

Fra reaktiv overvåking til prediktiv vannbehandling: Total uorganisk karbon (TIC) og dets betydning for vannkjemi og karbonbalanse i lukkede oppdrettsanlegg

Artikkelen beskriver utviklingen av en modellbasert TIC-estimator, der hensikten er å synliggjøre hvordan bedre forståelse og overvåking av TIC kan bidra til mer robust beslutningstaking i landbasert akvakultur.

Sara Queralt og Eldar Lien, begge Searas

sara.queralt@searas.no

Fakta:

- $\text{TIC} = \text{CO}_2^* + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ – tre uorganiske karbonarter i dynamisk pH-avhengig likevekt
- TIC måler total karbonbeholdning. TA (Total Alkalinitet) måler bufferkapasitet. Angir sum av basiske komponenter, evne til å nøytralisere syre.
- Kun løst CO_2 kan degasses – bikarbonat og karbonat må først konverteres
- Forhøyet CO_2 er en primær stressfaktor for fisk og utløser en selvforsterkende respiratorisk tilbakekoblingssløyfe
- Akseptable CO_2 -nivå utelukker ikke høy TIC, et skjult reservoar som kan frigjøres ved pH-fall
- Fiskestress øker metabolsk CO_2 -produksjon og forverrer vannkjemisk ubalanse
- Kronisk sub-letalt CO_2 reduserer forutnyttelse og vekstrater
- Mangel i TIC-regnskapet medfører ubevisst overskridelse av tillatte utslippsgrenser
- Karbonhåndtering er i ferd med å bli et konkurransefortrinn ved fornying og utvidelse av lisenser
- Den syntetiske TIC sensoren utleder TIC fra pH, temperatur, salinitet og alkalitet
- TIC sensoren modellerer CO_2 -konsentrasjoner på tvers av pH-scenarioer og muliggjør proaktiv risikovurdering
- Skalerbar på tvers av landbaserte systemer

FHF-prosjekt

Artikkelen er basert på resultat fra et pågående FHF finansiert prosjekt:

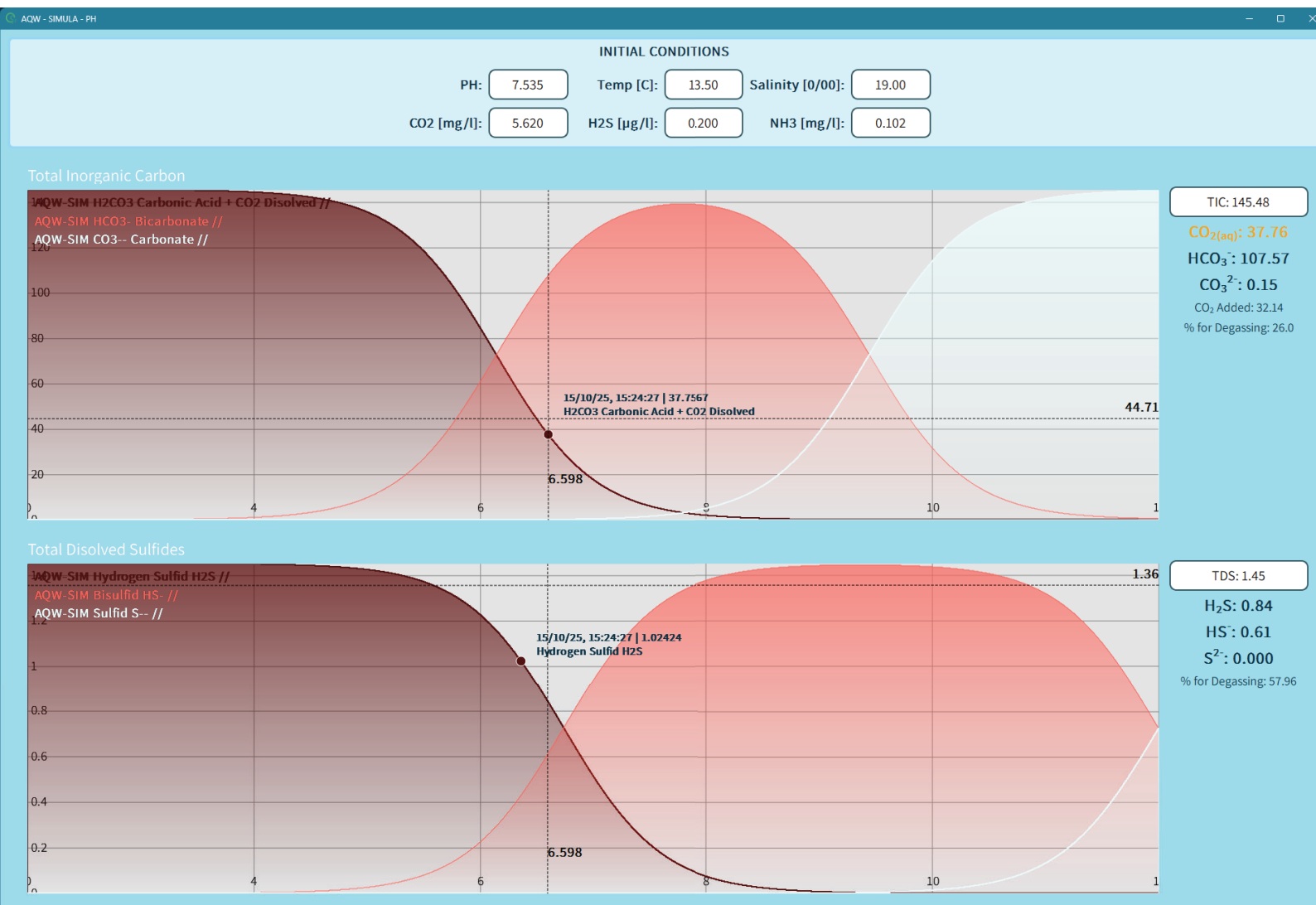
910827 – Utvikling og pilotering av syntetisk sensor for sanntidsovervåking av uorganisk karbon (TIC) i RAS-anlegg – FHF

For å lese mer gå til:

<https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/910827/>

eller skann QR-koden under:





Figur 1: AquaWARE – simulering viser øverst likevekten mellom de tre karbonforbindelsene i vann under gitte driftsforhold, og nederst likevekten mellom de tre sulfidforbindelsene.

Nøyaktig overvåking og prediksjon av vannkjemi er en nøkkelfaktor i bærekraftig og lønnsom akvakultur. Blant de viktigste parameterne som styrer vannkvaliteten i lukkede anlegg, skiller Total Uorganisk Karbon (TIC) seg ut som en kritisk, og til nå oversett parameter. TIC beskriver den samlede uorganiske karbonbelastningen i vannet og gir dermed et mer fullstendig bilde av systemets CO₂-risiko enn enkeltmålinger av pH eller løst CO₂ alene.

For beslutningstakere er dette viktig fordi utilstrekkelig kontroll på TIC kan påvirke fiskevelferd, driftsstabilitet, dimensjonering av vannbehandling og etterlevelse av utslippskrav. Denne artikkelen forklarer hva TIC er, hvordan TIC henger sammen med total alkalitet

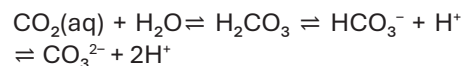
(TA) og pH-dynamikk, og hvorfor TIC bør inngå i både operasjonell styring og karbonregnskap.

Artikkelen bygger på Searas sitt arbeid i FHF-prosjekt 910827, med Baring og Mowisom industripartnere, og beskriver utviklingen av en modellbasert TIC-estimator som del av det digitale beslutningsstøttesystemet AquaWARE. Hensikten er å synliggjøre hvordan bedre forståelse og overvåking av TIC kan bidra til mer robust beslutningstaking i landbasert akvakultur.

Forståelse av totalt uorganisk karbon

Total uorganisk karbon refererer til den samlede konsentrasjonen av alle løste uorganiske karbonforbindelser

i en vannløsning. I en fisketank er TIC fordelt på tre kjemiske former: løst karbondioksid (CO₂*), bikarbonat-ioner (HCO₃⁻) og karbonat-ioner (CO₃²⁻). Disse artene eksisterer i en dynamisk pH-avhengig likevekt beskrevet av følgende reaksjonskjede:



Under typiske driftsforhold er bikarbonat dominerende og utgjør majoriteten av det uorganiske karboninnholdet. Endringer i pH endrer imidlertid den forholdsmessige fordelingen av de tre artene, med direkte konsekvenser for CO₂-nivåene i vannet og dermed fiskehelse og drift. Se figur 1 for illustrasjon av likevekt mellom de tre karbonforbindelsene i vann.

Det er viktig å skille TIC fra Total Alkalitet (TA). Dette er to parametere som er nært beslektede, men som måler fundamentalt ulike egenskaper ved vannet:

- **TIC** kvantifiserer de totale molene av uorganisk karbon per volumenhet, uavhengig av kjemiske former:

$$\text{TIC} = [\text{CO}_2^*] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

- **TA** kvantifiserer løsnings syrenøytraliserende kapasitet, uttrykt i ladningsekvivalenter: $\text{TA} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$

Differansen mellom de to avslører den relative balansen mellom løst CO_2 og karbonat:

$$\text{TA} - \text{TIC} \approx [\text{CO}_3^{2-}] - [\text{CO}_2^*]$$

I praktisk forstand representerer TIC det totale karboninnholdet i vannet, mens TA representerer systemets bufferkapasitet, det vil si dets motstand mot pH-endringer. Begge er essensielle for en fullstendig forståelse av karbonat-kjemien. TIC er den mer direkte indikatoren for karbon tilgjengelig for avgassing og for de **potensielle** CO_2 -konsentrasjonene som kan oppnås under varierende pH-forhold.

Betydningen av TIC i akvakultur

Mange oppdrettsanlegg fremstår som stabile basert på CO_2 og pH, men har

samtidig et skjult karbonreservoar som kan utløse raske og kritiske CO_2 -topper. Dette reservoaret beskrives av total uorganisk karbon (TIC).

I intensivt landbasert fiskeoppdrett - enten i resirkulerende akvakultursystemer (RAS) eller gjennomstrømningsanlegg - er det å opprettholde stabil og kontrollert vannkjemi en forutsetning for dyrevelferd og økonomisk lønnsom drift. Konsentrasjonen av løst CO_2 er en primær stressfaktor for fisk. Forhøyet CO_2 utløser fysiologiske stressreaksjoner, øker respirasjonsraten, og skaper i kritiske situasjoner en positiv tilbakekoblingsløype der fiskegenerert CO_2 ytterligere øker systemets CO_2 -



Figur 2 a+b: TIC-syntetisk sensorverdi vist i 2a og 2b; temperatur, salinitet, pH, CO_2 og lut-dosering i AquaWARE-integrity-plattformen. Karakteristiske dropp i verdier viser automatiske kalibreringer av gassensorer for å sikre korrekte målinger.

nivåer som medfører fall i pH og frigjøring av mer CO₂.

Det som gjør TIC særlig relevant, er at løst CO₂ kun representerer én fraksjon av det totale uorganiske karbonet i systemet. Det resterende karbonet, bundet som bikarbonat og karbonat, utgjør et bufret reservoar som kan frigjøres som fritt CO₂ ved pH-fall. Dette betyr at selv om øyeblikkelige CO₂-avlesninger fremstår som akseptable, er et system med høye TIC-nivåer mer sårbart for raske CO₂-topper etter enhver forstyrrelse, enten biologisk, kjemisk eller operasjonell.

Viktige dynamikker å ta hensyn til:

- **pH-fall → CO₂-økning:** Når pH faller, forskyves karbonat-likevekten mot den løste CO₂-formen. I et system med høy TIC kan dette frigjøre betydelige mengder CO₂ og raskt nå konsentrasjoner som er skadelige for fisk.

- **Strategi for degassing :** Karbon kan kun forlate vannet i sin løste form (CO₂*). Bikarbonat og karbonat må derfor først konverteres før degassing kan skje. Et system med høy TIC vil

derfor kreve en bevisst pH-strategi der nøye sanntidsovervåking av pH og CO₂ er nøkkelen for å gjenopprette akseptable TIC nivåer

- **Stressindusert forsterkning:** Fiskestress, uavhengig av den opprinnelige årsaken, øker metabolske rater og CO₂-produksjon. I et høy-TIC-miljø forverrer dette den kjemiske ubalansen og skaper sammensatte risikoer for biomassen.

TIC-overvåking gir derfor operatørene et verktøy som ikke bare gir et øyeblikksbilde av aktuelle CO₂-nivåer, men et mål på systemets latente CO₂-potensial under ugunstige forhold.

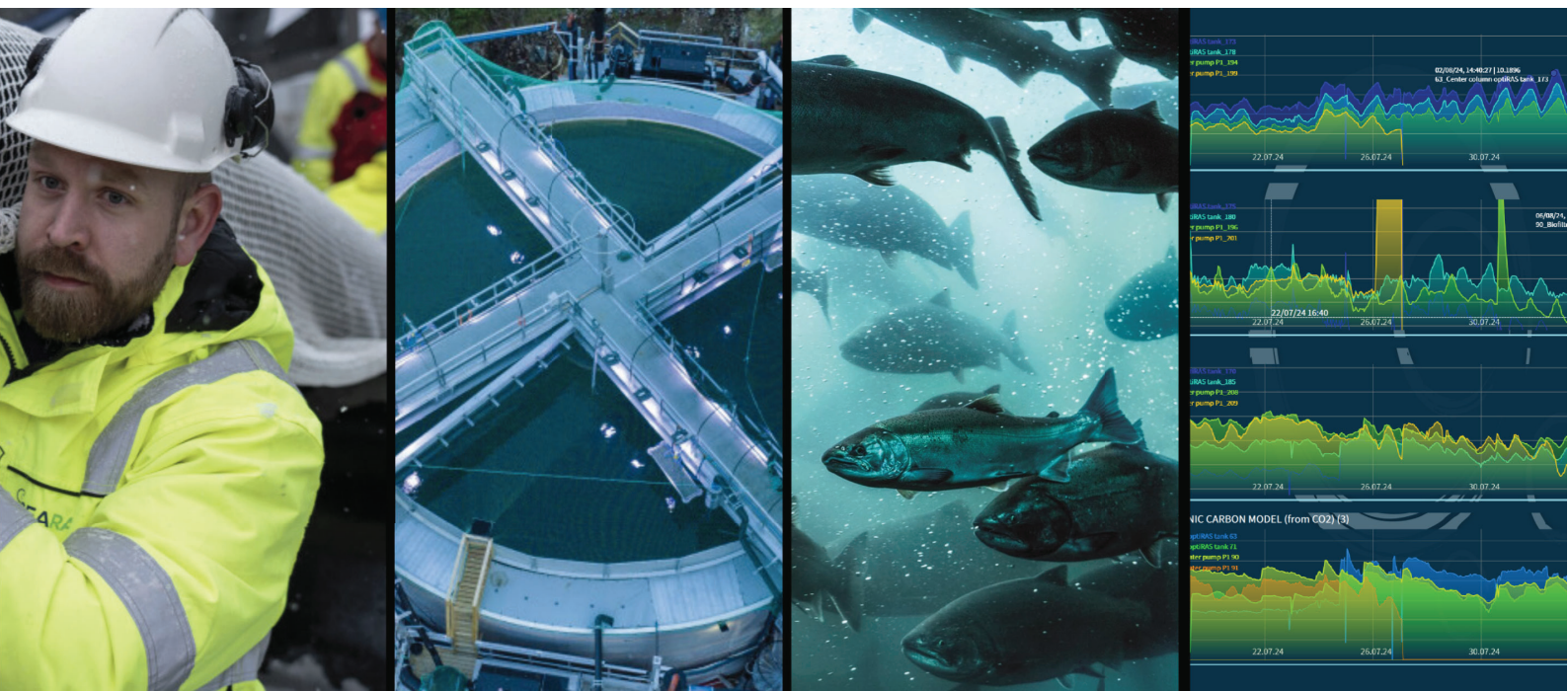
TIC i det totale karbonregnskapet

Karbon i lukkede produksjonsanlegg forekommer både som total organisk karbon (TOC) og total uorganisk karbon (TIC). TOC stammer blant annet fra uspist fôr, avføring og mikrobiell biomasse mens TIC dannes gjennom fiskerespirasjon, mikrobiell mineralisering og kjemisk pH-styring. Til sammen utgjør disse total karbon (TC). TOC reduseres gjennom

mekanisk filtrering og TIC reduseres gjennom degassing. For operatører og driftsledere er det viktig å forstå hvordan karbon beveger seg mellom organisk og uorganisk form, og at god styring derfor krever oversikt over begge fraksjoner.

I landbaserte oppdrettsanlegg slippes prosessvann ut til en naturlig resipient, en elv, fjord eller kommunalt renseanlegg. Miljøtillatelse setter årlige grenser for mengde og sammensetning av stoffer som kan slippes ut, der karbon er en viktig del av dette regnskapet. TIC har historisk sett vært den vanskeligste fraksjonen å spore, noe som skaper hull i det totale karbonregnskapet og utsetter operatørene for risiko for ubevisst å nærme seg eller overskride tillatte grenseverdier.

Nøyaktig TIC-overvåking vil være med og lukke dette gapet. Ved å integrere sanntids TIC-data med TOC-målinger på tvers av alle inn-, resirkulerings- og utslippsstrømmer kan operatørene se en fullstendig karbonmassebalanse. Dette gir et verktøy for å forstå karbonproduksjon og sammenheng med biomassvekst og fôrintak, og dermed optimalisere produksjonen innenfor den tillatte årlige kvoten. TIC



Figur 3: En TIC-sensor er forventet å gi operasjonell verdi som gir økt fiskevelferd, optimalisert bruk av innsatsfaktorer og økt nytte for oppdrettere.

forenkler derfor dokumentasjon for regulatorisk rapportering.

Etter hvert som miljøstandarder skjerpes og produksjonslisenser i sårbare områder blir stadig mer konkurranseutsatte, vil dokumentert karbonhåndtering få økende strategisk betydning

Modellbasert TIC-estimering i AquaWARE

Konsept og driver for utvikling

Som del av dette arbeidet er det utviklet en modellbasert metode implementert i AquaWARE - programvare for beslutningsstøtte basert på sensordata. Hensikten er å dekke et viktig gap i dagens vannkvalitetsstyring: mangelen på et robust, operasjonelt estimat av totalt uorganisk karbon som tar hensyn til hele karbonatsystemet, og ikke bare målt løst CO₂.

Målet er å utvikle en syntetisk TIC-sensor, det vil si en programvarebasert estimator som beregner TIC fra høyoppløselige målinger av pH, temperatur, salinitet og alkalitet. Disse dataene leveres av et sanntids overvåkingssystem. Tilnærmingen bygger på de matematiske sammenhengene i karbonatlikevekten og er utviklet for kontinuerlig bruk i drift, uten behov for egne laboratoriebaserde TIC-analyser i sanntid.

Funksjonelt innhold

TIC sensoren er utviklet for å:

- **Estimere øyeblikkelig TIC** fra tilgjengelige sensordata.
- **Modellere pH-scenarier:** gitt en målt TIC, beregne forventet fri CO₂-konsentrasjon under brukerdefinerte eller systemdetekterte pH-forhold. Dette for å muliggjøre proaktiv risikovurdering av situasjonen før en kritisk hendelse inntreffer.
- **Oppdage tidlige signaler** på ubalanse i karbonatsystemet og flagge forhold der raske CO₂-økninger kan bli sannsynlige.

- **Integrere med operasjonelle dashboard** og levere handlingsrettede resultater fremfor rene kjemiske parametere.

Høyoppløselig, kontinuerlig overvåkingsdata, som fra AquaSENSE, er en forutsetning for pålitelig TIC-beregning, ettersom fordelingen av karbonat i de ulike kjemiske former er svært sensitiv for små endringer i pH og temperatur.

Operasjonell verdi

Fra et operasjonelt perspektiv kan en pålitelig TIC-sensor gi verdi på flere områder:

Risikoreduksjon: Et validert TIC-estimat gjør det mulig for operatørene å kvantifisere det buffrede CO₂-potensialet i vannet til enhver tid. Dette omsettes direkte til tidlige aksjoner; ved å justere degassing, degassingskapasitet eller fôringsplaner før fisken utsettes for skadelige CO₂-konsentrasjoner.

Optimalisering av degassingsanlegg: Kunnskap om TIC gjør det mulig for operatørene å dimensjonere og drifte degassing mer presist. Ved høye TIC-scenarier øker degassingsbehovet ikke-lineært med pH-enderinger. Den syntetiske sensoren gir dataene som trengs for å forutse, snarere enn å reagere på disse hendelsene.

Økt produksjon og optimalisering av biomasse: Kronisk sub-letalt CO₂-stress reduserer fôrutnyttelsen og vekstratene. Ved å opprettholde tettere kontroll av karbonatsystemet kan operatørene holde fisken under forhold som optimaliserer fysiologisk ytelse og reduserer risiko for dødelighet.

Karbon massebalanse og etterlevelse av regelverk: Som beskrevet i seksjon 3 er TIC den sentrale komponent i den totale karbon massebalansen som kreves for rapportering av miljøutslipp. Den syntetiske sensoren gir de kontinuerlige, høyoppløselige TIC-dataene som trengs for å spore uorganiske karbonelement på tvers av alle utslippsstrømmer, integrere dem med TOC-målinger, og produsere

revisjonsklare registreringer for regulatorisk innsending. Dette støtter direkte etterlevelse av årlige karbonkvoter og styrker operatørens posisjon i forhandlinger om lisensfornyng og utvidelse.

Fra reaktiv overvåking til smartere vannbehandling

Utviklingen av en TIC-sensor er del av en viktig overgang fra reaktiv, terskelbasert overvåking til mer prediktiv og modellstøttet vannbehandling. TIC er en nøkkelvariabel i denne overgangen fordi parameteren kobler løpende sensoravlesninger til den underliggende kjemiske tilstanden i systemet.

Når sanntids estimering av TIC kombineres med pH-modellering, får operatøren et bedre grunnlag for å vurdere ikke bare hva som skjer nå, men også hva som kan skje dersom forholdene endres. Dette er særlig viktig i landbaserte systemer, der høye biomassetettheter og lukkede vannvolumer kan gjøre kjemiske skift både raske og alvorlige.

En slik tilnærming er relevant på tvers av arter og anleggstyper, og den peker mot en mer datadrevet forvaltning av vannkvalitet i akvakultur. Spesielt viktig er det å ha kontroll på TIC forut for trengte operasjoner der biomassen ofte er stor og fisken utsatt for stress.

Konklusjon

Total uorganisk karbon er en nøkkelparameter som i dag i liten grad inngår i operasjonell styring av vannkvalitet i landbasert oppdrett. I dag overses dens fulle betydning ofte til fordel for enklere enkeltarts-målinger som løst CO₂ eller pH alene. En forståelse av TIC og dens forhold til bufferkapasitet, degassingspotensial og pH-drevne likevektsforskyvninger gir fiskeoppdrettere, forskere og teknologiutviklere et mer fullstendig og prediktivt bilde av vannkjemien.

Like viktig er TICs rolle innenfor det bredere totalregnskapet for karbon i et produksjonsanlegg. Som den uorganiske fraksjonen av systemets

karbonbeholdning er TIC en integrert komponent i miljøutslippsregnskapet, og nøyaktig kvantifisering er i økende grad nødvendig for etterlevelse av årlige karbonkvoter. Produsenter som kan spore, rapportere og aktivt forvalte sitt totale karbonavtrykk vil ha en strukturell fordel ettersom regulatoriske krav skjerpes og produksjonslisenser i sårbare områder blir vanskeligere å oppnå.

FHF-prosjektets utvikling av en syntetisk TIC sensor representerer et praktisk og kommersielt viktig steg mot å tette kunnskapsgapet når det gjelder risikoen knyttet til akkumulering av karbon i vann. Ved å levere nøyaktige, kontinuerlige TIC-estimer gjennom eksisterende sensorinfrastruktur muliggjør systemet proaktiv vannkvalitetsstyring, forbedret biomassebeskyttelse, økt operasjonell effektivitet og verifiserbar miljøetterlevelse. Dette er av direkte relevans for produsenter, forskningsinstitusjoner, myndigheter og den bredere akvakulturnæringen.

Referanser

- Professor Håkon Dahle, UiB. Har delt kunnskap og innsikt vedrørende mikrobiologi og immunologi. <https://www4.uib.no/finnansatte/H%C3%A5kon.Dahle>
- N. Metzl et al., 2024: «A synthesis of ocean total alkalinity and dissolved inorganic carbon measurements from 1993 to 2022: the SNAPO-CO₂-v1 dataset». Earth Syst. Sci. Data, 16, 89–120, 2024
- L. Jafari et al., 2024: «A descriptive study of carbon dioxide production and removal in full-scale RAS for Atlantic Salmon (*Salmo Salar* L.) post-smolt: A comparison of two different measurement methods for CO₂». Aquacultural Engineering 107 (2024) 102442
- Katrin Adamczyk et al., 2009: «Real-Time Observation of Carbonic Acid Formation in Aqueous Solution». Science 18. desember 2009, VOL 326
- G. Munhoven 2013: «Mathematics of the total alkalinity – pH equation – pathway to robust and universal solution algorithms: the SolveSAPHE package v1.0.1». Geosci. Model Dev., 6, 1367–1388, 2013
- Andre Meriac et al., 2026: «Stress respiration and changes in CO₂ concentrations affect the risk for H₂S toxicity – Insights from model calculations». Aquacultural Engineering, 114 (2026) 102732

