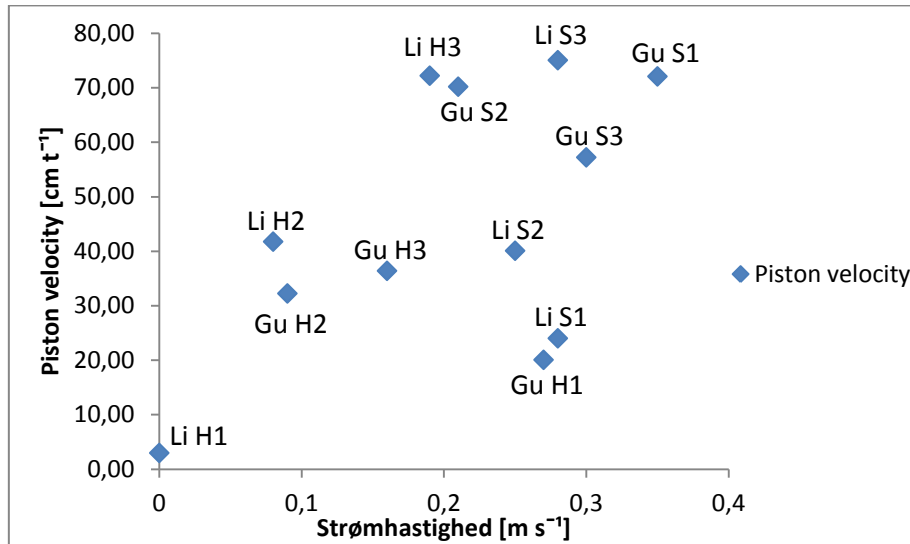
Det fremgår tydeligt af figur 6.10 og 6.12, at der er variationer i piston velocity både mellem de to vandløb og mellem habitaterne. På baggrund af analysens resultater er der dog usikkerhed om, hvorvidt disse variationer kan tilskrives effekten af de uafhængige variabler eller tilfældigheder. For at mindske usikkerheden omkring dette, foretages der en ANCOVA analyse, hvori det er muligt at teste, om piston velocity påvirkes af vandløbenes hydrauliske parametre. Denne analyse foretages ved at inkludere strømhastigheden og dybden som kovariater og dermed undersøge deres effekt på piston velocity.

Dependent Variable: Piston velocity

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	2867,201	4	716,800	1,479	,305	,458
Intercept	426,673	1	426,673	,880	,379	,112
Strømhastighed	652,832	1	652,832	1,347	,284	,161
Vandløb	1,077	1	1,077	,002	,964	,000
Habitat	25,848	1	25,848	,053	,824	,008
Vandløb * Habitat	983,857	1	983,857	2,029	,197	,225
Error	3393,542	7	484,792			
Total	30954,727	12				
Corrected Total	6260,743	11				

Tabel 6.6 viser resultatet af ANCOVA analysen, markeret med den røde cirkel, hvor strømhastighed indgår tilføjet som kovarians.

Det fremgår af resultatet af ANCOVA analysen, hvori strømhastigheden er kovariansen, at der ikke er nogen signifikant sammenhæng mellem strømhastigheden og piston velocity, da Sig. er på 0,284 og dermed større end 0,05. Resultatet af ANCOVA analysen er nedenfor illustreret i punktdiagram, der viser spredningen af piston velocity i forhold til strømhastigheden.



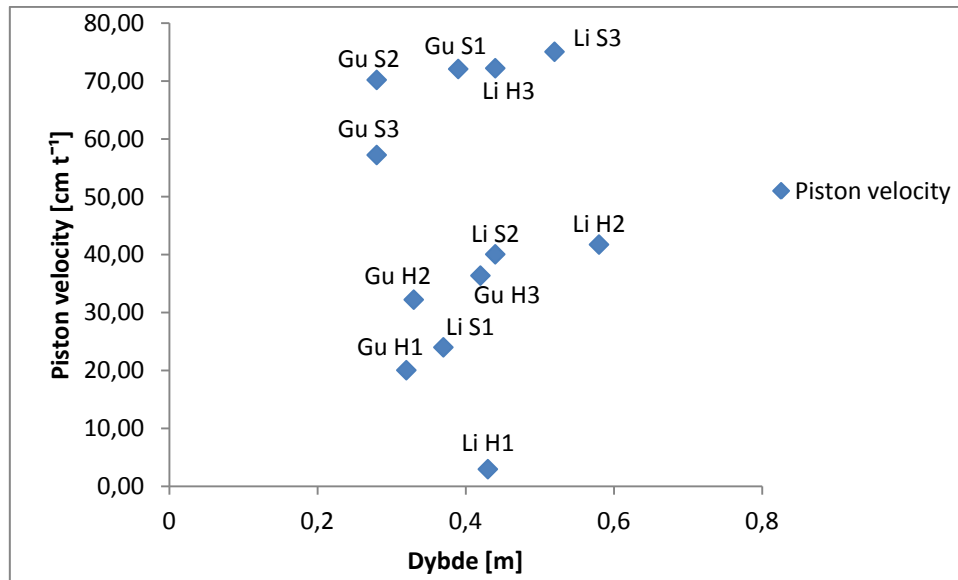
Figur 6.14 viser spredningen af piston velocity i forhold til strømshastigheden.

Figur 6.14 anskueliggør resultatet af ANCOVA analysen. Heraf fremgår det, at der er en tilfældig spredning af piston velocity i forhold til strømshastigheden. Det er tidligere blevet dokumenteret, at der er en signifikant forskel i strømshastigheden mellem høller og stryg. Derfor vil en sammenhæng mellem piston velocity og strømshastigheden være afspejlet ved en spredning, hvor piston velocity målt i strygene ville være sammenfaldende med de højeste strømshastigheder. Modsat vil piston velocity målt i høllerne være sammenfaldende med de laveste strømshastigheder. En sådan fordeling kan tilnærmelsesvis ses i målingerne foretaget i Guldbækken, mens målingerne i Lindenberg Å tydeligere viser, at der ikke er en sammenhæng mellem piston velocity og strømshastigheden.

Dependent Variable: Piston velocity						
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	3105,963 ^a	4	776,491	1,723	,249	,496
Intercept	52,641	1	52,641	,117	,743	,016
Dybde	891,594	1	891,594	1,978	,202	,220
Vandløb	804,143	1	804,143	1,784	,223	,203
Habitat	2124,332	1	2124,332	4,714	,067	,402
Vandløb * Habitat	653,868	1	653,868	1,451	,268	,172
Error	3154,780	7	450,683			
Total	30954,727	12				
Corrected Total	6260,743	11				

Tabel 6.7 viser resultaterne af ANCOVA analysen, markeret med den røde cirkel, hvor dybden indgår som kovarians.

I ANCOVA analysen, hvori dybden indgår som kovarians, viser resultaterne, at der heller ikke her er nogen signifikant sammenhæng mellem dybden og piston velocity, da Sig. er større end 0,05. Resultatet heraf er ligeledes anskueliggjort i figur 6.15.



Figur 6.15 viser spredningen af piston velocity i forhold til dybden.

Heraf fremgår det, at der ved den samme dybde er målt en betydelig variation i piston velocity. Figuren viser således tydeligt, at variationer i dybden ikke har en betydelig effekt på piston velocity og der dermed ikke er en sammenhæng mellem piston velocity og dybden.

7. Diskussion

I denne undersøgelse blev CO₂ afgangningen fra Lindenberg Å og Guldbækken bestemt ved at anvende et flux kammer, der måler den direkte afgangning fra vandløbene. Der findes adskillige undersøgelser, hvori flux kamre er blevet anvendt til at måle CO₂ afgangningen fra forskellige vandmiljøer. Derimod er undersøgelser af CO₂ afgangningen fra mindre vandløb begrænset og foretaget ved anvendelse af andre metoder, hvor CO₂ afgangningen bestemmes ud fra piston velocity. Et eksempel på en sådan metode er anvendelsen af propan som sporgas, hvor piston velocity for propan (k_{propan}) beregnes og efterfølgende konverteres til k_{CO_2} (Billett, et al., 2004), herefter kan afgangningen beregnes ved at anvende ligning 2.2. Resultaterne af denne undersøgelse vil derfor blive diskuteret i forhold til resultaterne af undersøgelsen foretaget af Sand-Jensen og Staehr, 2012, hvori CO₂ afgangningen fra Pøle Å og Havelse Å er målt ved at anvende et flux kammer.

Fordelen ved denne metode er, at det er muligt at måle den direkte afgangning fra vandløbet. Derved øges målesikkerheden, da direkte målinger ikke er forbundet med samme målesikkerheder som indirekte målinger (Sand-Jensen & Staehr, 2012). Et eksempel på en indirekte metode er anvendelsen af sporgasser, hvor der kan opstå usikkerheder i forbindelse med konverteringen fra k_{propan} til k_{CO_2} (Billett, et al., 2004). Dermed opnås der også ved anvendelse af et flux kammer en mere præcis bestemmelse af piston velocity (Sand-Jensen & Staehr, 2012).

Metoden er af nogle forfattere herunder (Kremer, et al., 2003) og (Vachon, et al., 2010) blevet kritiseret for at måle en højere afgangning som følge af, at der skabes yderligere turbulens omkring kammeret, hvilket kan øge gasudvekslingen mellem vandet og atmosfæren. I denne undersøgelse var det tydeligt, at der under målingerne blev dannet turbulens omkring kammeret. Dette forekom i høj grad ved målingerne i strygene og i en mindre grad i høllerne. Det har i denne undersøgelse ikke været muligt at dokumentere, hvorvidt turbulensen omkring kammeret har påvirket den målte CO₂. Men da der i enkelte målinger i høllerne er målt lige stor eller større afgangning end i strygene, kan det indikere, at målingerne ikke er blevet yderligere påvirket af turbulensen omkring kammeret. Turbulensen og strømmingen omkring kammeret medførte samtidig, at kammeret ved nogle målinger lå ustabilt og blev trykket længere ned i vandet. Det medførte, at rumfanget hvori afgangningen blev målt, reelt har været mindre ved disse målinger. Da det ikke var muligt at måle det præcise rumfang, blev der ved opmålingen af kammeret skønnet en højde, der svarede til kammerets position i forhold til vandoverfladen.

I både Lindenberg Å og Guldbækken er der dokumenteret en daglig variation i CO₂ koncentrationen på grund af det fotosyntetiske forbrug af CO₂ og produktion af ilt. Variationer i CO₂ koncentrationen i vandløb er ligeledes årstidsbestemt som følge af variationer i tilførslen af CO₂ rigt jordvand og forholdet mellem fotosyntese og respiration. Om sommeren er der en lavere tilførsel af jordvand, som følge af mindre nedbør og samtidig er der et højt fotosyntetisk forbrug af CO₂ på grund af en større udbredelse af primærproducenter. Derfor er CO₂ koncentration i vandløb ofte lavest om sommeren, hvilket ligeledes kan ses i resultaterne fra

undersøgelsen i Pøle Å og Havelse Å, hvor de årlige variationer i CO₂ koncentrationen er dokumenteret (Sand-Jensen & Staehr, 2012).

De ovennævnte variationer har ligeledes indflydelse på vandløbets hydrauliske forhold. Tilstedeværelsen af vandplanter kan ændre strømforholdene og turbulensen i strækninger af vandløbet og vandstanden kan variere i forhold til nedbørsmængden. Med henblik på at foretage en grundigere undersøgelse af, hvilke parametre der har indflydelse på gasudvekslingen, vil det derfor være hensigtsmæssigt at foretage målinger over forskellige årstider.

I denne undersøgelse er der ikke påvist nogen umiddelbar sammenhæng mellem vandløbenes hydrauliske forhold og piston velocity på meso-habitat niveau. Dette står i modsætning til undersøgelsen i Pøle Å og Havelse Å, hvor der er påvist en sammenhæng mellem strømhastigheden og piston velocity i to kanaliserede vandløb, hvori der ikke forekommer samme interne variationer i vandløbenes hydrauliske forhold (Sand-Jensen & Staehr, 2012). Det kan derfor diskuteres, hvilke andre parametre der har indflydelse på gasudvekslingen. Da denne undersøgelse er foretaget om sommeren, sammenlignes resultaterne med de tilsvarende målinger i Pøle Å og Havelse Å. Samtidig tages der hensyn til, at undersøgelsen af Sand-Jensen og Staehr, 2012 er foretaget over en længere vandløbsstrækning, hvor denne undersøgelse kun beskæftiger sig med den øvre del af Lindenberg Å og Guldbækken. Derfor sammenlignes resultaterne udelukkende med de målinger, der er foretaget i den øvre del af Pøle Å og Havelse Å. Her er der om sommeren målt en noget lavere piston velocity i forhold til den der er målt i både høller (med undtagelse af to målinger) og stryg i Lindenberg Å og Guldbækken. Da den høje piston velocity i disse vandløb ikke kan forklares med variationer i de hydrauliske parametre ses der på betydningen af vandløbenes udformning. Her er en væsentlig forskel mellem kanaliserede og naturlige vandløb, at der på grund af det mæandrerende forløb og variationer i de hydrauliske forhold, dannes betydeligt mere turbulens i naturlige vandløb end der forekommer i kanaliserede vandløb. Dermed indikerer resultaterne fra Lindenberg Å og Guldbækken, at turbulensen har stor betydning for afgangningen.

En væsentlig forskel mellem målingerne i de to vandløb er, at der i Lindenberg Å er målt over en kortere strækning end i Guldbækken. Begrundelsen herfor er udvælgelsen af målestationer, der i begge vandløb er placeret efter hinanden. I Guldbækken var strygene længere, hvorfor afstanden mellem høllerne her var længere end i Lindenberg Å. Netop afstanden mellem høller og stryg kan have betydning for den målte afgangning, idet målingerne i de to vandløb giver forskellige resultater. I Lindenberg Å er der målt store variationer i afgangningen både fra høller og stryg. Samtidig er der med undtagelse af en enkelt måling, ingen betydelig forskel i afgangningen fra høller og stryg. Derimod er der i to af målingerne i høllerne dokumenteret en højere afgangning end fra de tidsmæssigt tilsvarende målinger i strygene. Dermed kan der i Lindenberg Å ikke dokumenteres en klar forskel mellem CO₂ afgangningen fra høller og stryg. I Guldbækken er afgangningen fra høllerne mindre end afgangningen fra strygene, dog er der ikke en signifikant forskel mellem målingerne. Resultaterne Guldbækken indikerer således, at der er forskelle i afgangningen målt fra høller og stryg. Da der i begge vandløb ikke findes nogen sammenhæng mellem variationerne i de

hydrauliske parametre og afgangningen, kan resultaterne indikere, at der ved større afstande mellem mesohabitaterne, kan observeres en forskel i CO₂ afgangningen fra høllet og stryg.

I denne undersøgelse er piston velocity beregnet ud fra CO₂ koncentrationen i en vandprøve udtaget ved en tilfældig dybde, hvori det antages at CO₂ er godt opblandet med vandet. Dermed tages der ikke højde for variationer i koncentrationsgradienten, der kan forekomme i vandsøjlen. Ved at måle denne koncentrations gradient er det muligt at estimere en mere præcis piston velocity, da der opnås en bedre viden om CO₂ bevægelse i vandsøjlen.

Resultaterne af denne undersøgelse viser, at afgangningen i den øvre del af Lindenberg Å og Guldbækken ikke afhænger af variationerne i de hydrauliske forhold. Dette resultat kan dog ikke nødvendigvis skaleres op til at gælde for hele vandløbet. Nedstrøms i et vandløb vil de hydrauliske forhold som regel ændre sig i og med at vandløbet bliver bredere, dybere og får en langsommere strømhastighed. I kraft af en større dybde nedsættes turbulensen også selv i et mæandrerende vandløb. For at klarlægge hvorvidt CO₂ afgangning reelt er forskellig i høl og stryg, er det nødvendigt at foretage lignende undersøgelser af CO₂ afgangningen fra mellemstore og store vandløb over hele vandløbsstrækningen.

8. Konklusion

Flere undersøgelser har vist, at der fra mindre vandløb afgasses betydelige mængder CO_2 til atmosfæren, hvorfor disse bør inkluderes i opstillingen af regionale og globale kulstofbudgetter. Det er imidlertid vanskeligt at kvantificere denne afgasning, da vandløb er dynamiske og derfor har varierende hydrauliske og vandkemiske forhold. Derfor er der behov for mere viden omkring sammenhænge mellem disse forhold og CO_2 afgasningen for at blive bedre i stand til at estimere omfanget af afgasningen. Med udgangspunkt i vandløbene Lindene og Guldbækken, var formålet med dette projekt således at undersøge, om *CO_2 udvekslingen mellem vandet og atmosfæren er betinget af småskala variationer i de vandløbshydrauliske forhold eller er der samme udveksling i hele vandløbet?*

Heri blev CO_2 afgasningen målt i høller og stryg ved at anvende et flux kammer, hvori den akkumulerede CO_2 over tid blev målt og efterfølgende anvendt til at bestemme CO_2 afgasningen. Piston velocity blev beregnet ud fra den målte CO_2 afgasning, samt fra målinger af forskellen mellem CO_2 koncentrationen i vandløbene og koncentrationen vandet ville have, hvis det var i ligevægt med atmosfæren. For at undersøge om der er sammenhænge mellem CO_2 afgasningen og variationer i de hydrauliske forhold, blev der opstillet følgende hypoteser:

Afgasningen er større fra stryg end fra høller på grund af en større turbulens her

og

Der er en sammenhæng mellem piston velocity og strømhastigheden

Målingerne af CO_2 koncentrationen i vandløbene viser, at begge vandløb er overmættet med CO_2 , hvor den gennemsnitlige koncentration i Lindene ligger på $2,71 \text{ mg L}^{-1}$ og i Guldbækken på $2,52 \text{ mg L}^{-1}$ i forhold til ligevægtskoncentrationen på henholdsvis $0,85 \text{ mg L}^{-1}$ og $0,88 \text{ mg L}^{-1}$.

Resultaterne af målingerne af CO_2 afgasningen viste, at der i Lindene fra høller gennemsnitligt afgasses $20,68 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ og fra strygene $19,41 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. I Guldbækken var den gennemsnitlige afgasning på $11,04 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ fra høllerne og på $25,55 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ fra strygene. På baggrund af disse resultater blev der i Lindene beregnet en piston velocity på $38,98 \text{ cm t}^{-1}$ i høllerne, mens den i strygene var på $46,39 \text{ cm t}^{-1}$. I Guldbækken blev den beregnet til $29,57 \text{ cm t}^{-1}$ i høllerne og i strygene til $66,51 \text{ cm t}^{-1}$.

For at besvare de opstillede hypoteser blev der foretaget en to-vejs ANOVA analyse, hvori variationerne i piston velocity blev analyseret i forhold til de to vandløb og de to mesohabitater. Resultatet heraf viste, at der ikke var en signifikant sammenhæng mellem variationerne i piston velocity og de to habitater. Der blev ligeledes ikke fundet en signifikant sammenhæng mellem piston velocity og de to vandløb. Efterfølgende blev der foretaget en ANCOVA analyse, hvori det blev undersøgt, om der kunne findes en sammenhæng mellem piston velocity og dybden og strømhastigheden. Resultaterne heraf viste, at der ikke kunne påvises en signifikant effekt på piston velocity forårsaget af dybden eller strømhastigheden.

På baggrund af disse resultater er det dermed ikke muligt at verificere de opstillede hypoteser. Dermed viser resultaterne af CO_2 afgasningen fra de pågældende strækninger af

Lindborg Å og Guldbækken ikke er betinget af småskala variationer i de hydrauliske forhold. Det er derimod ikke muligt at besvare, hvorvidt der kan ses bort fra disse variationer i hele vandløbet. Denne undersøgelse og dens resultater har således understreget kompleksiteten i kvantificeringen af CO₂ afgang fra vandløb.

Resultaterne af denne undersøgelse viser, at der fra den øvre del af mindre vandløb sker en betydelig afgang af CO₂. Dermed underbygger undersøgelsen vigtigheden i, at disse vandløb inddrages som en betydelig faktor i opstillingen af regionale og globale kulstof budgetter. Den underbygger samtidig behovet for yderligere undersøgelser af hvilke parametre, der er styrende for gasudvekslingen i disse vandløb, med henblik på at kunne estimere CO₂ afgang på tværs af vandløbsstørrelser.

9. Bibliografi

- Alin, S. R. et al., 2011. Physical controls on carbon dioxide transfer velocity and flux in low-gradient river systems and implications for regional carbon budgets. *Journal of Geophysical Research*, 27 Januar.
- Allan, J. D. & Castillo, M. M., 2007. *Stream ecology*. 2. udgave red. s.l.:Springer.
- Bade, D. L., 2009. Gas exchange at the air-water interface. I: G. E. Likens, red. *Biogeochemistry of inland waters*. s.l.:Elsevier, pp. 28-36.
- Battin, T. J. et al., 2009. The boundless carbon cycle. *Nature geoscience*, September, pp. 598-600.
- Berthelsen, M. et al., 2005. Globale kredsløb. I: M. Berthelsen & J. Fenger, red. *Naturens kemi - processer og påvirkninger*. København: Gyldendal, pp. 301-322.
- Billett, M. F. et al., 2004. Linking land-atmosphere-stream carbon fluxes in a lowland peatland system. *Global Biogeochemical Cycles*, 10 Februar.
- By og Landskabsforvaltningen, 2015. *Aalborg kommune*. [Online]
Available at: <http://www.aalborg.dk/media/3006798/folder-om-guldbaekstien-internet.pdf>
[Senest hentet eller vist den 12 juli 2015].
- Ciais, P. et al., 2013. *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press.
- Cole, J. J. & Prairie, Y. T., 2009. Dissolved CO₂. I: G. E. Likens, red. *Biogeochemistry of inland waters*. s.l.:Elsevier, pp. 343-353.
- Cole, J. J. et al., 2007. Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems*, 13 Februar, pp. 171-184.
- Danmarks Naturfredningsforening, u.d. *Danmarks Naturfredningsforening*. [Online]
Available at: <http://www.fredninger.dk/fredning/rold-skov-gravlevdalen/>
[Senest hentet eller vist den 11 august 2015].
- Dodds, W. K., 2002. *Freshwater ecology concepts and environmental applications*. s.l.:Academic Press.
- Fatkowski, P. et al., 2000. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *SCIENCE*, 13 Oktober, pp. 291-296.
- Field, A., 2009. *Discovering statistics using SPSS*. s.l.:SAGE Publications.
- Fitts, C. R., 2002. Gas-water partitioning. I: *Groundwater science*. s.l.:Elsevier, pp. 447-450.

- Jähne, B. & Haußecker, H., 1998. Air-water gas exchange. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, pp. 443-468.
- Khadka, M. B., Martin, J. B. & Jin, J., 2014. Transport of dissolved carbon and CO₂ degassing from a river system in a mixed silicate and carbonate catchment. *Journal of Hydrology*, 8 April, pp. 391-402.
- Kremer, J. N., Nix, S. W., Buckley, B. & Roques, P., 2003. Technical note: Conditions for using the floating chamber method to estimate air-water gas exchange. *Estuaries*, August, pp. 985-990.
- Mackenzie, F. T. & Lerman, A., 2006. *Carbon in the biosphere - Earth's outer shell*. s.l.:Springer.
- Manahan, S. E., 2011. *Water Chemistry: Green Science and Technology of Nature's Most Renewable resource*. s.l.:CRC Press.
- Mattson, M. D., 2009. Alkalinity. I: G. E. Likens, red. *Biogeochemistry of inland waters*. s.l.:Elsevier Inc, pp. 348-353.
- Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2012. *Redegørelse for Støvring-Torsted. Afgiftsfinansieret grundvandskortlægning*, s.l.: Miljøministeriet og Naturstyrelsen.
- Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2013. *Redegørelse for Rold Skov Syd og Valsgård - Afgiftsfinansieret grundvandskortlægning*, s.l.: Miljøministeriet og Naturstyrelsen.
- Nordjyllands Amt og Miljøcenter Aalborg, 2007. *Natura 2000-basisanalyse Rold Skov, Lindenborg Ådal og Madum Sø*, Aalborg: Miljøcenter Aalborg.
- Nordjyllands Amt, 2004. *Nordjyllands Amt*. [Online]
Available at:
<http://web.archive.org/web/20070702100641/http://www.nja.dk/Serviceomraader/NaturOgMiljoe/Natur/LindenborgAadal/Lindenborg.htm#Subtitel1>
[Senest hentet eller vist den 10 juli 2015].
- Obicon, 2008. *Opsamlingsrapport for Aktivitetsområde 19 – Aalborg SV*, Aalborg: Miljøministeriet.
- Pankow, J. F., 1991. *Aquatic chemistry concepts*. s.l.:Lewis Publishers.
- Prairie, Y. T. & Cole, J. J., 2009. Carbon, Unifying currency. I: G. E. Likens, red. *Biogeochemistry of inland waters*. s.l.:Elsevier, pp. 453-456.
- Raymond, P. A., Caraco, N. F. & Cole, J. J., 1997. Carbon dioxide concentration and atmospheric flux in the Hudson River. *Estuaries*, Juni, pp. 381-390.
- Sand-Jensen, K. & Lindegaard, C., 2004. *Ferskvandsøkologi*. København: Gyldendal.

Sand-Jensen, K. & Staehr, P. A., 2012. CO₂ dynamics along Danish lowland streams: water–air gradients, piston velocities and evasion rates. *Biogeochemistry*, pp. 615-628.

Stumm, W. & Morgan, J. J., 1996. *Aquatic chemistry*. s.l.:John Wiley & Sons, Inc..

Vachon, D., Prairie, Y. T. & Cole, J. J., 2010. The relationship between near-surface turbulence and gas transfer velocity in freshwater systems and its implications for floating chamber measurements of gas exchange. *Limnology and Oceanography*, pp. 1723-1732.

Wallin, M. B. et al., 2013. Evasion of CO₂ from streams – The dominant component of the carbon export through the aquatic conduit in a boreal landscape. *Global Change Biology*, pp. 785-797.

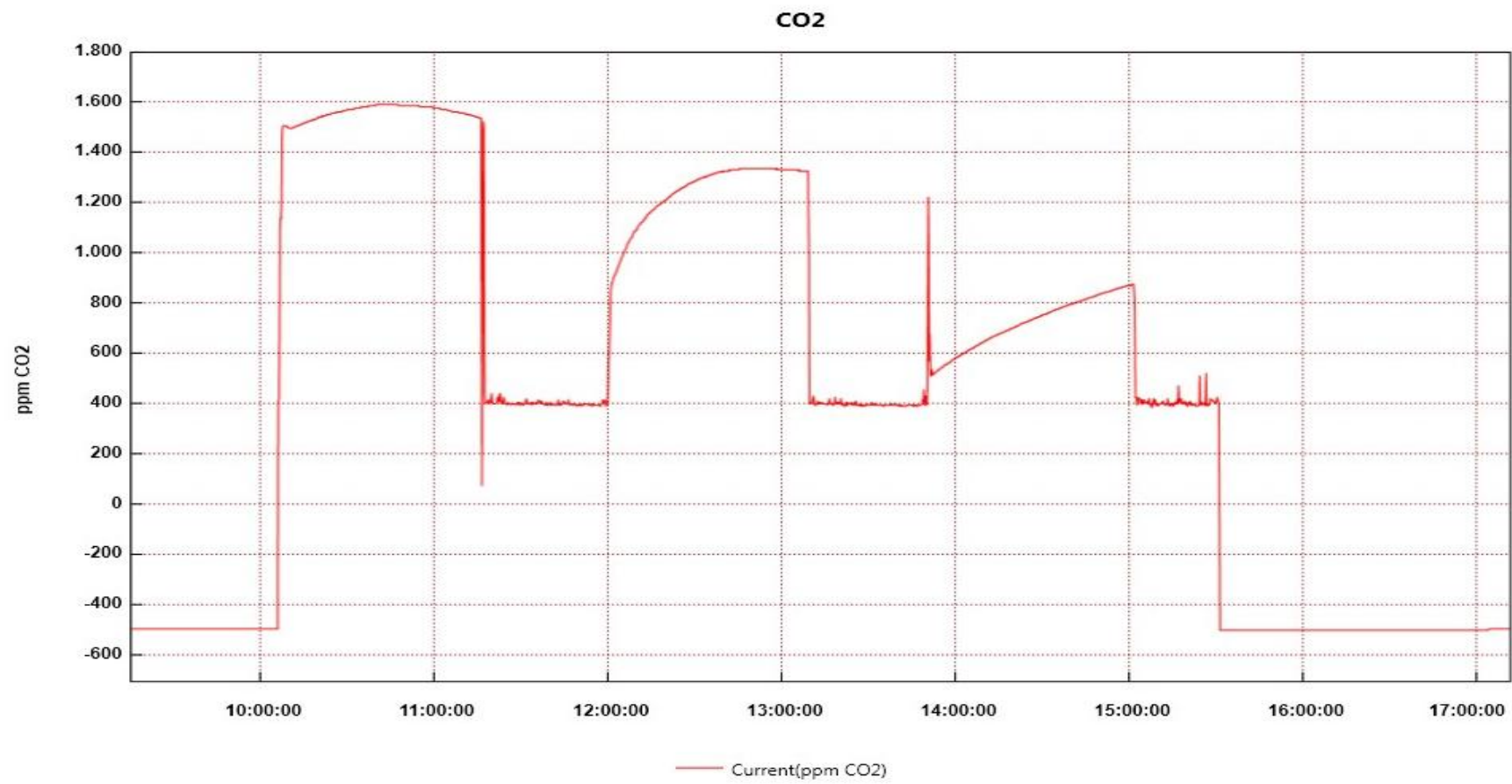
BILAG 1

Ledningsevne og iltmætning

Sted	Ledningsevne [$\mu\text{S cm}^{-1}$]	Iltmætning %
Gu H1	494	113,2
Gu H2	496	111,2
Gu H3	500	101,6
Gu S1	497	105,8
Gu S2	498	103,7
Gu S3	499	101,3
Li H1	528	104
Li H2	528	102
Li H3	529	96,7
Li S1	531	103,7
Li S2	531	100,4
Li S3	531	99,2

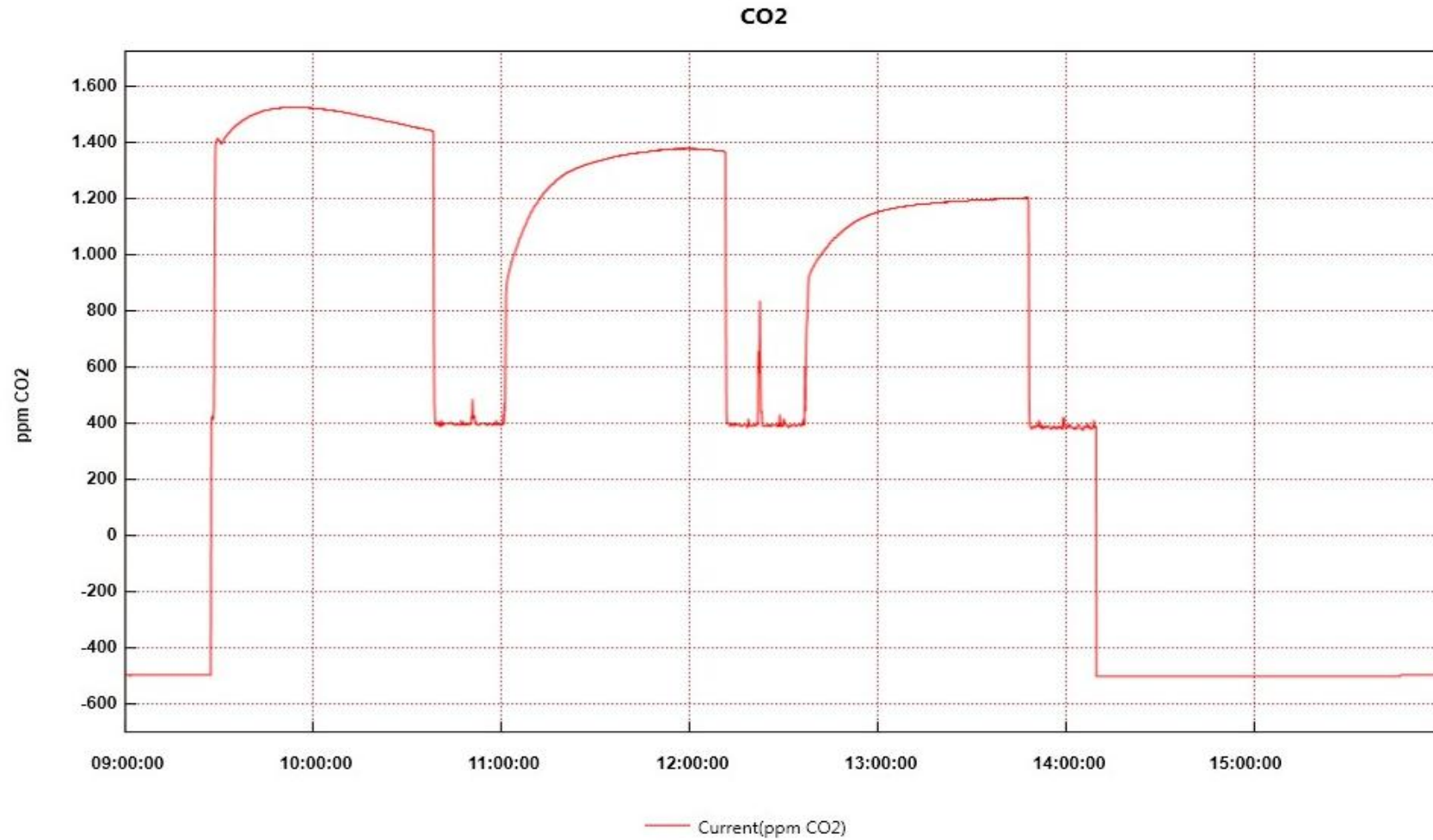
BILAG 2

CO₂ målinger Lindenberg Å: Høller



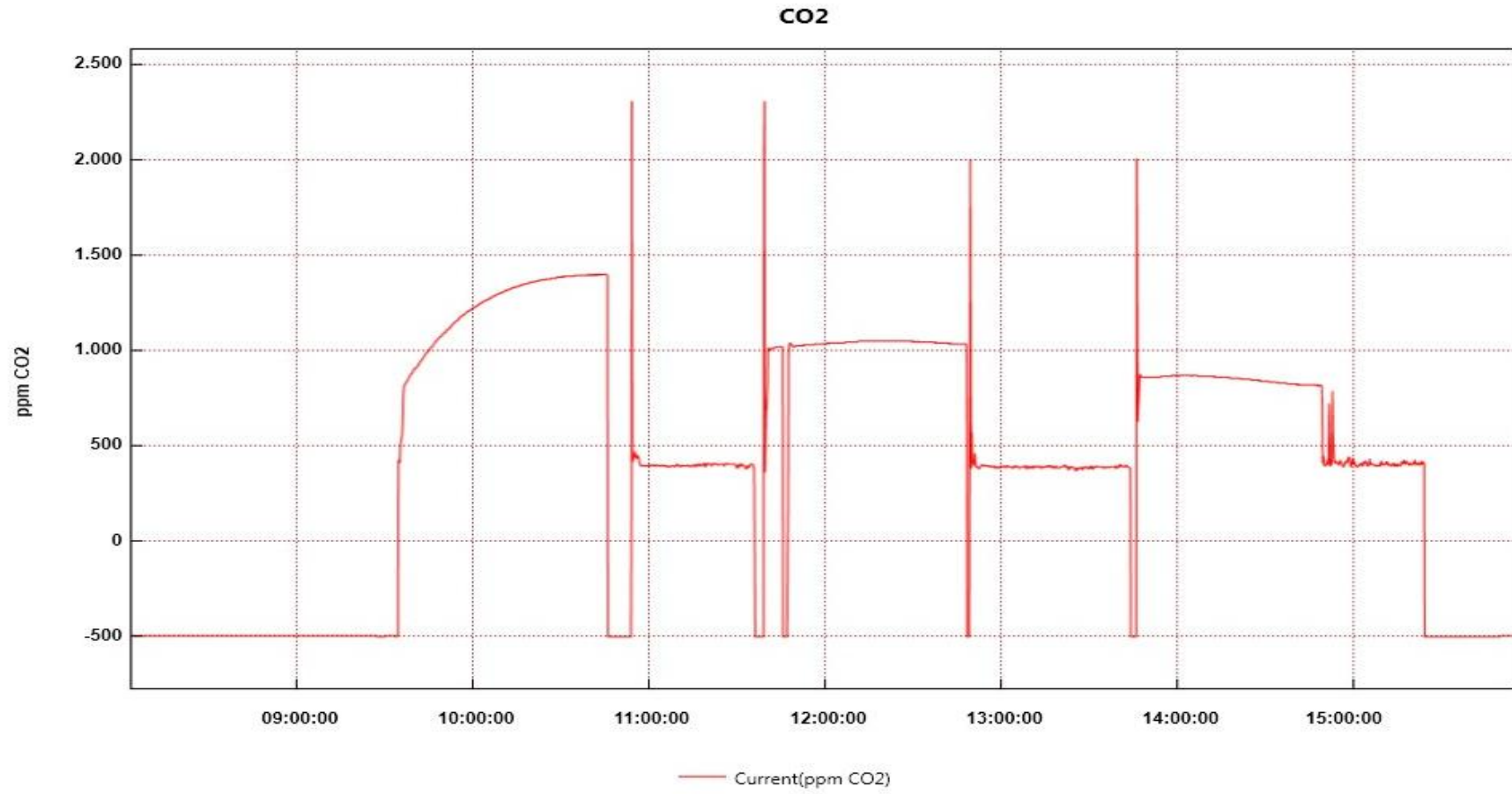
BILAG 3

CO₂ afgangning Lindenborg Å: Stryg



BILAG 4

CO₂ afgasning Guldbækken: Høller



BILAG 5

CO₂ afgasning Guldbækken: Stryg

