Dansk Kemi

Nummer 1 - Februar 2026 / 107. årgang

Kemisk Forening - Kemiingeniørgruppen

Indsigt i hydrogenbindinger med infrarød spektroskopi

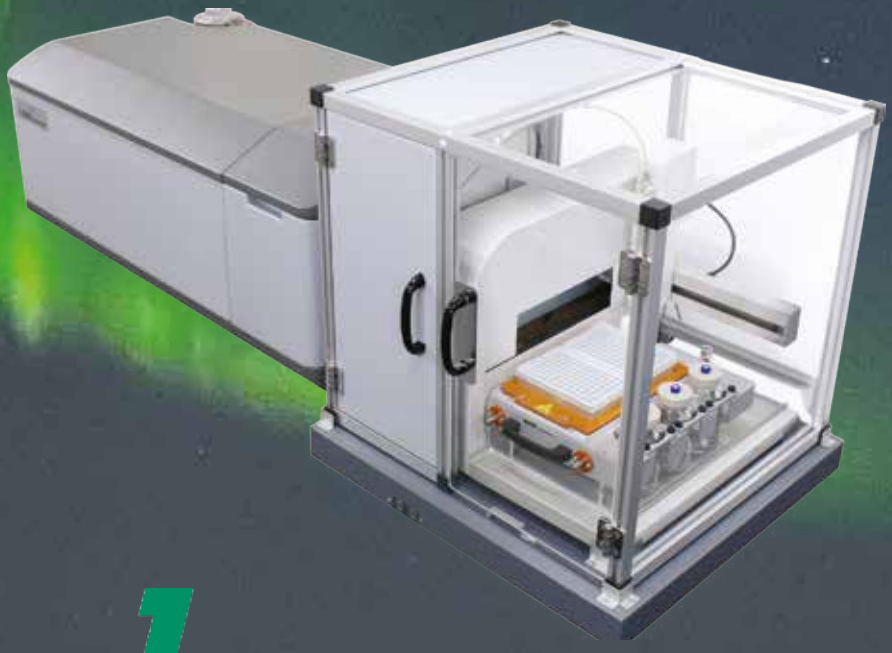
Spildevands-analyser

Strontium og tandemaljen

Intelligent Chemistry
Biolab A/S Automation Specialist

JASCO Circular Dichroism
HTCD Plus
High-Throughput Circular Dichroism

For scientists in pharmaceutical, process- and biotechnology, and food chemistry labs who need reproducible, automated measurements and reliable structural analysis software, the high-throughput circular dichroism (HTCD) system eliminates human error and bias in measurement acquisition and biomolecular characterization.



JASCO

The only limitation is your imagination

Biolab A/S
Sindalsvej 29
DK-8240 Risskov
+45 8621 2866
sales@biolab.dk
www.biolab.dk

INDHOLD

1 **Forside**
Strontium synes at have positive funktioner i kroppen. Hvilke funktioner det er, og de kemiske mekanismer bag, bliver dog stadig diskuteret, især i relation til tandsundhed. Læs mere i artiklen på side 9. Foto: Freepik.com.

6 **Hvad sker der på spildevandsanlægget, når "det pisser ned"?**
Tre komplementære analyseteknikker koblet til højopløst massespektrometri (HRMS) giver høj følsomhed i analyser af spildevand.

12 **Konsekvenserne af kunstig iltning af søer**
Hvad sker der med mængden af fosfor, når iltningen af en sø afbrydes, og er der overensstemmelse med resultater fra laboratorieforsøg?

15 **Svampe giver køerne kamp til stregen, når det kommer til produktion af mælkeprotein**
Præcisionsfermentering byder på nye måder at fremstille fødevareproteiner kendt fra animalsk produktion.

18 **To naturfagslærere fra slutningen af 1800-tallet**
Beretning om, hvilke lærere der underviste, da naturfag blev indført i latinskolen.

20 **Supporting chemical thermodynamics: The role of infrared spectroscopy**
Studier af molekylære vibrationer i væskers hydrogenbindinger.

22 **CleanCloud målekampagne i Nordøstgrønland**
EU-finansieret forskningsprojekt har til formål at undersøge, hvordan partikler og skyer interagerer.

24 **Ti, Mo, Cs, Pr, Nd – hvad har disse fem til fælles?**
En rådslagning i Kemisk Forenings Nomenklaturudvalg (KFNU) er mundet ud i beslutninger om de fem grundstoffer, som atomsymbolerne i overskriften refererer til.

27 **ISO 13391 og ISO 25078 – beregning af skovens klimaeffekter**
Kendsgerningerne af ny ISO-standard for beregning af skovens klimaeffekter.

TechMedia

Naverland 35 - 2600 Glostrup
Telefon 43 24 26 28
info@techmedia.dk
www.techmedia.dk

Ledelse:
David Wall

Redaktion:
Professor Hanne Christine Bertram (ansvarshavende)
hcb@techmedia.dk
Katja Salomon Johansen
katja@techmedia.dk
Professor Søren Kiil
sk@kt.dtu.dk
Ph.d. Kristian B. Krogh
kbk@novozymes.com
Professor Henrik Skov
hsk@envs.au.dk

Redaktionskomité:
Professor, dr. scient. Mikael Bols
Professor Morten J. Bjerrum (Kemisk Forening)
Lektor, ph.d. Peter Szabo (Kemiingeniørgruppen)
Lektor, civilingeniør, ph.d. Merete Norsker Bergsøe
Vibeke Richter Foërsom (Næstformand, Kemilærerforeningen)
Chefkonsulent Helle Westphal
Senior Environmental Specialist, FMC Site Rønland
Inge Margrethe Jensen
Fagkonsulent Mette Malmqvist

ISSN 0011-6335 (tryk)
ISSN 1902-360x (online)

Bladsekretær:
Heidi Thode
Tlf. 43 24 26 62, ht@techmedia.dk

Annoncer:
Tanja Wulff Dühring
Tlf. 43 24 26 06, twd@techmedia.dk

Annonceproduktion:
Helle Hansen
Tlf. 43 24 26 71, hh@techmedia.dk

Layout: Trine Plass
Tryk: PE Offset A/S

Antal abonnenter: 3.600

Abonnement:
Bestilling og ændring/opsigelse sendes til abonnement@techmedia.dk

Trykt på miljøvenligt papir med vegetabilske miljøfarver.

Miljømærket tryksag 5041 0826

Citater fra artikler i Dansk Kemi skal ske med tydelig kildeangivelse. Enhver form for gengivelse af artikler, herunder illustrationer, forudsætter udgiverens skriftlige tilladelse. Redaktionen kan ikke påtage sig ansvaret for materiale, der indsendes uopfordret.

Læs bladet online:
www.danskkemi.dk

Se også: www.kemifokus.dk

Eller find Dansk Kemi på:

Scan og hent Dansk Kemis medieinformation 2026 her!
Scan med kameraet på din smartphone.

Forskning versus administration

Når et universitet fyrer dygtige fastansatte naturvidenskabelige professorer og lektorer, der har arbejdet hårdt gennem 10-20 år for at dygtiggøre sig og kvalificere sig til deres stilling, har vi et problem. Det bliver kun større, når det tilsyneladende sker på baggrund af omstændigheder såsom centralisering af administrationen og byggeudgifter, der løber løbsk. I den forbindelse må man spørge sig selv: Hvad er universiteternes mission?

God administration kan være katalysatoren, der sænker aktiveringsenergien: får ansættelser på plads, indkøb til laboratoriet til at glide, kontrakter og sikkerhed til at være i orden, og den hjælper os med at leve op til krav om arbejdsmiljø og databeskyttelse. Problemet opstår, når administrationen skifter karakter fra støttefunktion til styringsmaskine – når den producerer interne krav, som primært skaber mere internt arbejde.

> Problemerne opstår, når administrationen skifter karakter fra støttefunktion til styringsmaskine. Et universitet er ikke et forvaltningskontor med et sideprojekt i forskning

Den mest oversete effekt kan man kalde skyggeadministration: Den administration, der lander på forskerens bord, fordi processer bliver mere komplekse, eller systemer ikke taler sammen. Vi kan godt få flere administrative årsværk og samtidig bruge flere forskertimer på rejseafregninger, ph.d.-administration og rapportering. Administrationen har brug for risikostyring, men risikostyring må ikke blive risikofrygt, ellers ender det med øget tidsforbrug for forskerne med flere tjekpunkter, længere ventetider og uklart ansvar for processen. Når alt skal godkendes centralt, bliver den lokale faglighed sat ud af spil, og det er i sidste ende også en risiko.

Derfor bør debatten handle om en enkel test: Frigør administrationen forskertid – eller flytter den blot arbejdet rundt? Hvis vi bruger flere midler på at administrere, bør vi kunne se det i konkrete forbedringer: lettere indkøb af kemikalier og udstyr, hurtigere kontrakt- og projektoprettelse, færre gentagne indtastninger og en målbar reduktion i forskernes administrative tidsforbrug.

Det kræver ledelse at gøre administrationen nyttig. Hvad kan fjernes? Her er det også vigtigt, at man ser det fra forskernes side og ikke fra administrationens side. Det, administrationen synes, er praktisk, duer ikke, dersom det sluger tid fra forskerne. Indfør servicemål på de processer, der er kritiske for forskning og undervisning. Og indfør princippet om at data indtastes én gang og genbruges – så systemet arbejder for os forskere – og ikke omvendt.

Et universitet er ikke et forvaltningskontor med et sideprojekt i forskning. Det er en vidensinstitution, hvor administrationen skal være det smøremiddel, der gør forskning, uddannelse og innovation muligt. Når vi er færre til at forske, bør vi som fagfællesskab insistere på dokumentation for, at udbyttet af administrationsændringer faktisk sparer forskningstid.

Morten J. Bjerrum

Metrohm

Automatisér fremtiden i dag!

OMNIS giver dig fuld frihed i sin modularitet og fleksibilitet.
Kombinér titrering, KF titrering, ionkromatografi og NIR spektroskopi og automatisér dine analyser.

Har du behov for et fuldt automatiseret lab? Metrohm udvikler tilpassede robotløsninger, der forener avanceret teknologi, faglig ekspertise og digital integration i én samlet løsning.
Resultatet? Et mere strømlinet, præcist og effektivt laboratorie.

Du kan læse mere om automatisering til OMNIS og Metrohm Lab Robotics på www.metrohm.com

Hvad sker der på spildevandsanlægget, når "det pisser ned"?

Hvordan moderne kemiske analysemetoder hjælper os til at forstå dynamikken af mikroforureninger i spildevandet.

Af Kristoffer Kilpinen[1], Selina Tisler[2], Peter Mortensen[1] og Jan H. Christensen[2]

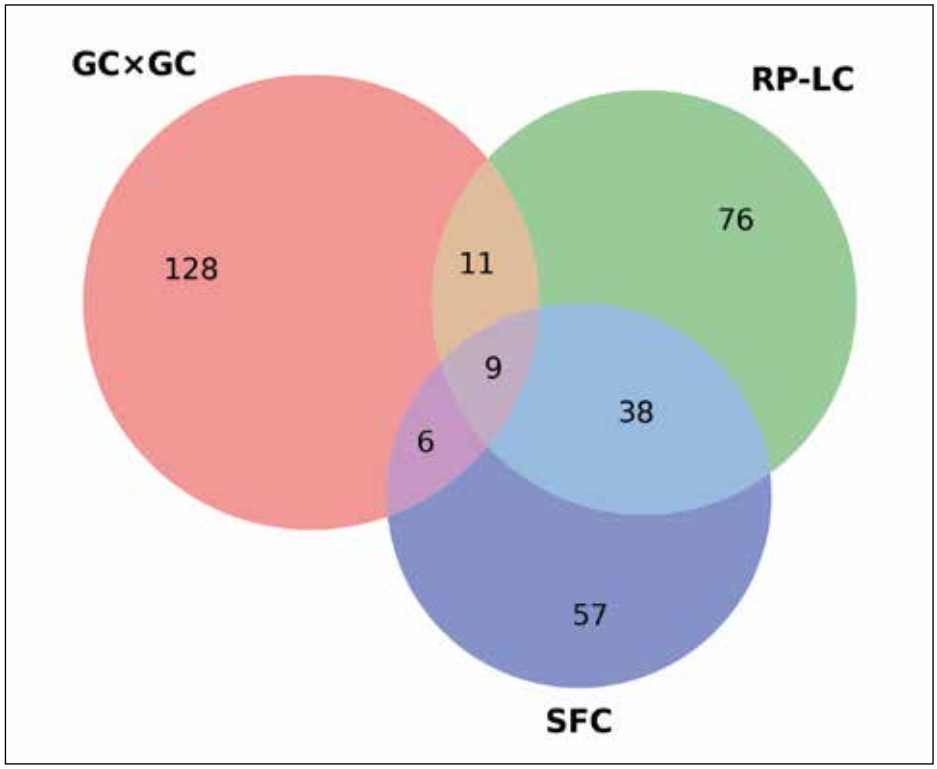
[1] Eurofins Miljø A/S
[2] Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet

I over fire årtier er mængden af miljøfremmede stoffer i naturen steget markant. Disse stoffer, som ofte er menneskeskabte, udgør en potentiel risiko for både miljø og sundhed. Renseanlæg har traditionelt haft fokus på fjernelse af næringsstoffer for at modvirke iltsvind samt på reduktion af sygdomsfremkaldende mikroorganismer. Senere kom der fokus på tungmetaller, og i de seneste år har fokus udvidet sig til en række organiske stoffer, herunder per- og polyfluoralkylstoffer (PFAS). Mange udbredte stoffer fra hverdagen, eksempelvis fra sæber, kosmetik og lægemidler er dog stadig dårligt reguleret, selvom renseanlæg ofte fungerer som punktkilder for netop disse forbindelser.

Med revisionen af EU's Byspildevandsdirektiv i 2024 er der indført krav om, at renseanlæg skal fjerne mindst 80 procent af 12 udvalgte kemikalier, herunder flere lægemidler (se faktaboks 1). Dette er et vigtigt skridt, men dækker kun en lille del af det samlede kemiske fingeraftryk i spildevand. Ved moderne analysemetoder kan der identificeres tusinder af mikroforureninger i både indløb og udløb – mange af dem ukendte eller sjældent målte, og flere med potentiel miljøfarlighed på niveau med eller over de udvalgte 12 stoffer.

Hidtidig har forskningen primært fokuseret på gennemsnitskoncentrationer i spildevandet. Men i lyset af de betydelige investeringer, der kræves for at opgradere renseanlæg til kommende EU-krav, er der behov for en bedre forståelse af dynamikken i spildevandsanlæggene. En mere nuanceret forståelse er afgørende for at kunne dimensionere og målrette fremtidige tiltag effektivt.

I projektet *VANDALF,* der er støttet af Innovationsfonden, er der gennemført den mest omfattende målekampagne for mikroforurening i spildevandsanlæg i Danmark. Over 200 prøver blev udtaget fra både indløb og udløb, primært ved Damhusåen renseanlæg, som dækker en stor del af hovedstadsområdet, men også fra syv øvrige anlæg i Københavnsområdet, Odense og Nordfyn.

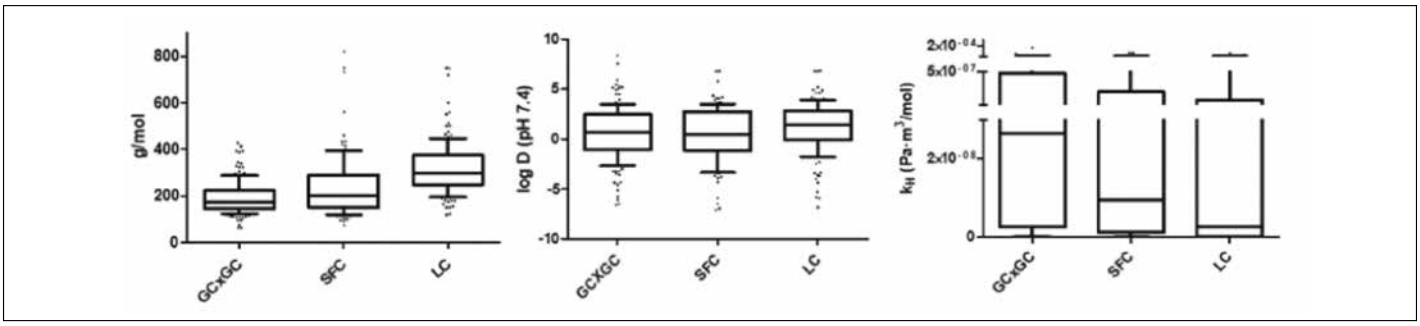


Figur 1. Venn-diagram, der viser fordelingen af identificerede stoffer i de samme spildevandsprøver analyseret på tre forskellige platforme (modificeret figur fra [1]).

Faktaboks 1

De 12 indikatorstoffer

Amisulprid (antipsykotisk lægemiddel)
Carbamazepin (epilepsimedicin)
Citalopram (antidepressiv)
Clarithromycin (antibiotikum)
Diclofenac (smertestillende NSAID)
Hydrochlorothiazid (vanddrivende medicin)
Metoprolol (beta-blokker, hjertemedicin)
Venlafaxin (antidepressiv)
Benzotriazol (korrosionshæmmer)
Candesartan (blodtryksmedicin)
Irbesartan (blodtryksmedicin)
4- og 6-methylbenzotriazol (korrosionshæmmere)



Figur 2. Overblik over fordelingen af stofferne identificerede på de tre platforme, fordelt på molvægt (A), polaritet givet som Log D (pH 7.4) (B), og flygtighed givet som Henrys lov konstant (C) (modificeret figur fra [1]).

Hvorfor anvende kromatografiske teknikker?

Miljøfremmede stoffer spænder fra meget vandopløselige (hydrofile) lægemidler til stærkt hydrofobe forbindelser. Da intet enkelt analysekemisk setup kan dække hele dette kemiske spektrum, blev der anvendt en kombination af tre komplementære teknikker, alle koblet til højopløst massespektrometri (HRMS), som i stigende grad anvendes i miljøanalyser på grund af sin høje følsomhed og selektivitet:

1. **LC-HRMS (reversed-phase):** Velegnet til polære forbindelser som lægemidler, pesticider og organiske syrer.
2. **GC×GC-HRMS (med derivatisering):** Effektiv til flygtige og semipolære forbindelser, herunder visse industrikemikalier og pesticider. Todimensionel gaskromatografi (GC×GC) muliggør markant bedre separation af komplekse blandinger end konventionel éndimensionel GC.
3. **SFC-HRMS:** En nyere teknik i miljøsammenhæng, hvor superkritisk CO_2 anvendes som mobilfase. Metoden udfylder analysekløften mellem LC og GC og dækker et bredt spektrum af polære til moderat hydrofobe forbindelser.

Ved at kombinere disse platforme blev der identificeret flere hundrede stoffer – herunder mange hidtil ukendte miljøfremmede forbindelser. De tre teknikker viste sig at være komplementære:

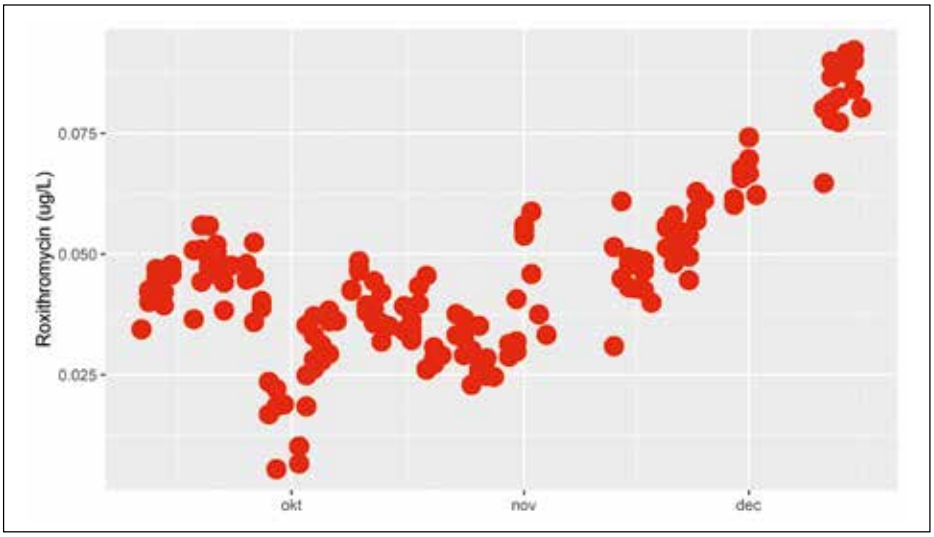
GC×GC-HRMS identificerede flest unikke forbindelser (128 unikke) og var særlig effektivt til at detektere flygtige og semivolatile stoffer. LC-HRMS havde den højeste andel af identificerede farmaceutiske stoffer, mens SFC-HRMS var bedst til at dække et bredt spektrum af molekylmasser og polariteter (figur 2) [1].

Hvad kan vi lære af resultaterne?

Undersøgelserne viser, at selvom renseanlæggene generelt fjerner en stor del af de miljøfremmede stoffer i indløbsvandet, findes der stadig en kompleks blanding af stoffer inklusive nedbrydningsprodukter i udløbsvandet med tilsvarende eller højere koncentrationer end i indløbet [2].

Forskelle i renseeffektivitet over tid

Det store antal prøver gjorde det muligt at analysere tidslige variationer i koncentrationer for en lang række stoffer.



Figur 3. Udvikling af koncentrationen af roxithromycin over tid.

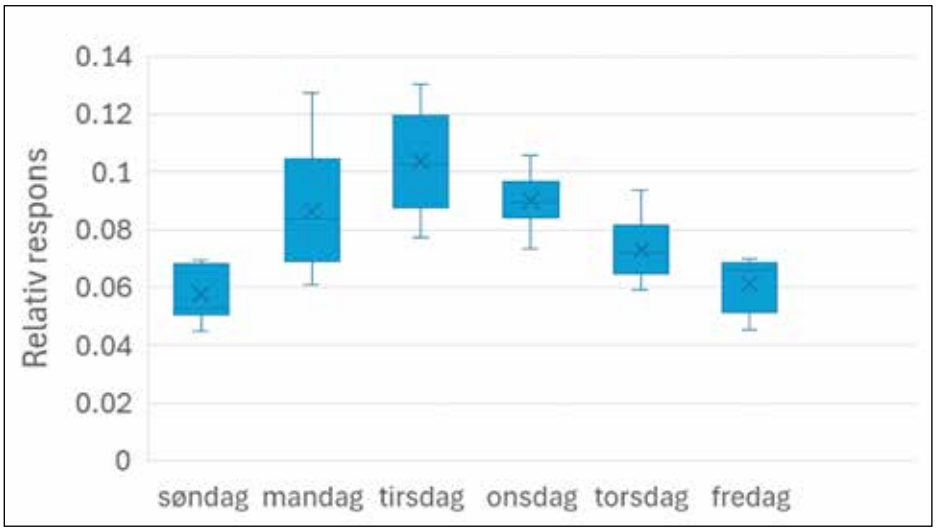
Et eksempel ses i figur 3, hvor koncentrationen af antibiotikaet roxithromycin stiger markant fra september til december. Denne stigning sammenfalder med lavere temperaturer, forventet højere infektionstryk og dermed øget medicinforbrug i befolkningen – og illustrerer, hvordan både sæson og forbrugsadfærd påvirker spildevandets kemiske sammensætning [3].

Tilsvarende blev der identificeret klare ugentlige trends, som vist i figur 4 (side 8), for MDMA (3,4-methylendioxy-N-methylamfetamin, også kendt som ecstasy). Her ses de højeste koncentrationer i spildevandet mandag til onsdag, hvilket afspejler øget weekendforbrug. Tidsforskydningen skyldes anlæggets hydrauliske opholdstid, hvor stoffet først registreres i udløbet 3-4 dage efter udledning [3].

Mange miljøfremmede stoffer fjernes normalt med mere end 99 procent effektivitet på spildevandsanlæg, eksempelvis koffein og paracetamol. Undersøgelserne viste dog, at kraftige regnhændelser kan forårsage kortvarige koncentrationsspikes i udløbsvandet med høje koncentrationer. I løbet af en halvanden måned lang måleperiode blev der registreret 12 hændelser med markante stigninger i koncentrationen af ellers let nedbrydelige stoffer i udløbet. Det tyder på, at en væsentlig andel af den samlede udledning af visse stoffer kan være knyttet regnvejrshændelser (se figur 5, side 8) [3].

Kilder til miljøfremmede stoffer

Den omfattende datamængde i projektet har muliggjort sporing af kilder til miljøfremmede stoffer via korrelationsanalyser. Regnhændelser udgør en særlig kompleks påvirkning af spildevandet: De fortynder eksisterende kemikalier fra husholdninger og industri, men tilfører samtidig nye miljøfremmede stoffer til spildevandet. Blandt disse er stoffer fra dækslid (for eksempel 1,3-diphenylguanidine og hexamethoxymethylmelamine), PFAS og andre stoffer fra udvaskning af deponier og biocider fra maling



Figur 4. Ugentlig variation af MDMA (ecstasy)-koncentrationen over ugedagene.

og træbeskyttelse, som afvaskes fra bygninger. Ét af de identificerede biocider, tebutryn, er særligt problematisk på grund af sin høje økotoksicitet over for alger og blev påvist i potentielt skadelige koncentrationer ved alle otte undersøgte renseanlæg [4]. Stoffet fjernes desuden næsten ikke under renseprocessen, hvilket understreger dets persistens og miljømæssige betydning.

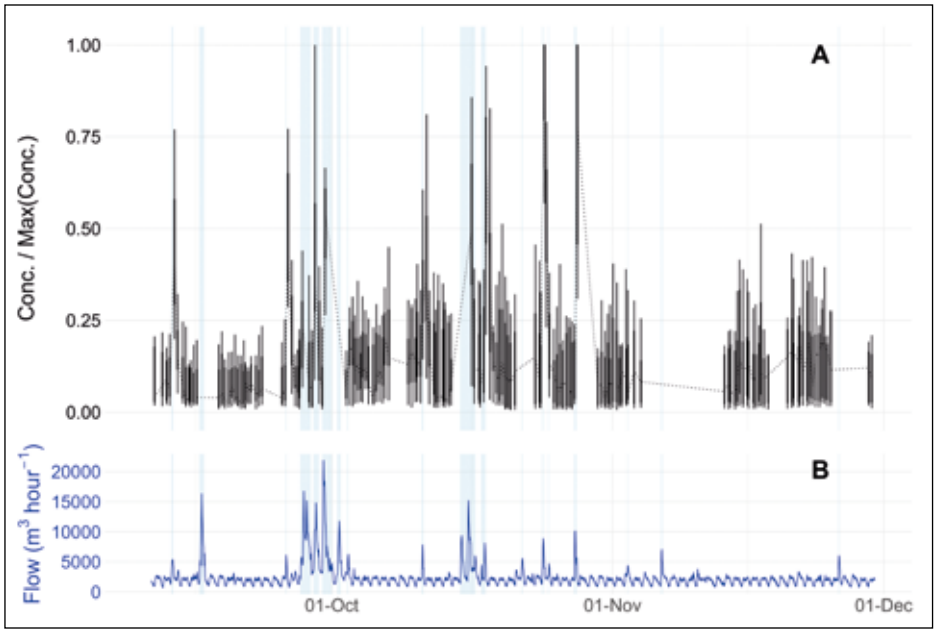
Geografiske forskelle i spildevandssammensætning

Analyserne viste tydelige geografiske forskelle i spildevandets kemiske profil. Eksempelvis blev der fundet højere koncentrationer af kosmetikrelaterede stoffer og narkotika i København sammenlignet med Fyn, hvorimod anlæggene på Fyn havde et højere niveau af lægemidler relateret til en ældre befolkningsprofil, som for eksempel blodfortyndende medicin. På visse anlæg kunne de største koncentrationer af miljøfremmede stoffer direkte knyttes til specifikke industriudledninger [2,4,5]. Denne viden om sammenhængen mellem opland og spildevandssammensætning er afgørende for at kunne målrette og optimere fremtidige renseteknologier.

Konklusion

Regnhændelser, dvs. når "det pisser ned", tilfører en kompliceret påvirkning af spildevandet. Vandalf-projektet har vist, at en dyb forståelse af dynamikken i spildevandsanlæg er central for at vurdere, hvilke stoffer der reelt udledes til miljøet. Kendskab til sammensætningen og variationen i indløbsvandet – herunder påvirkninger fra regn, sæsoner og forbrugsmønstre – er nødvendigt for at kunne dimensionere og designe effektive renseforanstaltninger. Det bliver særlig vigtigt i lyset af kommende krav i EU's Byspildevandsdirektiv, hvor rensning for organiske mikroforureninger skal styrkes markant.

Vandalf-projektet har også demonstreret styrken ved moderne HRMS-metoder. Disse metoder giver adgang til en detaljeringsgrad og et stofomfang, som ikke er muligt med traditionelle målrettede analyser. HRMS-baseret screening har vist sig som et uundværligt værktøj i kortlægningen af både kendte og ukendte miljøfremmede stoffer og udgør en vigtig del af fremtidens overvågnings- og beslutningsgrundlag.



Figur 5. (A): Koncentrationer af koffein, paracetamol, 2-hydroxyibuprofen, theobromin, benzoylecgonin, sakkarin og kokain i udløbsspildevand. Koncentrationerne er vist relativt, dvs. i forhold til den højeste målte værdi. Boxplottene viser spredningen af målingerne, hvor kasserne angiver området fra 1. til 3. kvartil. (B): Grafen viser kontinuerlige målinger af indløbsflow. I begge figurer markerer de lyseblå områder perioder, hvor vandflowet overstiger det dobbelte af medianflowet (modificeret figur fra [3]).

E-mail:
Kristoffer Kilpinen:
kristoffer.kilpinen@etn.eurofins.com

Referencer

1. Tisler, S., Kilpinen, K., Devers, J., Castro, M., Jørgensen, M.B., Mandava, G., Lundqvist, J., Cedergreen, N., & Christensen, J.H. (2025). Mapping Emerging Contaminants in Wastewater Effluents through Multichromatographic Platform Analysis and Source Correlations. *Environmental Science & Technology*, *59*(11), 5766-5774. https://doi.org/10.1021/acs.est.5c01139.
2. Tisler, S., Engler, N., Jørgensen, M.B., Kilpinen, K., Tomasi, G., & Christensen, J.H. (2022). From data to reliable conclusions: Identification and comparison of persistent micropollutants and transformation products in 37 wastewater samples by non-target screening prioritization. *Water Research*, *219*, 118599. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118599.
3. Kilpinen, K., Tisler, S., Jørgensen, M.B., Mortensen, P., & Christensen, J.H. (2024). Temporal trends and sources of organic micropollutants in wastewater. *Science of The Total Environment*, *957*, 177555. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177555.
4. Kilpinen, K., Devers, J., Castro, M., Tisler, S., Jørgensen, M.B., Mortensen, P., & Christensen, J.H. (2023). Catchment area, fate, and environmental risks investigation of micropollutants in Danish wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30331-z.
5. Tisler, S., Savvidou, P., Jørgensen, M.B., Castro, M., & Christensen, J.H. (2023). Supercritical Fluid Chromatography Coupled to High-Resolution Mass Spectrometry Reveals Persistent Mobile Organic Compounds with Unknown Toxicity in Wastewater Effluents. *Environmental Science & Technology*, *57*(25), 9287-9297. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00120.

Strontium understøtter tandemaljens robusthed – men hvordan?

Fluorid styrker tænders emalje ved at erstatte hydroxid i hydroxyapatit og sænke opløseligheden. Strontium styrker også tænders emalje, selv om strontium-analogen til $Ca_5(OH)(PO_4)_3$ er mere opløselig.

Foto: Freepik.com.

Figur 1. Tandpasta med strontiumklorid.

Af Leif H. Skibsted,
Institut for Fødevarevidenskab,
Københavns Universitet

Styrken af knogler og tænder afhænger af en tilstrækkelig forsyning med calcium fra kosten gennem hele livet. En voksen krop indeholder op mod 1,2 kg calcium, og calcium er dermed det mængdemæssigt vigtigste metal i kroppen [1]. Strontium, der i modsætning til calcium normalt ikke anses for at være essentielt, findes i den udvoksede krop derimod kun med omkring 300 mg. Dette grundstof synes dog alligevel at have positive funktioner i kroppen. Hvilke funktioner, det er, og de kemiske mekanismer bag disse funktioner, bliver dog stadig diskuteret, især i relation til tandsundhed [2].

Strontium i tandpleje

Strontium-salte som $SrCl_2$, $6H_2O$ tilsættes i nogle lande, som for eksempel Kina, i tandpasta for styrke tænders emalje. Et eksempel på et internationalt produkt er vist i figur 1, som en tandpasta, der også angives at mindske tænders følsomhed. I Kina anprises naturligt mineralvand med højt indhold af strontium og lavt indhold af natrium, som det ses af eksemplet i figur 2, side 10. I andre lande er strontiumsalte som strontiumcitrat i dag tilgængelige som kosttilskud i håndkøb [3].

Tænders emalje får deres robusthed mod angreb af syre fra kosten eller fra bakterievækst i mundhulen fra det meget tungtopløselige hydroxyapatit med formlen $Ca_5(OH)(PO_4)_3$, som også er vigtigt i opbygning af kroppens knogler. Dette sammensatte calciumfosfat angribes og opløses dog af syre, som det langsomt kan ske i munden. Erstatning af hydroxid i hydroxyapatit med fluorid giver en væsentlig mere tungtopløselig forbindelse, som det ses af opløselighedsdata i tabel 1. Hydroxyapatits omdannelse ved kontakt med fluorid til fluorapatit er således be-

Sammensat fosfat	$\log K_{sp}$	ΔH_{opl}	ΔS_{opl}
$Sr_5(OH)(PO_4)_3$	-50	-4,0 kJ/mol	-78 J/mol K
$Ca_5(OH)(PO_4)_3$	-58	+2,6 kJ/mol	-73 J/mol K
$Ca_5F(PO_4)_3$	-61		

Tabel 1. Termodynamik af opløsning af sammensatte fosfater i vand ved 25°C. K_{sp} er opløselighedsprodukt. ΔH_{opl} og ΔS_{opl} er entalpi og entropi for opløsningsprocessen i neutral vandig opløsning [4].

grundelsen for tilsætning af fluorid til tandpasta og til tidligere tiders praksis, også i Danmark, med mundskylning med vandige natriumfluorid-opløsninger. Forklaringen på den beskyttende virkning af fluorid er således termodynamisk.

Anvendelse af strontium i tandpleje savner umiddelbart en forklaring, da substitution af calcium med strontium danner $Sr_5(OH)(PO_4)_3$ med væsentlig højere opløselighed end hydroxyapatit [4].

Termodynamik eller kinetik

Citrat er vigtig for transport af calcium og mineralisering af biologiske systemer, selv om calciumcitrat er tungtopløseligt, men dog spontant danner overmættede opløsninger i vand selv uden opvarmning [5,6].

Strontium er nu fundet at påvirke citrats calciumtransport i heterogene systemer ved at mindske calciumcitrats opløselighed under fysiologiske betingelser [7]. Calciumcitrats opløselighed i vand falder med stigende temperatur omkring fysiologisk temperatur, mens strontiumcitrats opløselighed stiger med stigende temperatur omkring fysiologisk temperatur, og de to salte har samme opløselighed omkring 75°C [7].

Strontiumioner i opløsning er fundet at stabilisere calciumcitrat som tetrahydrat i fast tilstand også omkring fysiologisk temperatur og mindsker derfor hastigheden for opløsning af calciumcitrat [3]. En tilsvarende effekt synes nu påvist for hydroxyapatit. Omkring fysiologisk temperatur mindsker strontiumioner opløsningshastigheden af hydroxyapatit [4]. Denne overraskende effekt kræver en nærmere analyse for at afklare, om det er en termodynamisk effekt som for fluorid, eller det er en kinetisk effekt.

Forsøg med tænder fra okser i moderat surt vand svarende til mundens betingelser viser, at $SrCl_2$ tilsat vand sænker hastigheden for opløsning af calcium fra tændernes emalje. Figur 3 viser også, at strontiumioner mindsker ætsning af tænders overflade. Den beskyttende effekt af strontium på opløsning af hydroxyapatit i tandemaljen skyldes muligvis, at strontiumioner ved diffusion påvirker krystaldannelsen af hydroxyapatit i tandoverfladen, der resulterer i større krystaller med lavere opløsningshastighed under remineralisering [4].

Strontium erstatter tilsyneladende calcium ved ionbytning i tandoverfladen. Denne ionbytning mindsker hastigheden for opløsning af tandoverfladens sammensatte fosfater. Strontiums beskyttende effekt er således en kinetisk effekt

Figur 2. L'Origin er en "excellent strontium-rich and sodium-free natural drinking mineral water", som anbefales i 1992 og sidenhen af det kinesiske ministerium for geologi og mineraler.

og relateret til diffusion af ioner nær tandoverfladen.

Tænder og knogler

$Ca_5(OH)(PO_4)_3$ forbruger varme ved opløsning i vand, og sådan opløsning er dermed en endoterm proces. Opløsning af $Sr_5(OH)(PO_4)_3$ er derimod en exoterm proces ved fysiologisk pH og temperatur, og opløseligheden falder med stigende temperatur [5,6].

Disse subtile forskelle i termodynamik for opløsning i vand af disse sammensatte calcium- og strontiumsalte af fysiologisk betydning kan med fordel inddrages i en nærmere analyse af den kinetiske effekt, som gør, at strontiumioner mindsker opløselighedshastigheden af hydroxyapatit i tandemaljen, som det ses i figur 3. Værdierne for ΔH_{opl} og ΔS_{opl} i tabel 1 er bestemt for ligevægtsblandinger i neutral vandig opløsning, og er derfor mere relevante end de tilsvarende værdier for enkeltkomponenter i standardtilstanden, der normalt anføres i tabeller.

Den negative værdi for opløsningsentropien for både hydroxyapatit og strontium-substitueret hydroxyapatit bekræfter dannelse af mange ioner under opløsningsprocessen for begge forbindelser og den øgede struktur af vand som resultat af opløsningsprocesserne. Den højere opløselighed for strontium-substitueret hydroxyapatit er således en entalpi-effekt.

Onsagers reciprocitetsteorem

Strontiums effekt på tænders robusthed mod svag syre, som fremgår af resultaterne vist i figur 3, er derfor en kinetisk effekt.

Et ubesvaret spørgsmål er dog stadig, om tilsvarende gælder for andre knogler end tænder. Det synes stadig uafklaret, om andre faktorer end lavt niveau af D-vitamin er årsagen til, at befolkningen i geografiske områder som i Nordeuropa med højt calciumindtag gennem mælk har den største risiko for svage knogler og osteoporosis [8]. Et dagligt indtag gennem kosten af omkring 1 g calcium skulle ellers være tilstrækkeligt til at opretholde kroppens calciumstatus.

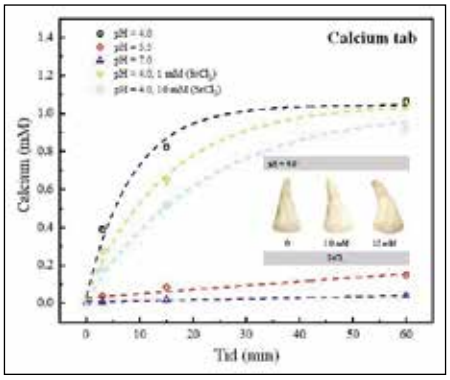
Citrat er vigtig for calciumtransport og biomineralisering trods calciumcitrats lave opløselighed. Calciumsalte af citrat og andre hydroxycarboxylsyrer er vist spontant at danne overmættede opløsninger ved fastholdt temperatur. Dette overraskende fænomen er forsøgt forklaret ud fra ikke-ligevægtstermodynamik og Onsagers reprocitetsteorem [6]. Vekselvirkning med strontium kunne med fordel inddrages i disse overvejelser i fremtidig forskning, da calciumioner indgår sammen med fosfationer i opløsning og udfældning af hydroxyapatit i biologiske mineraloverflader i diffusionskontrollerede processer.

Onsagers reciprocitetsteorem fra 1931 beskriver irreversible processers kinetik. Teoremet kaldes også for "Onsagers reciprocal relations" og forklarer manglende ligevægtsindstilling gennem tab af frihedsgrader ved kobling af diffusionsprocesser. Lars Onsager blev i 1968 tildelt Nobelprisen i kemi for dette teoretiske arbejde, oprindeligt for opløsningers elektriske ledningsevne. Teorien er vist blevet mere generelt at forklare ikke-ligevægtsfænomener ved massetransport [9]. Spontane overmætningsfænomener under biologiske mineraliseringsprocesser er senest blevet forklaret ud fra lokal vækst i entropi ved hjælp af Onsagers reciprocitetsteorem [6].

Kompleksbinding af calcium til fosfat og af strontium til fosfat og udfældning af $Ca_5(OH)(PO_4)_3$ og $Sr_5(OH)(PO_4)_3$ er koblede processer og kan beskrives med differentialligninger for diffusion. For simple opløsninger af calciumcitrat og med overskud af citrat er det vist, at Onsagers reciprocitetsteorem medfører, at diffusionsprocesserne er koblede, så calciumcitrat opløses spontant til overmætning fra lavere mod højere koncentrationer af calcium [6].

Diffusionsligningerne for calciumhydroxyapatit i nærvær af strontium bliver langt mere komplicerede end for calciumcitrat og citrat. Imidlertid synes koblingen mellem metaludveksling mellem calciumfosfat og strontiumfosfat og udfældningsprocesser at kunne give anledning til kinetiske effekter som den er set i figur 3, således at strontiumioner i opløsning mindsker hastigheden af opløsning af fast hydroxyapatit.

Onsagers reprocitetsteorem medfører tab af frihedsgrader for koblede fysiske og kemiske processer og kan forklare paradoksale observationer som spontan overmætning af calciumsalte af biologisk betydning og måske også den uventede hæmmende effekt af strontiumioner på opløsningen af hydroxyapatit.



Figur 3. Opløsning af calcium for oksetænder i vand ved varierende pH og for pH=4,0 i nærvær af $SrCl_2$. Baseret på reference [4].

E-mail:
Leif Skibsted: ls@food.ku.dk

Litteratur
1. Theobald, H.E. (2005). Dietary calcium and health. Nutrition Bulletin 30, 237-277.
2. Lippert, F. & Hara, A.T. (2012). Strontium an d caries: a long and complicated relationship. Caries Research 47, 34-39.
3. Liu, X.-C. & Skibsted, L.H. (2022). Strontium increasing calcium accessibility from calcium citrate. Food Chemistry 367, 130674.
4. Liu, X.-C., Chen, R., Li, K., Sun, W. & Skibsted, L.H. (2025). Strontium and enamel hydroxyapatite stability: Exploring strontium potential as a food supplement. Future Food 12, 100787.
5. Liu, X.-C. & Skibsted, L.H. (2023). Citrate in calcium transport and biomineralization. International Dairy Journal 139, 105561.
6. Skibsted, L.H. (2025). Spontaneous isothermal supersaturation of calcium hydroxycarboxylates and Onsager reciprocal relations. European Food Research and Technology 251, 1097-1104.
7. Liu, X.-C., Chen, R., Sun, W. & Skibsted, L.H. (2024). Calcium bioaccessibility as affected by strontium. Temperature effect on citrate binding to strontium and calcium alone and in combination. Journal of Molecular Liquids 396, 123961.
8. Litwic, A., Edwards, M., Cooper, C. & Dennison, E. (2012). Geographic differences in fractures among women. Womens Health 8, 673-684.
9. Miller, D.G. (1960). Thermodynamics of irreversible processes. The experimental verification of the Onsager reciprocal relations. Chemical Reviews 60, 15-37.

Konsekvenserne af kunstig iltning af søer

- effektvurdering på Danmarks længst iltede søer: Hald Sø og Furesø.

Af Sofie Kamlarczyk[1], Henrik Skovgaard[2], Julia Groth[1], Theis Kragh[1] og Kasper Reitzel[1]

[1] Biologisk Institut, Syddansk Universitet, Odense

[2] WSP Danmark A/S

Foto: Kasper Reitzel.

Kunstig iltning af søers bundvand kan oxidere jernforbindelser, som efterfølgende kan binde fosfor (P) i søernes sediment. Formålet med iltningen er at reducere sedimentets frigivelse af ophobet P i sedimentet til søvandet, så søvandets P-koncentration holdes nede for at forbedre vandkvaliteten og den økologiske tilstand. Så længe der iltes, vil denne mekanisme dominere, men det vides ikke, hvilken betydning den kunstige iltning har for sedimentets langsigtede P-akkumulering og frigivelse af P, når iltningen ophører.

Hald Sø har modtaget kunstig iltning siden 1986 og er dermed Danmarks længst iltede sø. I 2023 besluttede Viborg Kommune forsøgsvis at stoppe iltningen fra sæsonen 2024. Til sammenligning har Danmarks dybeste sø, Furesø, modtaget ilt siden 2003 og iltes stadig.

For at få en bedre forståelse for effekten af kunstig iltning og hvad ophør af iltning betyder, har vi undersøgt både Hald Sø og Furesø. Vi har analyseret sedimentets P-puljer i begge søer og simuleret ophør af iltning på indsamlede sedimentprøver og yderligere målt P-koncentrationen i bundvandet i de to søer under iltfrie forhold for at undersøge og sammenligne konsekvenserne af langvarig kunstig iltning samt effekten af ophør heraf.

Fosfors rolle i søer

Ifølge EU's vandrammedirektiv skal der være god økologisk tilstand i alle europæiske søer senest ved udgangen af 2027 [1]. I 2023 var det dog kun fem ud af 986 overvågede danske søer, der opfyldte denne målsætning [2].

Nuværende og historiske udledninger af store mængder næringsstoffer fra søernes opland er den primære årsag til dårlig økologisk tilstand i danske søer. Særligt har store tilførsler af P fra især landbrug, spildevand og dambrug haft store konsekvenser for søernes nuværende tilstand [3].

Fosfor er som regel det begrænsende næringsstof for primærproducenterne (alger, undervandsplanter m.m.) i søer, og derfor kan forurening med P føre til store algeopblomstringer, som er en af indikatorerne på dårlig økologisk tilstand [4]. Tilførslen af P kan komme fra eksterne kilder, for eksempel gennem afstrømning fra marker og fra spildevand. Denne eksterne tilførsel kan føre til akkumulering af P i søernes sediment (bund), og på sigt vil dette bevirke, at en del af denne ophobede og nu internt bundne P kan frigives fra sedimentet og derved fastholde søerne i en uklar tilstand i en kortere eller længere årrække, selv hvis de eksterne P-tilførsler reduceres [4].

En af de vigtigste interne P-kilder er P bundet til oxideret jern (III) i sedimentet under iltede forhold. Men når iltniveauet falder på grund af nedbrydning af organisk materiale, reduceres jern (III) til jern (II), hvorved P frigives

Figur 1. Visualisering af opskæring af sedimentkerner til fraktionering samt opsætning af anoxiske fluxforsøg.

til vandsøjlen [2]. Denne ophobning og efterfølgende interne P-frigivelse fra sedimentet kan fastholde en sø i en forringet økologisk tilstand, selv mange år efter de eksterne belastninger er reduceret [5].

Restaureringstiltag

Da en stor intern P-belastning i mange søer er en væsentlig årsag til søers vedvarende dårlige tilstand, fokuserer nogle af de mest benyttede restaureringsmetoder netop på at immobilisere mængden af internt ophobet P i søerne [3].

Ved kemisk sørestaurering tilsættes P-bindende kemikalier som aluminium og lerproduktet Phoslock til søens sediment [3]. Disse kemikalier danner tungtopløselige forbindelser med P, der herved bliver bundet permanent i sedimentet og vil være utilgængeligt for blandt andet alger.

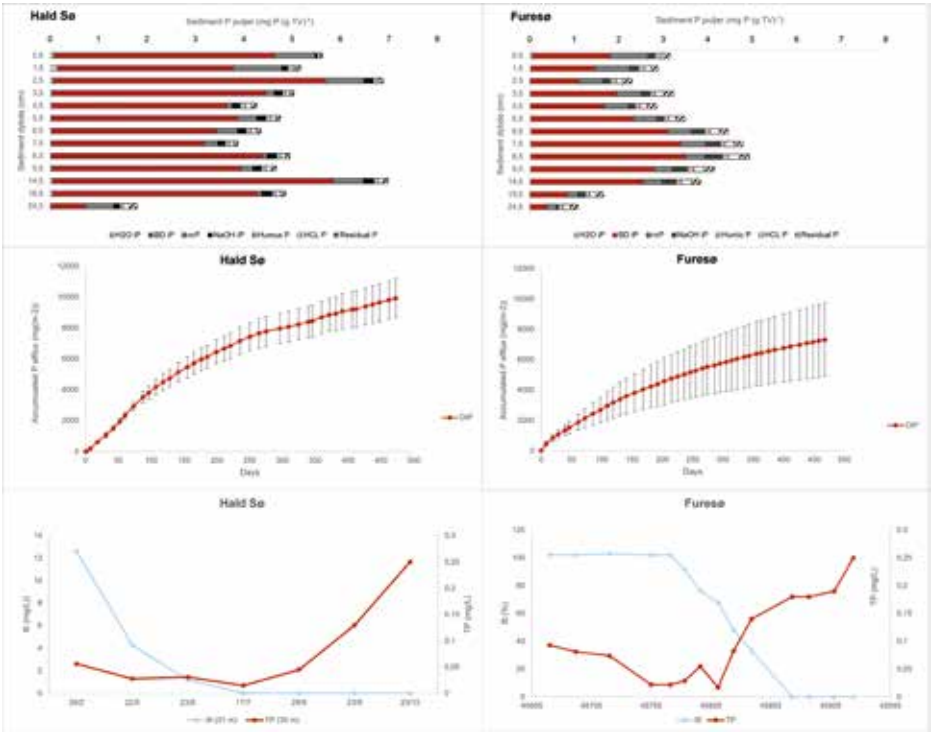
En anden form for sørestaurering er iltning af dybe søers bundvand. Iltning adskiller sig fra kemisk restaurering ved at udnytte sedimentets egen naturlige evne til at binde P ved at holde jern på sin oxiderede form, så P fastholdes i sedimentet [6]. Dette forudsætter dog, at der er tilstrækkelige mængder jern til stede i søens sediment. I modsætning til kemisk restaurering faciliterer iltningen som udgangspunkt ikke en permanent binding i sedimentet, og effekten må formodes at ophøre, hvis iltningen stopper og der igen opstår iltfrie forhold [6]. For at iltning kan have en langvarig effekt på den økologiske tilstand, efter ophøret af iltningen, skal den eksterne belastning derfor være reduceret tilstrækkeligt til, at der ikke dannes nye store algeopblomstringer, der vil kunne opbruge alt ilten i bundvandet [6].

En yderligere mulighed for at fastholde P permanent i sedimentet efter endt iltning, kunne ske gennem dannelsen af reducerede jern-P-forbindelser som vivianit, der ikke opløses under iltfrie forhold [7]. Denne mekanisme er dog endnu ikke verificeret i danske iltede søer.

Hald Sø og Furesø – Danmarks længst iltede søer

Hald Sø i Viborg Kommune har et areal på omkring 330 hektar og en maksimal dybde på cirka 31 meter, og var den første danske sø, hvor iltning blev igangsat, i 1985. Hald Sø er blevet iltet stort set hver sommer, men iltningen blev forsøgsvis standset i 2024 [8].

I 2003 blev iltning også påbegyndt i Danmarks dybeste sø, Furesø nord for København. Furesø har et areal på omkring 941 hektar og en maksimal dybde på cirka 38 meter [9]. I Furesø iltes der stadig hver sommersæson.



Figur 2. Sammenligning af P-puljer, P-frigivelse samt in situ-målinger af ilt, P og N i Hald Sø og Furesø. De øverste figurer viser en jernbundet fosforpulje (P_{-BD}, rød), som strækker sig ned til cirka 15-20 centimeter i sedimentet. Den største P-pulje forekommer i Hald Sø. I figurerne under ses P-frigivelse under simulerede iltfrie forhold med den højeste frigivelse fra sedimentet i Hald Sø. De to nederste figurer viser in situ-målinger af ilt og P samt den gennemsnitlige sommerkoncentration af nitrat + nitrit i bundvandet (30 meter i Hald Sø, 34 meter i Furesø). Sommergennemsnittet af nitrat + nitrit er markant højere i Hald Sø end i Furesø. I begge søer forekommer iltfrie forhold omkring juli på de største dybder.

Iltning af både Hald Sø og Furesø har medført store omkostninger i begge søer [10,11]. I Hald Sø har de 37 års iltning kostet omkring 11,1 millioner kroner i driftsomkostninger [10], mens beløbet er tættere på 20 millioner i Furesø. Da både Furesø og Hald Sø er dybe søer (+30 m dybde), der har været udsat for iltning i en lang årrække, fremstår de som sammenlignelige systemer. At iltningen nu er ophørt i Hald Sø, giver derfor en unik mulighed for at undersøge, hvilken betydning langvarig iltning og dens ophør har for søernes økologiske og kemiske forhold. Vores hypotese er, at ophør af iltning i Hald Sø ville kunne føre til iltfrie forhold i bundvandet og dermed P-frigivelse fra sedimentet fra den opbyggede jern-P-pulje. Det skal her nævnes, at en dyb sø som Hald Sø med et stabilt temperaturspringlag om sommeren også naturligt vil have en periode med iltfrie forhold i bundvandet. Iltningen af bundvandet kan dermed betragtes som en form for kunstig forøgelse af iltindholdet.

Potentiel P-frigivelse under iltfrie forhold

For at undersøge den potentielle P-frigivelse fra sedimentet under iltfrie forhold indsamlede vi uforstyrrede sedimentkerner fra Furesø i 2022 og fra Hald Sø i 2024. I både Furesø og Hald Sø blev der indsamlet otte sedimentkerner fra 31 meters dybde. Tre sedimentkerner blev anvendt til såkaldt P-fraktionering, hvor sedimentet opskæres i horisontale lag, og forskellige P-former (for eksempel jern (III)-P) kan ekstraheres og bestemmes (figur 1 og 2).

For at simulere de forventede iltfrie forhold efter endt iltning blev de resterende fem sedimentkerner inkuberet under iltfrie forhold, så P-frigivelsen til det overliggende vand i rørene kunne følges over tid (figur 1). Der blev udtaget prøver hver 10. dag i cirka 15 måneder, hvor blandt andet P-koncentrationen blev bestemt. Vandet i sedimentkernerne blev løbende udskiftet for at hindre, at det overliggende vand blev mættet med P, hvilket ville mindske frigivelsen fra sedimentet. Udover disse laboratorieforsøg fulgte vi de naturlige ændringer i koncentrationerne af ilt og P samt nitrat i løbet af sommersæsonen 2025 i de to søer.

Vores resultater viste en stor jernbundet P-pulje i de øverste 10 centimeter af de to søers sediment svarende til 49 og 35 tons P for hhv. Hald Sø og Furesø un-

der forudsætning af, at vores sedimentprøver repræsenterede arealer mellem 15-30 meters vanddybde.

I laboratorieforsøgene blev der observeret en stor og langvarig frigivelse af P fra sedimentet i laboratorieforsøgene for begge søer. I Hald Sø estimerede vi, at tre måneders iltfrie forhold årligt potentielt ville kunne medføre en P-frigivelse svarende til cirka 3,2 tons P, hvis resultaterne blev opskaleret til søens areal med dybder på mellem 15 og 30 meter (1,65 kvadratkilometer). For Furesø estimerede vi tilsvarende en frigivelse på omkring 5,1 tons P fra arealer med samme dybdeinterval (3,54 kvadratkilometer). Efter henholdsvis 1000 og 472 dages P-frigivelsesforsøg frigiver sedimentkernerne fra Furesø og Hald Sø stadig P den dag i dag, dog med en lavere rate.

Sammenlignes P-frigivelsen fra laboratorieforsøgene med de faktiske P-målinger i Hald Søs og Furesøs bundvand, tegner der sig dog et noget andet billede (figur 2). I begge søer indtræffer iltfrie forhold i bundvandet omkring juli. Men P-frigivelsen bliver først betydelig omkring august i Hald Sø, mens den i Furesø starter tidligere, allerede omkring maj/juni. På trods af måneder med iltfrie forhold var sommer P-frigivelsen fra sedimentet i Hald Sø i 2024 og 2025 sammenlignelig med årene før ophøret af iltningen [12]. Det var først i efteråret 2024 og 2025, at der i blandingsprøver fra Hald Søs bundvand blev observeret en betydelig P-frigivelse.

Faktaboks 1

Respirationsprocesser

Nedbrydning af organisk materiale i søens sediment sker gennem en række respirationsprocesser, som udføres af mikroorganismer i sedimentet. De forskellige respirationsprocesser er ikke alle lige energimæssigt fordelagtige. Den mest energetisk favorable proces er respiration ved brug af ilt, hvorfor ilten bliver opbrugt først. Blandt de anoxiske respirationsprocesser rangerer energiforbruget fra højst til lavest, som følger: Nitratrespiration, manganrespiration, jern (III)-respiration, sulfatrespiration og til sidst metandannelse [13]. Da nitratrespiration er mere energetisk favorabel end jern (III)-respiration kan tilstedeværelsen af nitrat i tilstrækkelige mængder hæmme jern (III)-respirationen og dermed frigivelsen af P [13].

Det tyder derfor på, at sedimentets jernpulje stadig kan tilbageholde P, selv under iltfrie forhold i Hald Sø. En forklaring på dette kan være en væsentligt højere nitratkoncentration i Hald Sø sammenlignet med Furesø [14]. Som det fremgår af faktaboks 1 kan tilstedeværelsen af nitrat bevirke, at Fe holdes oxideret. Den høje nitratkoncentration i Hald Sø kan derfor forsinke reduktionen af jern (III) i sedimentet, hvilket bevirker, at P forbliver bundet i søens sediment, selv under iltfrie forhold. Da nitratkoncentrationen i Hald Sø er betydeligt højere end i Furesø (figur 2), og er lav om efteråret, kan dette forklare den lavere og forsinkede P-frigivelse om sommeren i Hald Sø sammenlignet med Furesø (figur 2).

I vores iltfrie P frigivelsesforsøg udskiftes vandet typisk med intervaller på 10 dage, hvorimod vandudskiftningen hen over sedimentoverfladen i søen sker kontinuerligt som følge af naturlige vandbevægelser. Det er derfor meget sandsynligt, at nitratet i vores forsøgsvand forbruges hurtigere end de 10 dages inkubationstid, hvormed effekten af nitrat på jernoxidationen vil blive undervurderet ud fra vores laboratorieforsøg. Det formodes derfor, at dette potentielt kan føre til en større P-frigivelse end den, der faktisk forekommer i søen. I Furesø stemmer P-frigivelsen, der er observeret i frigivelsesforsøget, heller ikke overens med den P-frigivelse, som forventes under iltfrie forhold i søen. Denne uoverensstemmelse kan dog forklares ved, at der fortsat iltes i søen, også i perioden 2025, hvilket betyder, at iltfrie forhold i bundvandet ikke nødvendigvis er vedvarende eller sammenhængende. Som følge heraf kan forholdene i søen blandt andet adskille sig fra de strengt iltfrie forhold, der er etableret i P-frigivelsesforsøget.

Konklusion

Vores sedimentanalyser viser, at iltningen i både Hald Sø og Furesø som forventet har medført en akkumulering af store mængder jernbundet P i sedimentet, som potentielt kan frigives under iltfrie forhold. Laboratorieforsøg af P-frigivelsen under iltfrie forhold stemte dog ikke overens med in situ-målinger i Hald Sø, hvor den faktiske P-frigivelse var meget mindre end forventet trods flere måneder med iltfrie forhold på de største dybder. Denne forskel kan sandsynligvis tilskrives de høje nitratkoncentrationer i Hald Sø, som hæmmer reduktionen af jern (III) og dermed tilbageholdes P i sedimentet i længere tid. De generelt lavere nitratniveauer i Furesø resulterer i en hurtigere frigivelse af P, når der opstår iltfrie forhold i bundvandet.

Hald Sø har haft en god vandkvalitet i 2025 og har ikke været påvirket af P fra bundvandet. Efter opblanding af vandmasserne om efteråret geniltes bundvandet og frigivet P til bundvandet genudfældes i løbet af vinteren. Selvom P-frigivelsen i Hald Sø indtil videre har været begrænset, er det usikkert, hvordan søen vil udvikle sig i fremtiden, hvis nitratkoncentrationen falder, eller iltforbruget stiger. På baggrund af vores forsøg kan det konkluderes, at effekten af iltning og ophør heraf må forventes at kunne variere mellem søer. Det er derfor væsentligt at inddrage og vurdere flere forskellige faktorer, når beslutningen om at ophøre kunstig iltning skal træffes. I sådanne beslutninger kan også hensynet til bunddyr, fisk og andre biologiske forhold inddrages.

E-mail:
Kasper Reitzel: reitzel@biology.sdu.dk

Litteratur

1. Miljøstyrelsen and M.-o. Energiministeriet, *Redegørelse om Vandrammedirektivet*. 2001, Miljøstyrelsen: mst.dk.
2. Fødevareministeriet, m.-o. (2019). Basisanalyse for vandområdeplaner 2021-2027. Miljøstyrelsen.
3. Kasper Reitzel, L.D., Ulla Gro Nielsen, *Kemisk Sørestaurering.* Dansk Kemi, 2015(6/7): p. 22-24.
4. Sofie Emilie Svendson Kamlarczyk, K.R.J.o.T.K., *Fosfor-kredsløbet og fremtidens sørestaurering.* Aktuel naturvidenskab, 2022. **4**.
5. Sondergaard, M., J.P. Jensen, and E. Jeppesen, *Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes.* Hydrobiologia, 2003. **506-509**(1-3): p. 135-145.
6. Søndergaard, M., et al., *Vejledning for gennemførelse af sørestaurering: Videnskabelig rapport fra DCE*. 2020: Aarhus Universitet.
7. Wang, Q. et al. *Quantitative determination of vivianite in sewage sludge by a phosphate extraction protocol validated by PXRD, SEM-EDS, and 31P NMR spectroscopy towards efficient vivianite recovery, Water Research 2021 Vol. 202.*
8. Liboriussen, L., et al., *Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality: results from five Danish lakes.* Hydrobiologia, 2009. **625**(1): p. 157-172.
9. Gertz-Hansen, O. *Furesøs miljøtilstand 2017: Effekten af ilttilførsel 2003-2017,* 2018.
10. Søndergaard, M., et al. *Danske søer og deres restaurering: Temarapport fra DMU*. 1999. Miljø- og Energiministeriet.
11. Furesø Kommune, *Budget 2025-2028* 2025. *Bevillingsoversigter.* UÅ.
12. Danmarks Miljøportal. 2023: Miljødata.dk.
13. Bondo, P. et al., P.B.C.e., *Stofomsætningen i havbunden.* Danmarks Miljøundersøgelser, 2002.
14. Hansen, J., et al., *Effects of aluminum, iron, oxygen and nitrate additions on phosphorus release from the sediment of a Danish softwater lake.* Hydrobiologia, 2003. **492**(1): p. 139-149.

Svampe giver køerne kamp til stregen, når det kommer til produktion af mælkeprotein

Vores fødevareproduktion er alt for klimabelastende, og én af løsningerne findes i mælkeprotein produceret af svampe med en teknologi, der kaldes præcisionsfermentering.

Af Christian E. Rusbjerg-Weberskov, Mikael Terp og Mette Lübeck, Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet

Proteiner er en essentiel del af vores kost, og størstedelen af de proteiner, vi spiser, kommer fra kød og animalske kilder. Disse animalske proteinkilder har en stor klimabelastning, og derfor er det nødvendigt at finde alternative proteinkilder. Ved at kombinere svampe, moderne genteknologi og store ståltanke kan man ved præcisionsfermentering producere animalske proteiner uden dyr og med mindre klimaaftryk.

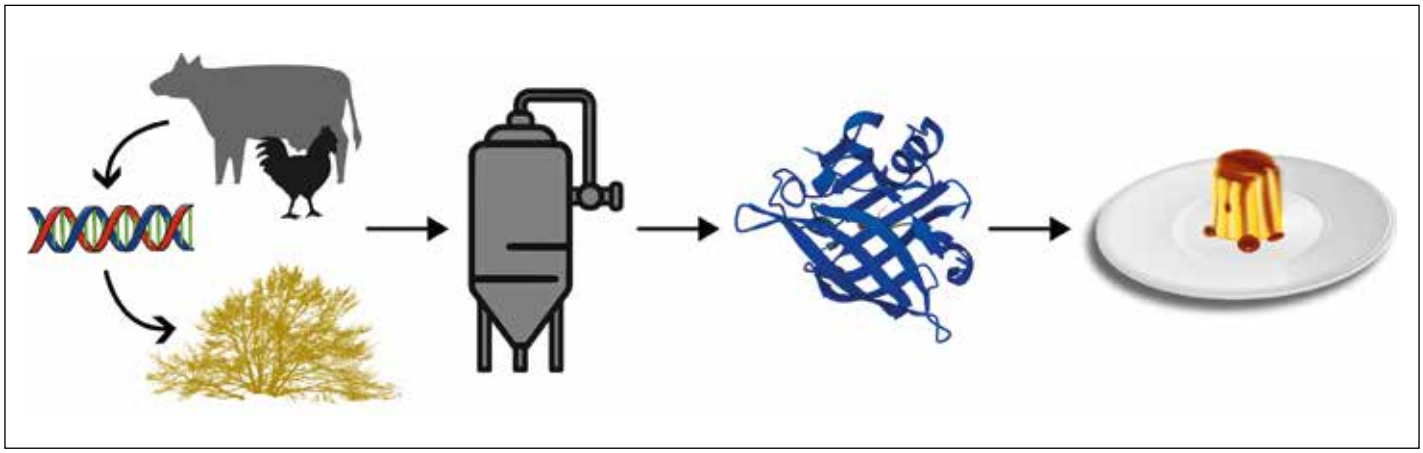
Fødevareproduktionen står over for en transition

Vi ser ind i en stigende befolkningstilvækst på kloden og dermed en stigende efterspørgsel på fødevarer. Vores nuværende fødevareproduktion har i forvejen et markant klimaaftryk, idet det bidrager med 30 procent af den totale drivhusgasudledning på verdensplan [1].

Læg dertil, at kødforbruget er stigende på verdensplan, hvilket øger klimabelastningen fra fødevaresektoren yderligere, samtidig med at dyrkbart landbrugsareal reduceres på grund af klimaforandringer. For at lykkes med den grønne omstilling skal der derfor foretages nogle markante ændringer i vores fødevareproduktion. Én af disse ændringer vil formentlig være, at proteiningredienser i fremtiden fremstilles af mikroorganismer i ståltanke ved præcisionsfermentering fremfor at komme fra mælk og æg.

Den rigtige slags protein

I fødevareindustrien har man ofte valleproteiner og æggehvideproteiner stående på hylderne som vigtige ingredienser i en lang række fødevarer. Disse ingredienser bidrager til at give den rette tekstur i form af emulsion (for eksempel i pølser, ost og dressinger) samt skum og ▶



Figur 1. Ved præcisionsfermentering udnyttes moderne genteknologi til at indsætte gen fra for eksempel ko eller høne kodende for mælkeprotein eller æggehvideprotein i en filamentøs svamp. I en bioreaktor kontrolleres fermenteringen nøjagtigt for at sikre bedst mulige betingelser for svampen og dermed højest mulig produktion af det protein, man ønsker. Proteinet isoleres og kan anvendes som ingrediens, hvor det kan erstatte animalske proteiner uden kompromis på hverken smag eller funktionalitet.

Figur 2. Fermentering under forskellige betingelser kan bruges til at styre svampens morfologi. På billedet ses den samme svamp, *Rhizopus oryzae,* vokse som små homogene bolde (venstre), som heterogen filamentøs biomasse (midt) og som større heterogene klumper (højre). Morfologien påvirker proteinproduktion og er én af mange faktorer, der skal optimeres i en succesfuld præcisionsfermenteringsproces.

gelering (for eksempel i desserter, kager og bagværk). Dette er altså to typer protein med meget eftertragtede funktionelle egenskaber, som langtfra findes hos alle proteiner. Udover de funktionelle egenskaber har både valleproteiner og æggehvideproteiner en høj næringsværdi, da de både er let fordøjelige og har et højt indhold af essentielle aminosyrer. Med andre ord er det ikke tilfældigt, at det netop er disse proteiner, der står på hylderne i fødevareindustrien. Da begge proteiner – indtil nu – er af animalsk oprindelse, har de et stort klimaaftryk. I fremtiden vil de samme proteiner dog kunne produceres med et meget lavere klimaaftryk af mikroorganismer ved hjælp af præcisionsfermentering.

Svampe bliver de nye "produktionsdyr"

Den ideelle mikroorganisme til præcisionsfermentering skal kunne trives i en flydende kultur i en bioreaktor, kunne producere en stor mængde protein og skal kunne modificeres med moderne genteknologi. Disse kriterier opfyldes af filamentøse svampe, også kaldet skimmelsvampe, som allerede i dag bruges industrielt til produktion af blandt andet enzymer, citronsyre og lægemidler [2]. Også til proteinproduktion præsterer bestemte typer af filamentøse svampe bedre end bakterie og gær, som også er under lup som "produktionsdyr" til præcisionsfermentering.

For at få svampen til at producere et bestemt protein, som for eksempel valleproteinet beta-lactoglobulin fra ko, skal genet kodende for dette protein indsættes i svampens genom (figur 1, side 15). Det elegante ved biologien er, at gener er skrevet med det samme sprog, uanset om det kommer fra ko, svampe eller noget helt tredje, og derfor kan et gen fra en ko oversættes af svampen til et protein identisk med det, vi finder i mælk – det er, hvad der i biologien er døbt det centrale dogme.

Mange knapper at skrue på

Selvom det lyder avanceret at indsætte et gen fra en ko i svampens genom, så er den største opgave i selve konstrueringen af en produktionsstamme. Det er nemlig en umådelig kompleks opgave at instruere svampen i og tilpasse den til at producere proteinet i store mængder. De knapper, der skal skrues på, består blandt andet af indsættelse af flere kopier af genet, korrekt valg af promoter til at styre udtrykket af proteinet, og fjerne svampens ekstracellulære proteaser, som er enzymer, der nedbryder proteiner, for netop at forhindre nedbrydelse af proteinet. Derudover skal der slukkes for svampens produktion af irrelevante ekstracellulære proteiner og tilpasse svampens morfologi til optimal ydeevne i bioreaktorer, som er ståltanke, hvori selve proteinproduktionen foregår [2,3].

Flere kopier af genet vil tillade et højere udtryk, simpelthen fordi genet fysisk skal tilgås af transkriptionsfaktorer og RNA polymerase for at lave mRNA-kopier af genet, som kan oversættes af ribosomerne til proteinet.

Promoteren er det DNA-element, der styrer, hvornår og hvor meget et gen bliver udtrykt og er placeret lige foran selve genet. Ved præcisionsfermentering ønskes typisk en promoter, der enten giver et konstant højt genudtryk eller inducerer højt genudtryk under kontrollérbare betingelser. Hvor finder man så sådan en promoter? Der findes biblioteker over kendte promotere med højt genudtryk fra de mest studerede svampe, for eksempel *glaA* promoteren fra *Aspergillus niger*, der dirigerer en høj produktion af det stivelsesnedbrydende enzym glucoamylase A. Alternativt leder man efter højt udtrykte gener i den valgte produktionssvamp under de ønskede betingelser, identificerer genet, lokaliserer promoteren og låner promoteren til at styre udtrykket af det protein, der skal produceres. Genomsekventering, bioinformatiske værktøjer og moderne genteknologi tillader, at man kan kopiere og indsætte stykker af DNA for at opnå de egenskaber, man ønsker.

Filamentøse svampe får deres næring ved at optage sukker og nitrogen, hvis det er tilgængeligt i en form, der kan optages. Hvis det ikke er tilfældet, udskiller svampene proteaser, amylaser, cellulaser og andre hydrolytiske enzymer for at nedbryde hhv. proteiner, kulhydrater, fibre og andre makromolekyler i omgivende substrater til aminosyrer og sukker, som derefter kan optages som næring. Ved præcisionsfermentering er det et problem at have ekstracellulære proteaser side om side med det protein, man ønsker at producere – proteinet ender simpelthen med at blive klippet i stykker. De øvrige enzymer er overflødige for svampen i bioreaktoren og produceres ofte i store mængder, hvorved de optager for meget af svampens totale produktionskapacitet. Derfor bruger man moderne genteknologi til at forhindre produktion af proteaser og andre højt udtrykte enzymer – man udfører gen knockout [4].

I en bioreaktor vokser forskellige filamentøse svampe med forskellig morfologi. Nogle vokser som små bolde og andre som heterogene filamentøse klumper (figur 2). Knockout af gener involveret i syntese af cellevæggen kan bruges til at ændre svampens morfologi og tilpasse den til optimal proteinproduktion [5].

En generel udfordring er derudover at reproducere størrelsen af det udbytte, man opnår i laboratorieskala, når man skalerer fermenteringen fra rystekolber og mindre bioreaktorer på milliliter- og literniveau til industriel skala på hundredvis af liter (figur 3).

Foto: Freepik.com.

Præcisionsfermentering nu og i fremtiden

Allerede i dag findes der virksomheder, som anvender filamentøse svampe til at producere præcisionsfermenterede proteiner. Franske Verley anvender *Aspergillus oryzae* til produktion af valleproteinet beta-lactoglobulin[1], og det finske Onego Bio anvender *Trichoderma reseei* til produktion af æggehvideproteinet ovalbumin[2]. Onego Bio er netop i gang med at opføre et anlæg i USA, der kan producere ovalbumin i en størrelsesorden svarende til æggehvider fra seks millioner høns. Vi kan altså forvente, at vi i fremtiden kommer til at spise svampeproduceret animalsk protein.

Ved at erstatte produktionsdyr med præcisionsfermentering opnås en enorm besparelse i både drivhusgasudledning og landbrugsareal, som der i dag i høj grad benyttes til produktion af dyrefoder. Der ligger dog en yderligere klimamæssig besparelse og venter i en kommende generation af præcisionsfermentering, hvor svampenes foder bliver mere bæredygtigt. For hvad fodres svampene egentlig med, når de vokser i bioreaktoren og producerer fremtidens ikke-animalske proteiner? Sukker. Svampene spiser altså en fødevare, som vi kunne have spist, og optager dermed landbrugsareal, hvor der kunnet have været dyrket fødevarer.

De filamentøse svampe er kendte for deres evne til at kunne nedbryde stort set hvad som helst af biologisk art. Der arbejdes derfor i et dansk forskningsprojekt på at omdanne restprodukter, for eksempel havreskaller fra havregrynsproduktion og mask fra ølbrygning, til substrat til svampene og på at udvikle svampestammer, der kan formå både at gro på disse sidestrømme og producere protein[3]. Når dette lykkes, vil et hjul i den cirkulære bioøkonomi falde i hak ved at udnytte eksisterende restprodukter og frigøre landbrugsareal til fødevareproduktion.

Præcisionsfermentering er altså ved at etablere sig som én af løsningerne på den grønne omstilling og vil uden tvivl undergå videreudvikling i fremtiden.

E-mail:
Christian E. Rusbjerg-Weberskov: cerw@bio.aau.dk
Mette Lübeck: mel@bio.aau.dk

Figur 3. I laboratoriet bruges rystekolber og mindre bioreaktorer som forsøgsudstyr under udvikling og optimering af produktionsstammen – svampen, man udvikler til at producere proteinet, man ønsker. I industrien udføres fermenteringen i bioreaktorer med kapacitet på 100-2000 liter eller større.

Referencer

1. FAO. 2024. *Greenhouse gas emissions from agrifood systems – Global, regional and country trends, 2000-2022*. FAOSTAT Analytical Brief Series, No. 94. Rome. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd3167en.
2. Lübeck M, Lübeck PS. Fungal Cell Factories for Efficient and Sustainable Production of Proteins and Peptides. Microorganisms. 2022 Mar 30;10(4):753. doi: 10.3390/microorganisms10040753.
3. Nielsen MB, Meyer AS, Arnau J. The Next Food Revolution Is Here: Recombinant Microbial Production of Milk and Egg Proteins by Precision Fermentation. Annu Rev Food Sci Technol. 2024 Jun;15(1):173-187. doi: 10.1146/annurev-food-072023-034256.
4. Yoon J, Maruyama J, Kitamoto K. Disruption of ten protease genes in the filamentous fungus Aspergillus oryzae highly improves production of heterologous proteins. Appl Microbiol Biotechnol. 2011 Feb;89(3):747-59. doi: 10.1007/s00253-010-2937-0.
5. Zhou Y, Duan Y, Chen L, Yang Y, Ma L, Chen W, Liao Z, Cai J, Li D. Engineering dispersed mycelium morphology in Aspergillus niger for enhanced mycoprotein production via CRISPR/Cas9-mediated genome editing. Bioresour Technol. 2025 Sep;432:132652. doi: 10.1016/j.biortech.2025.132652.

[1] https://www.proteinproductiontechnology.com/post/verley-secures-first-fda-no-questions-letter-for-functionalized-dairy-proteins-made-via-precision-fermentation?utm_source=mail.futureofproteinproduction.com&utm_medium=newsletter&utm_campaign=join-us-at-fpp-amsterdam-where-conversations-turn-into-partnerships-and-ideas-turn-into-impact&_bhlid=b87676a4284f0246bcd7bbfde81f790b38b93e77

[2] https://www.proteinproductiontechnology.com/post/onego-bio-receives-fda-no-questions-letter-confirming-gras-status-of-bioalbumen

[3] https://innovationsfonden.dk/en/news/microbes-create-sustainable-proteins

To naturfagslærere fra slutningen af 1800-tallet

Naturvidenskab kom ind i latinskolen – den lærde skole – i midten af 1800-tallet. Hvad var det for lærere, der underviste i naturvidenskab i den lærde skole og realskolen?

Af Børge Riis Larsen, lektor emer.,
cand.scient. & art., ph.d.

I 2000 redigerede jeg bogen *pH - en dansk idé*, og jeg har flere gange holdt foredraget: *Fra Havrebjerg til Carlsberg – om S.P.L. Sørensen og pH.* I den forbindelse har jeg undersøgt, hvem der underviste Sørensen (1868-1939) i naturfag i hans skoletid og måske inspirerede ham først til medicin- og senere til kemistudiet.

Hvem var S.P.L. Sørensen?

Han indførte størrelsen pH i 1909 og er den dansker, som flest gange er nomineret til en nobelpris – faktisk hele 25 gange i årene 1915-35 – dog uden at få den. Hans forældre havde syv børn, og S.P.L. Sørensen var den ældste af dem. Hvert tredje år afholder familien en stor sammenkomst i *Løve Forsamlingshus*, og her var jeg i efteråret 2024 blevet bedt om at holde mit foredrag om Sørensen og pH. Heri deltog omkring 90 personer. I en karakterliste fra *Havrebjerg Skole* kan vi se, hvad forbogstaverne i navnet står for: *Søren Peder Laurits*. Hans familie kalder ham generelt *Søren Peter*.

I tidernes morgen bestod den almene dannelse af kendskab til de klassiske sprog *latin, oldgræsk og hebraisk*. *Naturvidenskab* kom ind i latinskolen i midten af 1800-tallet. Skulle man nu være et dannet menneske, måtte man også have kendskab hertil. I det følgende skal vi se på, hvad var det for lærere, der underviste i naturvidenskab i den lærde skole og realskolen.

Lærerpersonalet ved realskolen i Lemvig omkring år 1900. Zeuthen ses stående til venstre [2].

Havrebjerg Skole

S.P.L. Sørensen gik først i *Havrebjerg Skole* fra 1875-79. Her var der ikke undervisning i naturlære, men i religion, læsning, skrivning og regning – herudover fik eleverne også karakter i "Sædelighed".

Slagelse Realskole

Dernæst gjaldt det *Slagelse Realskole* fra 1879-82 i en skolebygning, som eksisterer den dag i dag. I realskoletiden var der undervisning i naturlære – dvs. fysik og kemi. Undervisningen heri foregik i skolens to ældste klasser, dvs. 6. og 7. klasse med tre hhv. fire timer om ugen. Her var underviseren *Edv. Zeuthen* (1847-1933). Han var dimitteret fra *Ranum Seminarium* i 1868 og tog senere eksamen fra et videregående kursus for uddannelse af lærere ledet af D.G. Monrad [1].

Zeuthen var ansat på skolen i Slagelse i en årrække. Den blev ledet af højrepolitikeren *Fr. Dahl*, og Zeuthen bestyrede skolen under Dahls virke som medlem af Rigsdagen. Senere kom Zeuthen til *Realskolen i Lemvig*, hvor han i en årrække fungerede som skolebestyrer.

Sorø Akademi

Her var Sørensen elev i årene 1882-86. Læreren i fysik og kemi havde det imponerende navn *Napoleon Eugène Georg Otto Ibsen* (1834-1902). Han var uddannet *exam.polyt.* – dvs. at han havde en bachelorgrad fra *Polyteknisk Læreanstalt*. Han blev ansat i Sorø i maj 1866, og havde her tilsyn med den fysiske samling til 1901. I Akademiets årsskrifter kan vi se, hvad man læste i fagene. Da Sørensen gik i 4. klasse efter den matematisk-naturvidenskabelige retning, læste man fysik efter en bog af *H.C. Ørsted* (1777-1851), og i kemisk fysik en bog af *Georg Silfverberg* (1822-73). Den sidstnævnte forfatter er vel ikke så kendt som den første, så der kommer lidt om ham senere.

Søn af prins Christian Frederik, den senere kong Christian 8.?

I en artikel i *Soranerbladet* fra 1979 læser vi, at der går en myte om, at Ibsen skulle være søn af prins *Christian Frederik*

Overlærer Eugène Ibsen [3].

(1786-1848) – den senere danske konge *Christian 8*. Og der henvises her til en artikel i *Illustreret Tidende* fra 1902.

Christian 8.'s anden ægtefælle *Caroline Amalie* (1796-1881) havde som enkedronning taget den unge Ibsen under sin særlige beskyttelse. Når Ibsen vendte hjem til sit pensionat søndag aften og blev spurgt om, hvor han havde været henne, sagde han "Hos Caroline Amalie".

Christian 8. var død i 1848, hvor Ibsen var omkring konfirmationsalderen, og er teorien rigtig om, at Christian 8. var hans far, besøgte Ibsen altså faderens enke.

Der er også flere forfattere (den tidligere gymnasierektor i Slagelse, borgmester i byen og medlem af Folketinget *Jens Jørgensen* samt journalist m.m. *Rolf Dorset* (1938-2014)), der mener, at *H.C. Andersen* havde samme fader. Og det er da en interessant tanke, at digteren og en fysik- og kemilærer på *Sorø Akademi* kunne være halvbrødre. Såvel Ibsen som Andersen tilbragte i øvrigt deres barndom i Odense.

Christian 8. var far til en del uægte børn. Var han far til Andersen og Ibsen, er det vel ikke usandsynligt, at han sørgede for familier, der kunne passe dem, og de kunne således begge være anbragt hos familier i Odense.

Andersen gæstede ofte digteren B.S. Ingemann (1789-1862) i Sorø og boede også undertiden hos ham.

Mon ikke han også besøgte sin halvbror, når han gæstede Ingemann i Sorø?

Mere om Sørensen

Efter tiden i Sorø gik det stærkt for Sørensen, og han tog i 1886 til København for at studere medicin. Under de forberedende studier, blev han så grebet af kemien, at han fortsatte med at studere dette fag.

Herefter gik det hurtigt. Fra 1889 til 1899 fik han to gange Universitetets guldmedalje, tog magisterkonferens og siden en doktorgrad. Han nåede desuden at være værnepligtig i søminekorpsets laboratorium.

Sørensen benyttede normalt forbogstaverne S.P.L., og det har næppe været kendt, hvad de stod for. Men på et tidspunkt gav nogle af hans medarbejdere tre forsøgshunde navnene *Søren*, *Peter* og *Lauritz*, uden at Sørensen tilsyneladende lod sig mærke med det.

Hvordan kan det i øvrigt være, at der ikke er opkaldt en vej efter S.P.L. Sørensen – én af Danmarks mest kendte kemikere?

Silfverberg, Georg

Georg Silfverberg skrev flere lærebøger i naturfag til den lærde skole. I perioden 1847-1864 udkom hans *Chemisk Physik til Brug ved Skoleunderviisningen* i hele tre udgaver. Herudover skrev han en *Kortfattet Lærebog i den uorganiske Chemie*, som udkom i 1855.

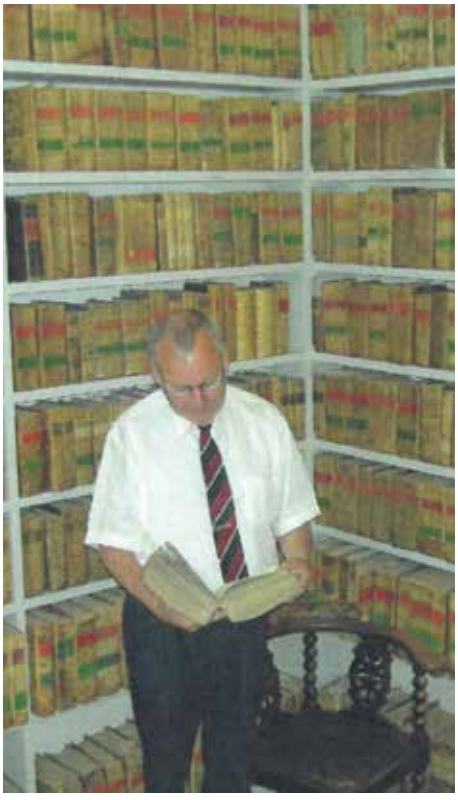


Foto: Susan Kryger.

Børge Riis Larsen er cand.scient. & art. i kemi, fysik og teoretisk pædagogik samt ph.d. i kemi. Han tog pædagogikum på *Sorø Akademis Skole* i 1973-74 og har i en årrække undervist på *Slagelse Gymnasium*. Han har ofte besøgt biblioteket på Sorø Akademis Skole og har her fundet materiale til artikler og bøger.

Erik Georg Silfverberg dimitterede i 1841 fra *Borgerdydskolen*. Han studerede matematik og naturvidenskab ved *Den polytekniske Læreanstalt*, fra hvilken han i 1846 tog "Afgangseksamen i Mathematik". Fra august 1848 var han ansat som lærer i matematik og naturvidenskab ved *Den videnskabelige Realskole* i Helsingør. Fra 1851 finder vi ham som lærer og senere som adjunkt ved *Flensborg Lærde- og Realskole*. Her var han ansat indtil 1864, hvorefter han blev lærer i matematik ved *Borgerdydskolen* i København. Han udgav flere lærebøger i kemi og fysik, af hvilke især hans kemiske fysik blev en meget benyttet lærebog.

Silfverbergs bog "Chemisk Physik til Brug ved Skoleunderviisningen" udkom første gang i 1847 og er på 107 sider plus ni sider med tavler med i alt 84 figurer bag i bogen og enkelte tabeller i selve teksten. Den er delt i to dele, og første del behandler dels varmelæren, læren om magnetisme, elektricitet og elektromagnetisme, mens anden del (fra side 77) omhandler meteorologien: Varmens Fordeling paa Jordens Overflade, Luftstrømninger, Den atmosphæriske Fugtighed og Atmosphærens Elektricitet.

Silfverberg har i denne bog, som "kun tildels er en oversættelse" helt undgået brugen af matematik og stort set tillige enhver form for beregninger, og den indeholder heller ingen opgaver eller forslag til, at eleverne selv skulle beskæftige sig med stoffet.

Lad mig til slut i oplyse om, at en egentlig *cand.mag.*-eksamen i de naturvidenskabelige fag kunne tages fra 1883. Fra 1968 fik kandidater i de naturvidenskabelige fag og matematik titlen *cand.scient.*

E-mail:
Børge Riis Larsen:
b.riis.larsen@gmail.com

Referencer
1. D.G. Monrad (1811-87) har som pædagog knyttet sit navn til skoleloven af 1856 og til forbedring af seminarieuddannelsen i 1857, ligesom videregående kursus til uddannelse af lærere skyldes ham.
2. J. Søndergaard Jacobsen (1969): *Lemvig Købstads Historie*.s.147.
3. Portræt i *Illustreret Tidende* (1902) nr. 31 s. 506.

Supporting chemical thermodynamics: The role of infrared spectroscopy

The use of molecular vibrations to probe structure in hydrogen bonding liquids.

By Evangelos Drougkas, Georgios M. Kontogeorgis and Xiaodong Liang, Center for Energy Resources Engineering, DTU Kemitekni k, and Henrik G. Kjaergaard, Department of Chemistry, University of Copenhagen

Hydrogen bonding compounds have a strong presence in many industrial and chemical processes. To tackle the challenge that many thermodynamic models face in the description of their properties, novel experimental data of their structure are of great importance to the chemical engineering community. Vibrational spectroscopy is an accessible yet invaluable tool for inferring the microscopic picture of hydrogen bonding, and its pairing with profound theoretical tools can help revolutionize chemical thermodynamics.

Describing the "network"

A vast range of industrial applications involves hydrogen bonding substances, and the accurate prediction of their physical properties lays the groundwork for the design of advanced and efficient processes. Among them, water has arguably the largest number of applications, but despite its commonness a conclusive model that can capture its unique thermophysical property profiles remains as the "holy grail" of modern applied thermodynamics. Specifically, traditional equations of state fail to account for water's anomalous properties, such as its maximum density or minimum heat capacity as a function of temperature.

There is consensus among the modeling community that the primary factor for water's peculiar property profiles is its strong intermolecular interactions with an intense orientational character, commonly referred to as hydrogen bonding [1]. Most advanced models incorporate special terms that involve a key structural parameter: the number of molecules that do not participate in hydrogen bonds as donors, known as the free hydroxyl fractions. A traditional and highly accessible tool for the analysis of hydrogen bonding at the molecular level is infrared spectroscopy, a common technique that studies the transitions between molecular vibrational states. Hydrogen bonding induces changes in the vibrational patterns of hydroxyl groups, generating complex spectra that encode orientational information using vibrations as a proxy.

From spectra to free hydroxyl fractions

The analysis of temperature-varied vibrational spectra for the estimation of the degree of hydrogen bonding has been the subject of multiple works over the past 80 years. Among them, one empirical approach has survived the test of time, having been greatly utilized by the thermodynamics community. The works of Werner Luck have provided free hydroxyl fraction data for a wide temperature range for methanol, ethanol and water [2]. While these important data have found use in the calibration of the association terms of equations of state, they have surprisingly not been replicated or consolidated in later studies.

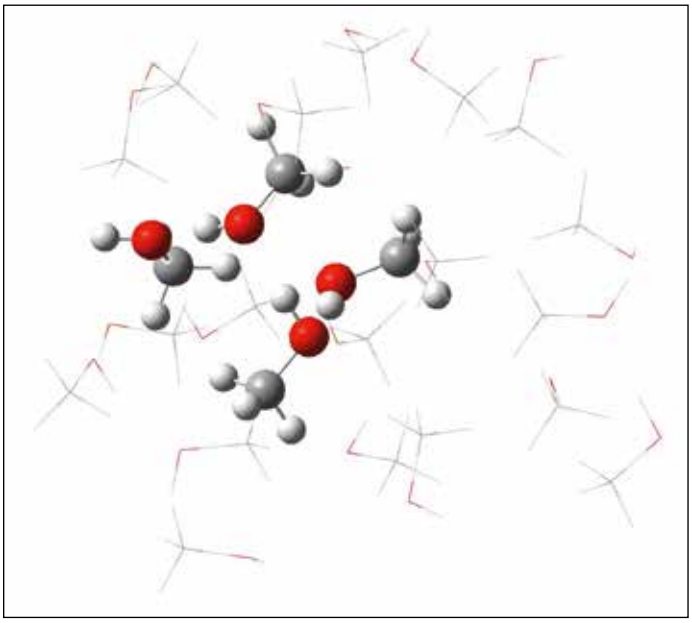


Figure 1. Linear tetramolecular cluster of methanol inside an explicit solvent cavity.

Contemporary computational means enable the investigation of the free hydroxyl group fraction problem, challenging the previous attempts. Taking methanol as a base case, quantum mechanical techniques are used for the geometry optimization of several methanol clusters. The vibrational properties of the hydroxyl stretching modes are determined with the local vibrational mode methodology [3], a highly customizable approach that relies on first principles and allows for the efficient calculation of spectroscopic peak positions and intensities.

A consideration commonly encountered during the appli-

Deuteration

The substitution of methanol's methyl hydrogen atoms with deuterium leads to a shift to the peaks related to methyl-related vibrational transitions, simplifying the statistical treatment of the spectra specifically for the treatment of the hydroxyl bands.

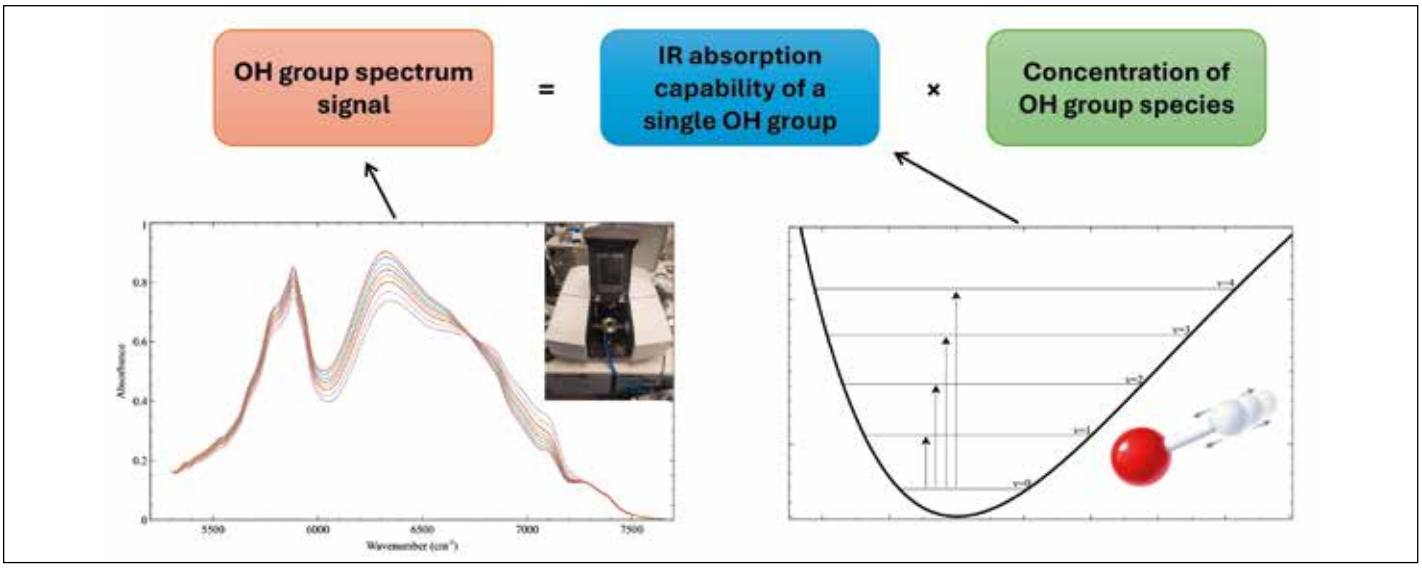


Figure 2. Schematic of the quantitation procedure.

cation of quantum calculations is their default conduction at "vacuum" conditions. For increased tangibility to the liquid phase, this issue is amended with the application of solvation models, with the latest trends favoring the use of several "layers" of explicit molecules that are analyzed with lower levels of theory, such as semiempirical methods or molecular dynamics. An example of a chain-like cluster surrounded by explicit solvent molecules is shown in figure 1. Hence, balancing robustness and complexity is the key for efficient calculations on large systems with meaningful relevance to condensed states.

To simplify the complex near-infrared spectrum of methanol, measurements are conducted on its deuterated variants. The statistical analysis of the measured bands allows for the isolation of the free hydroxyl stretching band and the observation of its intensity change with respect to temperature. Combined with the theoretical intensity predictions, quantitation can be achieved. The basic principle behind this is illustrated in figure 2.

The new results (shown in figure 3) reveal a large disagreement with older empirical techniques [4].

The free hydroxyl fractions are found to be an order of magnitude lower than previously believed. This indicates that the overwhelming majority of hydrogen bond sites are actively participating in intermolecular interactions. This behavior persists even for temperatures approaching the normal boiling point of methanol, hinting at the strength of the hydrogen bond network that dominates the condensed phases of methanol.

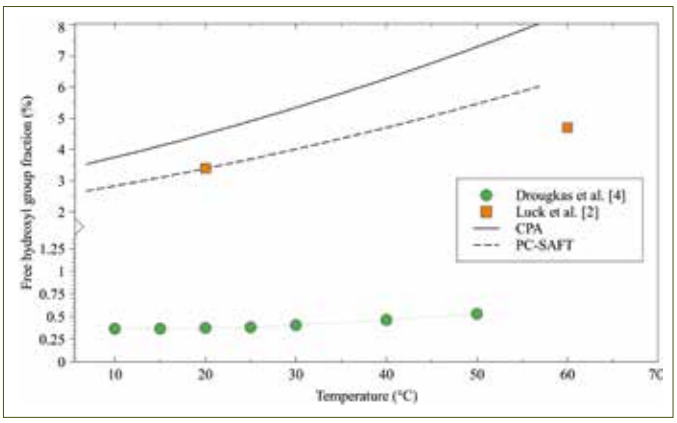


Figure 3. Free hydroxyl group fraction of pure liquid methanol as a function of temperature. Adapted from Ref. [4]. Copyright 2025 American Chemical Society.

While these initial results defy the picture painted by the milestone studies of the previous century, further investigation is conducted at the moment to ascertain the conclusions about the structural intricacies of liquid methanol.

Ongoing studies on solvation modeling and the inclusion of important intermolecular vibrational modes are bound to offer credibility on the implementation of the elaborate local mode methodology. Furthermore, collection of data on more regions of methanol's spectrum is imminent, as well as the study of more relative compounds such as other light alcohols, paving the way for the rejuvenation of the hydrogen bond thermodynamic modeling framework and closing the distance towards a resolution of bulk water/aqueous electrolyte systems.

Acknowledgements

The authors would like to thank the European Research Council (ERC) for funding this work under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program (Grant Agreement No. 832460), ERC Advanced Grant project "New Paradigm in Electrolyte Thermodynamics". The authors wish also to thank the Novo Nordisk Foundation (Grant No. NNF22OC0080193) for partial funding of this research. Evangelos Drougkas and Xiaodong Liang are co-funded by the European Union (ERC, REMOTE, 101171135).

E-mail:
Evangelos Drougkas: evadr@kt.dtu.dk
Georgios M. Kontogeorgis: gk@kt.dtu.dk
Xiaodong Liang: xlia@kt.dtu.dk
Henrik G. Kjaergaard: hgk@chem.ku.dk

References

1. E. Arunan *et al.*, "Definition of the hydrogen bond (IUPAC Recommendations 2011)," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 83, no. 8, pp. 1637-1641, Jul. 2011, doi: 10.1351/PAC-REC-10-01-02.
2. W.A.P. Luck, "A Model of Hydrogen-Bonded Liquids," *Angewandte Chemie International Edition in English*, vol. 19, no. 1, pp. 28-41, 1980, doi: 10.1002/ANIE.198000281.
3. E. Vogt, A.S. Hansen, and H.G. Kjaergaard, "Local Modes of Vibration: The Effect of Low-Frequency Vibrations," in *Molecular Spectroscopy*, vol. 2, Y. Ozaki, M.J. Wójcik, and J. Popp, Eds., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2019, ch. 14, pp. 389-424. doi: 10.1002/9783527814596.ch14.
4. E. Drougkas *et al.*, "Application of the Local Vibrational Mode Framework for the Spectroscopic Estimation of Free Hydroxyl Group Fractions in Pure Liquid Methanol-d3," *J Phys Chem B*, pp. 129-10824, Oct. 2025, doi: 10.1021/ACS.JPCB.5C03059.

CleanCloud målekampagne i Nordøstgrønland

CleanCloud er et EU-finansieret forskningsprojekt, hvor der blandt andet er udført to målekampagner på Villum Research Station (VRS) på Station Nord i Nordgrønland, med det formål at undersøge, hvordan partikler og skyer interagerer.

Af Henrik Skov, Lu Zhang, Andreas Massling, Lise Lotte Sørensen og Ulas Im, Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet

Den Europæiske Union (EU) har som mål at være klimaneutral inden 2050. Dette mål er kernen i Den Europæiske Grønne Pagt *(English: European Green Deal; EGD)* og er i overensstemmelse med EU's forpligtelse til global klimaindsats under Parisaftalen. Vores evne til at forudsige, i hvilket omfang Parisaftalen vil kunne begrænse den globale opvarmning, hæmmes af store usikkerheder forbundet med vores nuværende forståelse af Jordens system og dets reaktion på vores handlinger. Ifølge FN's Klimapanel (IPCC)'s sjette vurderingsrapport (AR6) repræsenterer samspillet mellem aerosoler og skyer stadig den største usikkerhed i den fortidige, nuværende og fremtidige strålingspåvirkning og hæmmer dermed troværdigheden af klimafremskrivninger [1].

Derfor er forbedret viden om aerosol-sky-interaktioner *(English: Aerosol Cloud Interaction (ACI))* nu mere afgørende end nogensinde for at reducere usikkerheder i kort- og langsigtede klimafremskrivninger og for at kunne planlægge afbødnings- og tilpasningsstrategier for en klimaneutral fremtid.

Her gruppen, der var afsted i marts-april 2024, fra Tropos i Leipzig-Tyskland, EPFL i Schweiz, National Center for Scientific Research, Demokritos-Grækenland og så Aarhus Universitet, Danmark.

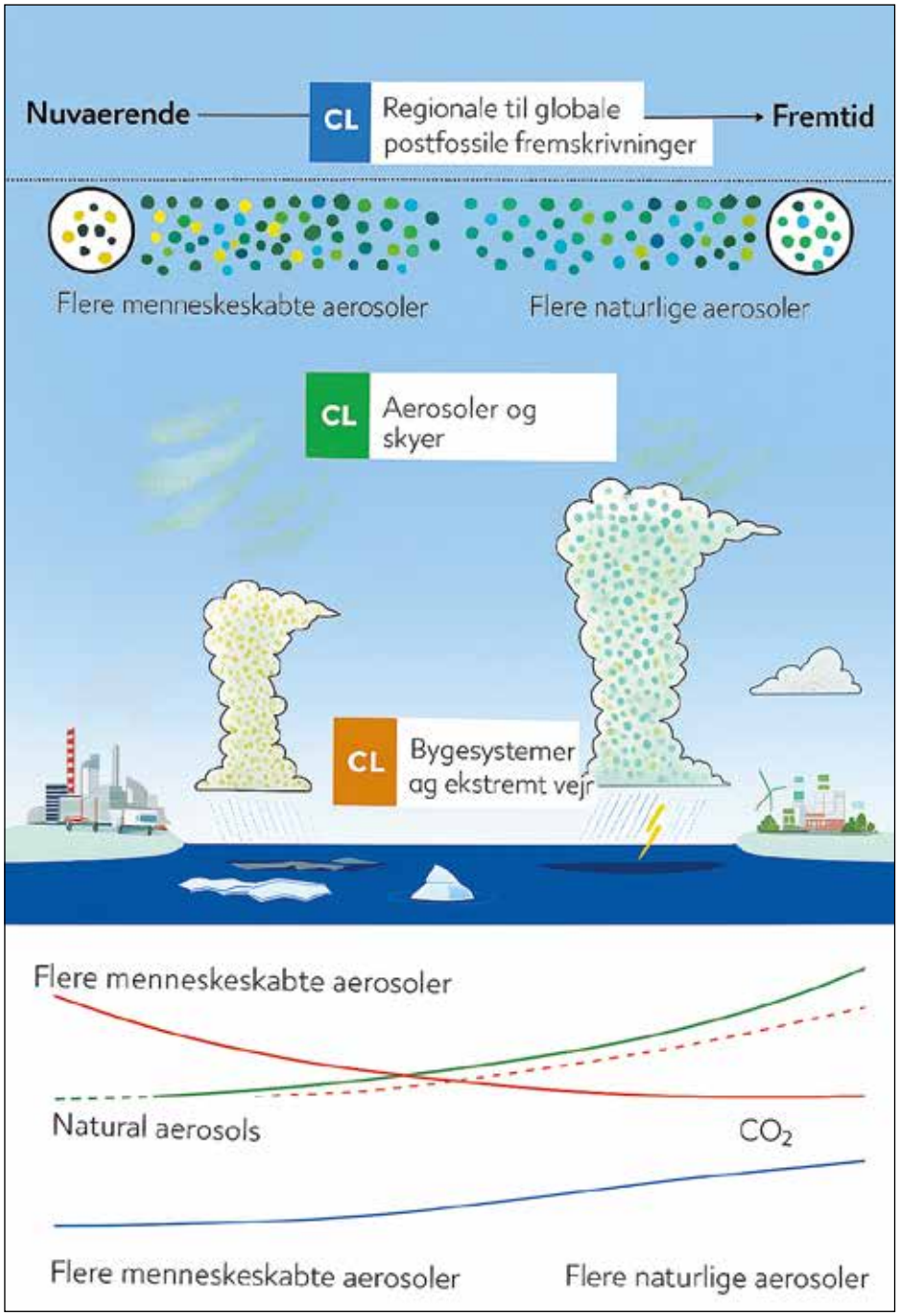
Det post-fossile regime

Kernen i CleanCloud er erkendelsen af, at der ikke vil være nogen tilbagevenden til den præindustrielle tilstand – på trods af de fortsatte reduktioner af menneskeskabte forurenende stoffer i atmosfæren – på grund af klima feedbacks og ændringer i arealanvendelse, og at vi er på vej ind i et nyt aerosolregime, som vi kalder post-fossilt, samt at vi lever i en verden med øget temperatur som følge af en stigning af CO_2 fra før industriel tid på 280-288 ppm (parts per million) til i dag på over 420 ppm.

Det post-fossile regime er kendetegnet ved kraftige reduktioner i forbrændingen af fossile brændsler og en relativt større rolle for naturlige aerosoler (figur 1), som også har en klimaforandringsdrevet komponent i deres kilder og fordeling sammenlignet med menneskeskabte aerosoler. I denne tilstand forventer vi renere skyer end i dag, med konsekvenser for nedbør – herunder tordenvejr og ekstreme nedbørshændelser – samt for klimaforandringernes påvirkning og konsekvenser.

CleanCloud-samarbejdet

Det overordnede mål med CleanCloud



Figur 1. Konceptuel figur af udviklingen fra nuværende situation til en fremtid med mindre emission fra fossil afbrænding. (CL refererer til de tre grupper (Clustre), der er i projektet). Kurverne i bunden illustrerer den relative koncentration af menneskeskabte og naturlige aerosoler, og hvordan CO_2 udvikler sig.

er at forbedre vores viden om ACI-relaterede aerosol- og skyegenskaber og -processer, deres regionale og tidsmæssige forskelle, hvordan de vil udvikle sig under overgangen til det post-fossile regime, og derved forbedre deres repræsentation i klimamodeller, kvantificere deres påvirkning på vejr og klima – og dermed på samfundene.

CleanCloud består af 20 europæiske partnere fra forskellige forskningsinstitutioner og universiteter. Projektet er multidisciplinært og involverer in situ-målinger, laboratoriestudier, satellitmålinger og modellering.

Som en af de første aktiviteter gennemførte vi i marts og april samt i august 2024 målekampagner på Villum Research Station. Vi forøgede vores egne målinger og desuden blev den vertikale variation af aerosoler i atmosfæren studeret med landbaseret remote-sensorer samt med en Helikite, figur 2.

Vi arbejder i øjeblikket på tolkning af data samt skrivning af videnskabelige artikler og vi forventer at præsentere disse resultater i en serie af artikler i 2026 her i bladet.

E-mail:
Henrik Skov: hsk@envs.au.dk

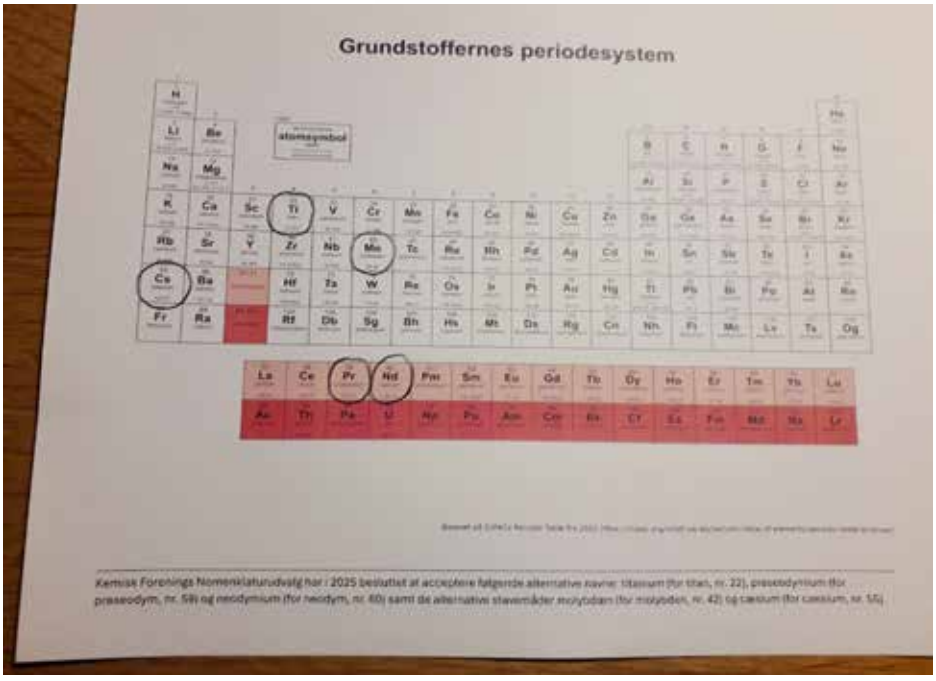
Referencer
1. IPCC IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

Figur 2. Til venstre ses skyradar og telt med en polariseret sky LIDAR, der tilsammen måler skyhøjde, -densitet og udstrækning samt fordelingen af vand- og ispartikler i skyen. Til højre (foto: Lionel Favre, EPFL i Schweiz) ses helikite udstyret med meteorologimåleudstyr samt instrumenter til at måle aerosolparametre (absorption og spredning af lys samt antallet af aerosoler).

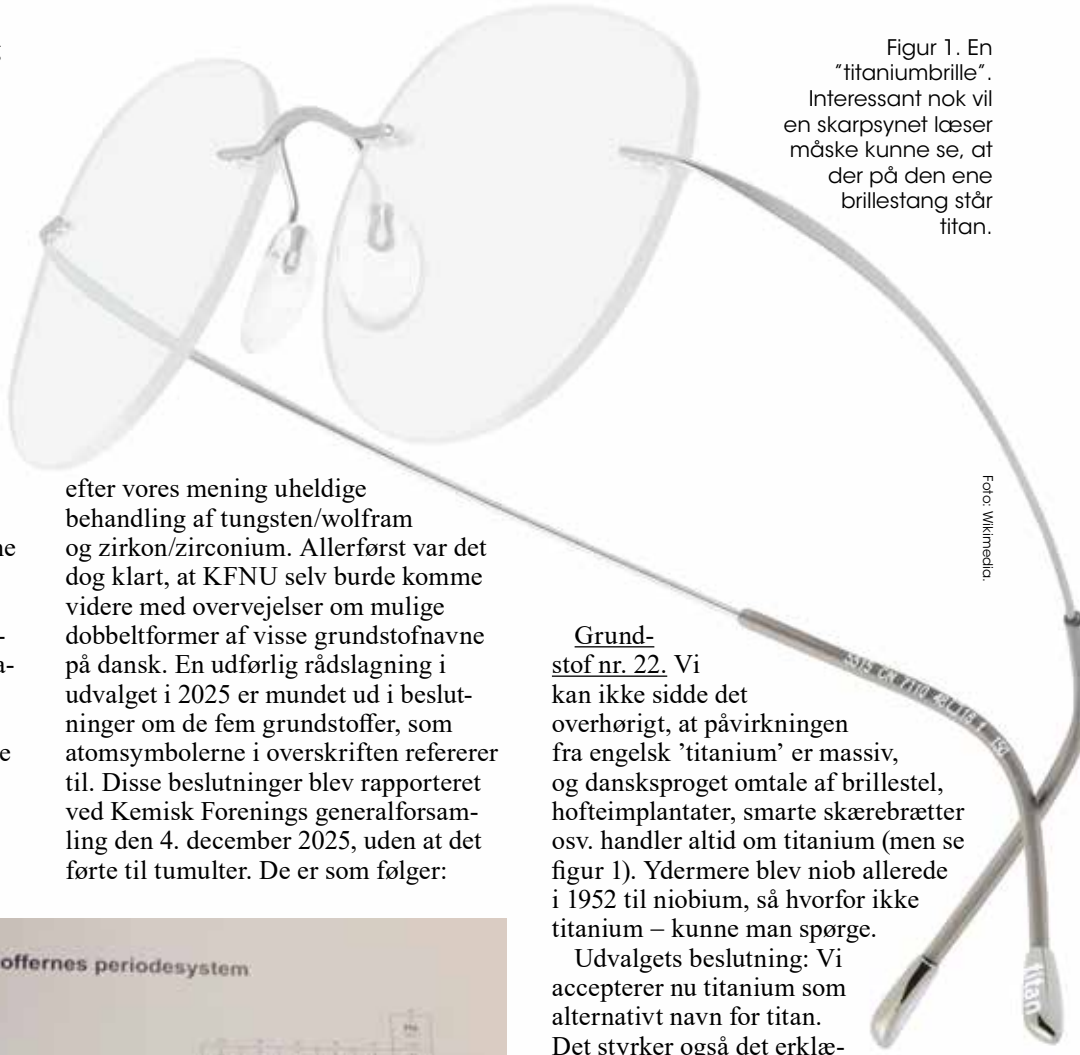
Ti, Mo, Cs, Pr, Nd – hvad har disse fem til fælles?

Kemisk Forenings Nomenklaturudvalg (KFNU) i dets nuværende inkarnation daterer sig fra 1940. Udvalgets første større bedrift var i 1952 at nedkomme med en omfattende betænkning om dansk kemisk nomenklatur [1], hvori blandt andet anbefaledes navne for grundstofferne op til og med californium, som ikke er blevet anfægtet med en tilsvarende pondus i kemikersamfundet siden da. Der har dog af og til været debat om nogle af dem, såvel i foreningen og her i bladet og i dagspressen som i udvekslinger med Dansk Sprognævn. Men KFNU har holdt fast ved disse navne og stavemåder frem til i år og har i øvrigt tilføjet anbefalinger af navne for grundstofferne fra einsteinium til oganesson [2].

Det nye er, at vi er i god dialog med Sprognævnet og forventer, at samarbejdet kan munde ud i etableringen af databasen COR.KEMI som et alternativ til Retskrivningsordbogen (RO), hvad angår kemiske navne [3]. I den forbindelse har KFNU yderligere et langsigtet håb om at påvirke RO både til at medtage flere stavemåder og krydshenvisninger mellem sådanne og til at få ordnet den efter vores mening uheldige behandling af tungsten/wolfram og zirkon/zirconium. Allerførst var det dog klart, at KFNU selv burde komme videre med overvejelser om mulige dobbeltformer af visse grundstofnavne på dansk. En udførlig rådslagning i udvalget i 2025 er mundet ud i beslutninger om de fem grundstoffer, som atomsymbolerne i overskriften refererer til. Disse beslutninger blev rapporteret ved Kemisk Forenings generalforsamling den 4. december 2025, uden at det førte til tumulter. De er som følger:



Figur 2. Periodesystemet fra hjemmesiden *Dansk Kemisk Nomenklatur* med de hidtil brugte danske grundstofnavne og ringe om de fem, der nu har fået selskab af alternativer som forklaret i fodnoten.



Figur 1. En "titaniumbrille". Interessant nok vil en skarpsynet læser måske kunne se, at der på den ene brillestang står titan.

Foto: Wikimedia.

Grundstof nr. 22. Vi kan ikke sidde det overhørigt, at påvirkningen fra engelsk 'titanium' er massiv, og dansksproget omtale af brillestel, hofteimplantater, smarte skærebrætter osv. handler altid om titanium (men se figur 1). Ydermere blev niob allerede i 1952 til niobium, så hvorfor ikke titanium – kunne man spørge.

Udvalgets beslutning: Vi accepterer nu titanium som alternativt navn for titan. Det styrker også det erklærede mål om at lægge os så tæt op ad internationale kemiske navne som muligt. Men titan er altså stadig også acceptabelt.

RO 2024 medtager både titan og titanium med forklaringen *'et grundstof'*, desværre uden krydshenvisning mellem dem. Har i øvrigt også opslagsordet 'titaniumbriller'.

Kommentar: Hvorfor ikke chromium, selenium og tellurium som alternativer? Læsere, hvad mener I? Udvalget tog ikke dette skridt i denne omgang.

Grundstofferne nr. 42 og 55. Stavemåderne molybden og caesium fra 1952-betænkningen undgik at bruge det danske bogstav 'æ'. De har rimeligvis vakt både forundring og mishag, og da KNFU ikke har tænkt at opgive sølv og kviksølv trods det danske 'ø', er det

konsekvent også at tillade 'æ'-alternativerne, så det gør vi nu.

RO har molybdæn og cæsium, igen med forklaringen *'et grundstof'*, men hverken molybden eller caesium.

Kommentar: IUPAC havde tidligere en fodnote i deres periodesystem om, at 'cesium' var en 'commonly used alternative spelling' (af hensyn til amerikanerne). Denne fodnote er senere fjernet.

Grundstofferne nr. 59 og 60. Med den stigende interesse for de sjældne jordarter er pressen begyndt at skrive om de deri indeholdte grundstoffer. Lige netop praseodym og neodym havde ikke endelsen 'ium' i 1952-betænkningen. Undertegnede nåede inden vores diskussion i KFNU også at få *Politiken* til at rette avisens brug af 'praseodymium' og 'neodymium' (og af 'tantalum', men det er jo en anden historie). Men nu er vi altså endt ved, at disse former bør accepteres som alternativer.

RO har hverken praseodym eller neodym eller 'ium'-formerne.

De fem nu tilladte alternativer er alle tilføjet i vores database over kemiske navne mv. på kemisknomenklatur.dk, og via den månedlige opdatering er de nu også med i ordbogen.com's version af *Kemisk Ordbog*. En fodnote om de fem er tilføjet til periodesystemet på kemisknomenklatur.dk (jf. figur 2).

Vi har ikke indført alternativerne i alle poster i databasen med sammensatte navne, altså for eksempel har vi ikke tilføjet 'titaniumdioxid' eller 'cæsiumchlorid'; men nu må I gerne bruge dem!

TD, Nomenklaturudvalget

Referencer/noter

1. Betænkning fra det af Kemisk Forening den 12. november 1940 nedsatte nomenclaturudvalg. Udgivet af Kemisk Forening som særtryk af *KEMISK Maanedsblad og Nordisk Handelsblad for kemisk Industri* nr. 7-8/1952. Betænkningen blev senere inkluderet i publikationen *Dansk Kemisk Nomenclatur* [Kemisk Forening 1978; denne publikation er tilgængelig på KFNU's hjemmeside *Dansk Kemisk Nomenklatur*, https://kemisknomenklatur.dk/dkn1978.pdf].
2. Transuranerne til og med livermorium har internationale navne, der ender på 'ium' og direkte kunne overtages på dansk. KFNU har også anbefalet 'oganesson', mens vi for nr. 117 ved – efter nøje overvejelse – at anbefale 'tennessin' fraveg 1952-betænkningens tankegang om helt at fjerne endelsen 'ine' fra de engelske navne i gruppe 17. Betænkningens formaning om, at 'ilt, brint, kulstof og kvælstof efterhånden bør trænges tilbage og erstattes med oxygen, hydrogen, carbon og nitrogen' må vist siges stadig at have vanskelige vilkår. Endelig bemærkes, at atomsymbolet for argon siden 1952 igen er blevet til Ar – og ingen betegner vist i dag grundstofferne fra helium til radon som 'inaktive gasser'!
3. T. Damhus, P.J. Henrichsen: Nybrud i kemisk retskrivning, *Dansk Kemi* **106** nr. 1 (2025) 22-24.

SKRIV TIL DANSK KEMI

Stofområder

Vi er interesserede i spændende artikler inden for alle områder af kemi.

Vi formidler viden om for eksempel:

- Materialekemi
- Analytisk kemi
- Kemiteknik
- Bioteknologi
- Fødevarekemi
- Klima og miljø
- Fundamental kemi

Din viden er vigtig - del den!

Dansk Kemi er til for at oplyse og begejstre om alle emner inden for kemi.

Det trykte magasin kommer ud på alle landets biblioteker og bliver sendt til 3600 abonnenter.

Indholdet bliver flittigt brugt på ungdomsuddannelser, bliver læst af industrien og udbreder viden om kemi bredt til samfundet.

Dansk Kemi er medlemsblad for Kemisk Forening og Kemiingeniørgruppen.

Dansk Kemi har eksisteret i mere end 100 år.

Kontakt redaktør Katja Salomon Johansen på katja@techmedia.dk

Vi GLÆDER os til DIT bidrag

Max. 8000 anslag inkl. mellemrum i Word.
Brug overskrifter og underoverskrifter.
Medsend illustrationer og billeder i 300 dpi.
Brug gerne faktabokse.
Husk billedtekster og fotokreditering.
Husk også e-mail-adresse til forfatter.

Forskningsprojekt skal gøre produktionen af grøn brint PFAS-fri

I samarbejde med seks europæiske partnere vil forskere fra SDU's Institut for Grøn Teknologi udvikle en ny elektrolyseteknologi, der kan producere grøn brint billigere og uden brug af de fluorstoffer, som i dag bruges i anlæggene.

Grøn brint er en nødvendighed, hvis den grønne omstilling skal lykkes. Brændstoffet skal bruges i den tunge industri, i transportsektoren og som energikilde på de dage, hvor solen ikke skinner, og vindmøllerne står stille.

Problemet lige nu er bare, at grøn brint – altså brint lavet af grøn strøm – skal laves ved hjælp af elektrolyse. Og som det er nu, er den proces ressourcetung og derfor meget dyr sammenlignet med brint lavet af fossile brændsler.

Derudover er produktionen ofte afhængig af de miljø- og sundhedsfarlige fluorstoffer, også kendt som PFAS, som man i EU gerne vil udfase og måske endda helt forbyde.

Alt det skal et stort nyt europæisk forskningsprojekt ved navn SUPREME, ledet af Syddansk Universitet, gøre noget ved.

Sammen med seks partnere fra hele Europa, heriblandt både private virksomheder og andre forskningsinstitutioner, vil forskere fra Institut for Grøn Teknologi på SDU i løbet af de næste tre år udvikle en ny elektrolyseteknologi, der er renere og billigere.

- Ambitionen er at vise, at grøn brint både kan produceres konkurrencedygtigt, bæredygtigt og uden de problematiske stoffer, som teknologien er afhængig af i dag. Vi vil udvikle en ny type elektrolyse, der er klar til at blive taget videre mod industriel brug og kan spille en reel rolle i den grønne omstilling, siger Shuang Ma Andersen, professor på Det Tekniske Fakultet på SDU og projektleder.

Helt konkret er målet, at den nye teknologi på sigt vil kunne producere 1 kilo grøn brint for 2 euro, hvilket nogenlunde svarer til niveauet for den fossile brint i dag. Hvis det lykkes, vil det ifølge forskernes beregninger kunne give en CO_2-besparelse på 2 millioner tons allerede i 2030.

Foto: Mads Eneqvist, Unsplash.

Europæisk samarbejde

Projektet tager udgangspunkt i den såkaldte PEM-elektrolyse, der står for proton exchange membrane. Det er i dag den mest udbredte teknologi til at producere grøn brint.

Teknologien er effektiv og velegnet til at arbejde sammen med sol- og vindenergi, men den er også afhængig af meget sjældne og dyre platinmetaller og af membraner med PFAS. Det gør anlæggene dyre, sårbare over for råstofmangel og potentielt problematiske i forhold til miljø og sundhed.

I projektet bliver det tyrkiske teknologiske forskningsråd TÜBITAK ansvarlig for at udvikle en PFAS-fri membran, mens universitet TU Graz i Østrig vil afdække projektets kommercielle muligheder.

Forskerne på SDU står for, sammen med den britiske metal- og katalysatorvirksomhed Ames Goldsmith, at reducere forbruget af det sjældne platinmetal iridium med op til 75 procent og samtidig udvikle processer, der gør det muligt at genbruge omkring 90 procent af de dyrebare metaller.

Endelig vil det tyske forskningsinstitut Fraunhofer stå for den faktiske fremstilling af den nye elektrolyse, mens det norske brintselskab Eonee vil evaluere komponenten ved at integrere den i et nyt elektrolysedesign.

Forskningsprojektet er en del af EU's Clean Energy Transition Partnership.

Kilde: Pressemeddelelse

Projektet kort

SUPREME er et treårigt europæisk forskningsprojekt ledet af Syddansk Universitet. Projektet skal udvikle en ny type PEM-elektrolyseteknologi, der kan producere grøn brint billigere, mere effektivt og uden brug af fluorstoffer (PFAS).

Ambitionen er at reducere afhængigheden af sjældne og dyre platinmetaller, øge genbrug af kritiske råstoffer og bringe teknologien tættere på industriel anvendelse med henblik på at gøre grøn brint konkurrencedygtig omkring 2030.

Projektet gennemføres i samarbejde med TÜBİTAK (Tyrkiet), TU Graz (Østrig), Ames Goldsmith/Ceimig (Storbritannien), Fraunhofer (Tyskland) og Eonee (Norge) og er en del af EU's Clean Energy Transition Partnership.

ISO 13391 og ISO 25078 – beregning af skovens klimaeffekter

En ny international ISO-standard for beregning af skovens klimaeffekter giver emnet fornyet aktualitet.

Af Frans W. Langkilde[1], Esben Møller Madsen[2], Erik Arvin[3], Søren Brøgger Christensen[4], Gustav von Rosen[5] og Sten Scheibye[6]

[1] Katrinedal I/S, 4780 Stege
[2] Trenkærvang 12, 3460 Birkerød
[3] Vasevej 62A, 2460 Birkerød
[4] Åtoften 187, 2990 Nivå
[5] Rudbjerggaard, 4983 Dannemare
[6] Bøged Skov, 4720 Præstø

Foto: Freepik.com.

Vi har tidligere publiceret tre artikler i Dansk Kemi om klimaeffekter af landbrug [1], skovbrug [2] og biobrændsler [3], samt en artikel om beregningsmetoder for klimaeffekterne [4]. I 2025 udkom en ny og opsigtsvækkende international standard, ISO 13391 [5] for beregning af skovens klimaeffekter, som giver emnet fornyet aktualitet. De beregningsmetoder for klimaeffekter af skov, som foreslås i [4], bekræftes af ISO 13391. ISO-abstractet lyder (bemærk punkt 4):

This document specifies how to calculate the greenhouse gas dynamics of a set of wood and wood-based products on the organizational or aggregated level (the area of study). It includes the greenhouse gas emissions, greenhouse gas removals, or carbon pools related to:

1. *one or multiple forest management unit(s).*
2. *harvested wood product(s).*
3. *value chain(s).*
4. *potential displacement of greenhouse gas emissions from alternative products replaced by wood-based products.*

ISO 13391 suppleres og uddybes med ISO 25078 [6].

Skov og klima

Grøn Treparts (GT) ønsker om sammenhængende naturområder, behov for arealer til skovrejsning og grundvands-

beskyttelse, en fortsat landbrugsproduktion etc. kræver arealer større end Danmarks areal. Arealerne må derfor udnyttes multifunktionelt. GT handlede først om klima og CO_2. Disse mål blev senere nedtonet til fordel for vandmiljø, og senest for biodiversitet. Hvis både klima og miljø skal tilgodeses, må produktion af træ og fremme af biodiversitet kombineres.

To professorer udtaler, at "biodiversitetskrisen er en større trussel end klimaforandringer" (Carsten Rahbek, Uniavisen, 12. april 2023), og at "stod det til ham, lod vi Sverige, Norge og Finland om at producere træ til byggere med mere, og så dedikerede vi pladsen i Danmark … til natur" (Hans Henrik Bruun, Klimamonitor, 8. april 2025). Et snævert nationalt perspektiv i et land præget af frugtbart lavland.

Den globale temperatur stiger støt, og den globale klimakrise bliver stadig mere alvorlig. Der er også problemer for biodiversitet, men disse skal ikke løses på bekostning af klimaløsninger. Slet ikke, da de til dels er drevet af klimaforandringer.

Der er udbredt enighed om at afvikle brugen af fossil energi, men der er lang vej, fordi den fossile energi dækker 53 procent af Danmarks energiforbrug. Vedvarende energi (VE) fra sol og vind dækker 13 procent, biomasse inkl. biogas 29 procent og andet 5 procent (Energistatistik 2024, Energistyrelsen, 2025).

Danmarks satsning på VE møder problemer. Elforbruget fra blandt andet bitcoin, kunstig intelligens og datacentre stiger voldsomt. Elpriserne viser, at produktion af el fra havvind og solceller kræver store mængder af backup, når det ikke blæser, og solen ikke skinner (*Dunkelflaute*), især om vinteren. Hvis elforbruget stiger kraftigt, og mængden af el fra VE ikke kan følge med, bliver konsekvensen store prisudsving og forringet forsyningssikkerhed. Kernekraft og biomasse (inkl. biogas) er de eneste fossilfri energikilder i Danmark til backup og rummer samtidig løsninger på de store lagringsproblemer for el fra VE.

Det er nødvendigt at bruge alle redskaber til at løse klimakrisen. Der tales meget om skovens rolle for klimaet, men tydeligvis har mange ikke forstået den eller negligerer den. I det følgende fokuseres på den rolle, som skoven kan have for atmosfærens koncentration af CO_2 og dermed den globale temperatur.

Nærværende artikel er baseret på [1-6] og uddyber den beskrivelse af skovens klimaeffekter, som fremgår af ISO 13391 og ISO 25078. Hvor ISO 13391 opstiller rammerne for beregning af skovenes klimaeffekter, findes beregningseksempler i ISO 25078. ISO-standarderne lægger vægt på substitution af fossile brændsler både via træprodukter og via brug af resttræ som brændsel. Denne artikel lægger vægt på de samme to elementer, men er mere udførlig, ikke mindst hvad angår brug af resttræ som brændsel. Det er også et formål med artiklen at skabe opmærksomhed om fremkomsten af ISO-standarderne.

I diskussionen om produktionsskov versus urørt skov er biodiversitet et vigtigt element, som ikke berøres i ISO-standarderne. Sidst i denne artikel diskuteres, hvordan biodiversitet kan tilgodeses ved omdannelse af produktionsskov til mosaikskov.

Fotosyntesen og beregning af klimaeffekter

Vi begynder fra grunden med reaktionsligningerne (1) og (2).

(1) $6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$
endotherm, drevet af solenergi

(2) $C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O$
exotherm

I fotosyntesen omdanner planters grønkorn CO_2 til sukkerarter under frigivelse af ilt O_2, ligning (1). Denne reaktion følges af omdannelse til planternes indholdsstoffer som cellulose, protein og lignin. Ved forrådnelse, forbrænding, eller fortæring af fødevarer, frigøres al CO_2, se den omvendte ligning (2). Disse to reaktionsligninger er grundlæggende overalt i naturen og er grundlaget for liv. De viser også, at afbrænding af biologisk materiale ikke øger atmosfærens indhold af CO_2, idet der kun udledes den mængde CO_2, som planterne tidligere har optaget fra atmosfæren, med en tidsforskydning, som er lille i relation til klimaet.

Binding og udledning af C og CO_2 i skov

I [2] beskrives, hvor mange ton CO_2 som bindes i skov per hektar per år, baseret på skovstatistik [7]. Størrelsen af bindingen hænger sammen med træernes art og alder. For løvtræer er bindingen størst for 20-40 års alder, for nåletræer 10-40 år. Bindingen er større for nåletræer end for løvtræer. At bindingen i gammel urørt skov er minimal, skyldes blandt andet aldersfordelingen i urørt skov med mange gamle træer. Urørt skov vil dog binde CO_2 i de første 50 år, hvor den vokser op. Veteranisering (bevidst ødelæggelse af sunde træer) i danske statsskove er enestående, hvad angår CO_2-skade på klimaet.

Alt det C og CO_2 og al den solenergi, som bindes ved fotosyntese i træer, udledes igen på tre måder:

1. Ved forrådnelse og anden biologisk nedbrydning.
2. Ved skovbrande.
3. Ved kontrolleret afbrænding af træ i et varmeværk.

1 og 2 forhindrer udnyttelse af træmasse til fremstilling af grøn energi (3), jf. punkt 4 i ISO-abstract.

Forrådnelse: Alt træ rådner, hvis det ikke forarbejdes eller brændes. Urørt skov og produktionsskov optager i begyndelsen lige meget CO_2. Men i den urørte skov bliver træerne ældre og dermed mindre effektive til CO_2-optag. Samtidig vokser udledningen fra forrådnelse af væltede træer og nedfaldne grene. Efter cirka 50 år bliver der ligevægt mellem optag og udledning. Derfor forsvinder klimaeffekten af urørt skov efter nogle år, **selvom** de gamle træer udgør et kulstoflager. Sekvestrering (binding af kulstof i jorden) finder sted både i urørt skov og produktionsskov, men aftager efter nogle år [8].

Skovbrande: Jo større trælager i skoven, jo større er skaden ved skovbrande. Urørt skov har et stort trælager i skoven. Skovbrande er sjældne i Danmark, men har katastrofale følger globalt. Ved naturbranden i Skagen i juli 2025 blev det også påpeget, at brandslukning er vanskeligere i "naturskove".

Kontrolleret afbrænding af træ i et varmeværk: Ved forrådnelse og skovbrande udledes der CO_2 til atmosfæren. Ved kontrolleret afbrænding af træ i et varmeværk udledes der også CO_2, men fossile brændsler som kul, olie og naturgas erstattes. Anvendes halm som **substitution** for fossile brændsler [3], erstatter 5 ton hvedehalm fra 1 hektar i 1 år 1,78 ton fuelolie og dermed 5,66 ton CO_2 af fossil oprindelse eller 1,54 ton naturgas og dermed 4,11 ton CO_2 af fossil oprindelse. 5 ton halm erstatter 2,74 ton stenkul og dermed undgås udledning af 10,0 ton CO_2 af fossil oprindelse. Halm benyttes som model i [3], da halm er lettere at regne på end træ, fordi halm har en lav og veldefineret vandprocent.

Denne **substitution** af fossile brændsler forvandler træ og halm fra at være klimaneutrale brændsler til brændsler, som gavner klimaet, jf. ISO punkt 4. I Danmark erstatter halm, træflis og brænde i dag enorme mængder af fossile brændsler, og dermed undgås udledning

af fossilt CO_2 [3]. Halm og træer optager CO_2 i sommerhalvåret, som igen udledes i vinterhalvåret ved afbrænding i et varmeværk, med uændret indhold af CO_2 i atmosfæren over et år. Når halm og træ erstatter fossile brændsler, bliver nettoeffekten en mindskning af udledningen af CO_2 til atmosfæren.

Pyrolyse af halm forårsager en øget udledning af CO_2 til atmosfæren [9], dels fordi **substitution** af fossilt brændstof ved brug af halm som biobrændsel bortfalder, dels fordi der bruges energi til pyrolyse af halmen.

Det er en udbredt misforståelse, at det tager op mod 100 år at erstatte et fældet træ, senest fremført af Klimabevægelsen i Danmark i Berlingske, 13. december 2025. Argumentet er forkert, fordi det er på niveau af det enkelte træ. På niveau af en hel skov eller mere erstattes i løbet af ét år den hugst, som fandt sted samme år (cirka 3 procent af vedmassen), hvis der foretages tilstrækkelig genplantning. Den samlede vedmasse i Danmark har været stigende i mange år. Der kan sammenlignes med en ager, som producerer biomaterialer i et evigt kredsløb.

Et modargument er, at hvis træet ikke afbrændes, forsinkes udledningen af CO_2, idet afbrænding er umiddelbar, mens forrådnelse tager år, og den forlængede tid, over hvilken CO_2 udledes, vil mindske effekten. Dette er igen et argument på niveau af det enkelte træ. For skoven som helhed kan der skelnes mellem flere scenarier, inklusive:

Scenario 1. I en produktionsskov, hvor trærester bruges til biobrændsel, er mængden af forrådnelse begrænset, og binding af CO_2 langt større end udledning af CO_2 ved forrådnelse. Afbrænding af biobrændsler medfører udledning af CO_2, som tidligere er optaget fra atmosfæren, men gennem **substitution** fører dette til mindre udledning af fossilt CO_2 fra energikilder (kul, olie, gas), som har befundet sig i jordskorpen i millioner af år.

Scenario 2. I en produktionsskov med vægt på opbygning og forøgelse af vedmassen vil den bundne CO_2 gå til tømmer og træprodukter og opbygning af vedmasse i skovens træer. Senere vil den opbyggede vedmasse i stigende omfang gå i forrådnelse, fulgt af stigende udledning af CO_2. Opbygning af vedmasse er derfor en kortvarig løsning.

Scenario 3. Hvis produktionsskov overgår til urørt skov, vil der indtræde en ligevægt mellem på den ene side binding af CO_2 og på den anden side udledning af CO_2 gennem forrådnelse. Bortset fra lidt sekvestrering har skoven stort set mistet sin klimaeffekt. En nyanlagt urørt skov kan have samme klimaeffekt som en nyanlagt produktionsskov de første år. Men efter omkring 50 år ophører klimaeffekten af den urørte skov, mens den fortsætter i århundreder i en produktionsskov, hvor der genplantes.

Scenario 2 anvendes i danske klimastatistikker (DCE, Aarhus Universitet), som følger regler for opgørelse fra IPCC. Ifølge IPCC udgøres den enkelte skovs klimanytte af træprodukter og nettotilvæksten i vedmasse over året [4]. Men dette tal udgør kun en brøkdel af skovens samlede klimanytte.

Anvendelse af træprodukter

Der er tre effekter for klimaet ved anvendelse af træ fra produktionsskov:

1. Ved anvendelse til byggeri udgør det anvendte træ et lager af C, CO_2 og energi.
2. En yderligere effekt opnås, når træet erstatter stål, beton/cement og tegl, som alle er klimaskadelige i kraft af en betydelig udledning af CO_2 under fremstillingen.
3. Kun en mindre del af skovens træ anvendes til gavntræ – tømmer, brædder etc. – og denne andel skal selvfølgelig maksimeres. Men langt størsteparten (grene, udtyndingstræ, savværksrest) kan udnyttes til opvarmning og erstatte fossile brændsler. Alternativet er, at dette træ rådner og alligevel afgiver sit CO_2, uden at brændværdien udnyttes.

Anvendelse af træ til byggeri: Træ anvendt til byggeri udgør et kulstoflager, der kan holde i århundreder som bygningstømmer, gulvbrædder etc.

Erstatning af stål og beton: Tømmer til byggeri med halveringstid 35 år [2,7] kan erstatte stål og beton, hvis produktion er stærkt energikrævende og CO_2-belastende. Brædder med halveringstid 25 år [2,7] kan erstatte beton eller tegl, hvis fremstilling også er energikrævende. Cement fremstilles ved opvarmning og spaltning af kalk. Ved spaltningen frigøres der CO_2, som genoptages, når cementen hærder, se reaktionsligninger (3) og (4). Opvarmningen sker med brændsler og udledning af CO_2.

(3) $CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$ endotherm

(4) $CaO+CO_2 \rightarrow CaCO_3$ exotherm

Erstatning af fossile brændsler: Cirka 60 procent af hugsten i danske skove, herunder træ fra udtynding, anvendes direkte til energitræ (for eksempel flis) og brænde. Af de cirka 40 procent, som bliver til gavntræ, bliver yderligere en del til savværksrest. Inkluderes savværksresten, skabes derfor for hvert ton gavntræ omkring 3 ton træ. Dette kan enten rådne, hvorved CO_2 alligevel vender tilbage til atmosfæren til ingen nytte. Eller det kan anvendes i et varmeværk og erstatte fossile brændsler og CO_2. Valget forekommer indlysende. Kontrolleret afbrænding og erstatning af fossile brændsler er den største kilde til skovens klimanytte.

Disse tal betyder fra et klimasynspunkt, at hvis Danmark importerer 1 ton gavntræ (cirka 80 procent af Danmarks forbrug importeres), giver det mening samtidig at importere 3 ton energitræ til backup for solceller og vindmøller. Vind- og solprojekter burde anvise backup-muligheder svarende til projektets størrelse.

Træart	Alder ung	Alder mellem	Alder gammel	Samlet areal
Løvtræ a og b	#1	#2	#3	20 ha
Løvtræ c og d	#4	#5	#6	20 ha
Nåletræ e og f	#7	#8	#9	20 ha
Nåletræ g og h	#10	#11	#12	20 ha
Lysåbne skovstykker, eng	#13			5 ha
Vådområder på egnede lokaliteter	#14			5 ha
Områder med dødt ved	#15			5 ha
Urørt skov	#16			5 ha

Tabel 1. Forslag til opdeling af mosaikskov på 100 hektar. #1 = skovpart nr. 1.

Eksisterende statsskov		Dyrket privat jord, planlagt til skov		Eksisterende privat skov		I alt	
Urørt skov	NNP	Urørt skov	Prod.skov	Urørt skov	Prod.skov	Urørt skov	Prod.skov
115	75	140	250	x	450-x	330+x	700-x

Tabel 2. Fordeling af dansk skov, planlagt i Grøn Trepart. 1000 hektar. *NNP: Naturnationalparker*

Biodiversitet i produktionsskov

Højere globale temperaturer er en del af truslen mod biodiversiteten. Ved at øge biodiversiteten i produktionsskov opretholdes skovproduktionens betydning for klimaet, samtidig med at biodiversiteten i skoven øges. I stedet for at omlægge store arealer til urørt skov, kan der bringes mere biodiversitet ind i produktionsskov. Det kan gøres på flere måder, for eksempel med såkaldt mosaikskov. Et forslag til opdeling af en mosaikskov på 100 hektar er vist i tabel 1, side 29.

En forudsætning for høj biodiversitet er, at skoven er varierende med hensyn til såvel arter som alder og desuden har en kontinuitet, så arternes livsmuligheder til stadighed opretholdes. I praksis kan det indebære, at skoven får en mosaikstruktur. Før de blev omlagt til urørt skov, havde skovene i Gribskov Kommune, domineret af Grib Skov og Tisvilde Hegn, et Naturkapitalindeks på 97 procent [10]. Det viser, at træproduktion og biodiversitet kan forenes.

Arealer i Danmark med forskellige typer af skov fremgår af tabel 2. Med de store arealer som tænkes konverteret til skov i Danmark er det vigtigt, at skovene indrettes hensigtsmæssigt til gavn for både klima og biodiversitet. Fonde er i færd med at opkøbe eksisterende privat skov for at omdanne den til urørt skov (indeholdt i x i tabel 2). Desuden skal offentlige støtteordninger medvirke til yderligere omdannelse af produktionsskov til urørt skov (x). I alt nærmer estimatet for urørt skov sig 40 procent af Danmarks skovareal. Denne udvikling gavner ikke Danmarks klimaindsats.

Konklusion

Produktionsskov gavner klimaet ved optag af CO_2, ved erstatning af byggematerialer, og ved erstatning af fossile brændsler (substitution), mens urørt skov kun gavner klimaet i den første vækstperiode. Biodiversiteten kan tilgodeses ved at omdanne produktionsskoven til mosaikskov.

Etablering af store arealer i Danmark med urørt skov er et klimaskadeligt eksperiment, baseret på manglende forståelse af grundlæggende naturvidenskab som udtrykt i reaktionsligningerne 1 og 2. Den offentlige debat, anført af NGO'er og grupper på universiteterne, er ensidig, og klimaeffekter er stort set fraværende i debatten. Skal Danmark være et foregangsland på klimaområdet eller et monument over gode hensigter, ideologi og lobbyisters indflydelse? ISO 13391 og ISO 25078 ligner den første nytænkning fra officielt hold siden IPCC i 1992.

E-mail:
[1] Frans W. Langkilde: franswlangkilde@outlook.dk
[3] Erik Arvin: erik@arvin.dk
[4] Søren Brøgger Christensen: soren.christensen1908@gmail.com

Referencer

1. Langkilde, F.W.; Christensen, S.B., Et nyt syn på landbrugets CO_2-bidrag. *Dansk Kemi* **2023,** 104 (1), 26-29.
2. Langkilde, F.W.; Christensen, S.B.; von Rosen, G.; Scheibye, S. Om skovbrugets klimapåvirkning. *Dansk Kemi* **2023**, *104* (6), 16-19.
3. Langkilde, F.W.; Christensen, S.B.; von Rosen, G.; Scheibye, S. Halm som brændselskilde. *Dansk Kemi* **2024**, *105* (2), 20-21.
4. Langkilde, F.W.; Christensen, S.B.; von Rosen, G.; Scheibye, S; Arvin, E. En kritisk gennemgang af EU's LULUCF klimaberegninger. *Dansk Kemi* **2024**, *105* (6), 6-10.
5. ISO 13391:2025. DS/ISO/TR 13391:2025. Wood and wood-based products – Greenhouse gas dynamics. Part 1-3. **2025**. Se især kap. 5.
6. ISO 25078:2025. DS/ISO/TR 25078:2025. Wood and wood-based products – Examples of calculating displacement potentials for wood-based products and considerations for further analyses. **2025**.
7. Johannsen, V.K.; Nord-Larsen, T.; Vesterdal, L.; Bentsen, N.S., *Kulstofbinding ved skovrejsning. Sagsnotat*. University of Copenhagen: 2019.
8. Kaetterer, T.; Bolinder, M.A.; Berglund, K.; Kirchmann, H., Strategies for carbon sequestration in agricultural soils in northern Europe. *Acta Agric. Scand., Sect. A* **2012,** 62 (4), 181-198.
9. Langkilde, F.W.; Arvin, E.; Christensen, S.B. Pyrolyse og Biokul mindsker ikke landbrugets klimaftryk. Altinget, 8. april 2024.
10. Kommunernes Naturkapitalindeks. https://biodiversitet.nu/naturkapital.

HUSK

Dansk Kemi kan også læses online

Få besked hver gang en ny udgave er tilgængelig.

Tilmeld dig og læs bladet på TechMedia.dk

Nyttig viden fra TechMedia

Nobelprisvinderne vækkes til live i ny podcastserie

Naturvidenskabens største helte flytter ind i lytterens verden i en fortælling om den moderne videnskabshistorie gennem 125 år.

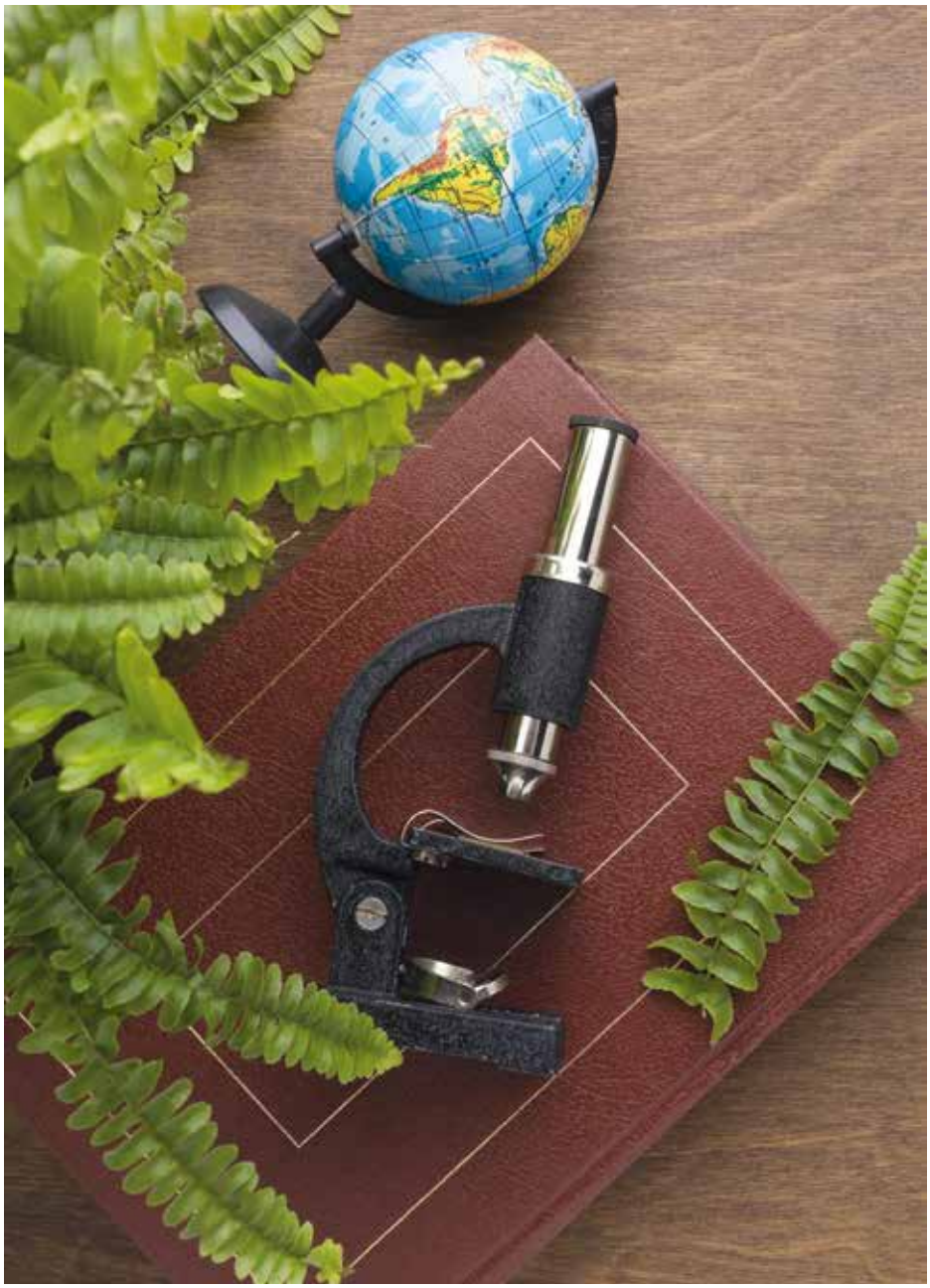


Foto: Freepik.com.

Gennem en omfattende podcastserie *Videnskabens Vindere* forsøger produktionsselskabet Rakkerpak Productions nu at gøre naturvidenskab nærværende, vedkommende og fascinerende for både unge og den brede befolkning. Serien dykker ned i fortællingerne om nogle af historiens mest betydningsfulde nobelprisvindere inden for fysik, kemi og medicin fra 1901 og frem til 2027, med levende historier om de mennesker, som har skabt de banebrydende opdagelser, vi kender i dag.

Fortællingen formidles af journalist Lauge Hendriksen, der er seriens speaker og gennemgående stemme. Lauge er kendt fra DR's *Biblen Leth fortalt* og er vant til at åbne svært og komplekst stof op for lytterne.

- Vi vil vise, at videnskabens store fortællinger ikke bare handler om formler og laboratorier – men om mennesker med drømme, tvivl og sejre, siger Tor Arnbjørn, CEO hos Rakkerpak Productions.

Videnskabens Vindere bygger videre på succesen med podcasten *Periodisk*, der i 118 episoder gennemgik alle grundstoffer. Den vandt i 2024 Prix Audio for både Årets Niche og Årets Pioner og runder 500.000 downloads. Hvor *Periodisk* fortalte videnskabens historie gennem elementerne, skifter fokus nu til menneskene bag de store opdagelser. Hvad drev dem, hvor kom gennembruddene fra, og hvilken betydning fik det for menneskeheden?

Serien spænder fra Emil Adolf von Behring og udviklingen af de første vacciner til Marie Curies pionerarbejde i radioaktivitet og frem til Morten Meldals kemipris i 2022. Undervejs trækkes linjer til nutidens største udfordringer og viser, hvordan forskning fortsat former vores samfund.

Videnskabens Vindere udkommer med et nyt afsnit hver onsdag. Første afsnit var tilgængeligt onsdag den 10. december 2025.

Podcasten bliver til i samarbejde med Science Report og er støttet af LEO Fondet. Podcasten er gratis og kan høres på alle større podcastplatforme.

Kilde: Pressemeddelelse

RAMAN PROCESS SPECTROSCOPY

Hyperflux™ Pro Plus

Advanced Raman PAT enhances understanding of real-time reaction monitoring, process control and quantitative analysis.

Introducing the HyperFlux™ Pro Plus: an advanced PAT Raman analyzer designed for live chemical analysis and process control with highly interpretable results. Utilizing revolutionary HTVS™ technology, it sets new standards for accuracy, efficiency, and sensitivity, surpassing conventional models. And with Tornado's powerful capabilities - including unmatched reaction monitoring, even at low concentrations, real-time tracking, impurities measurement, and kinetics analysis - it can take your lab or research environment to the next level.

- Rugged small footprint designed for easy installation, ideal for laboratory settings.
- Features a stabilized 785 nm laser with multiple laser safety interlocks and is controlled by a PC running intuitive and easy-to-use SpectralSoft software.
- 10x faster measurements allows you simpler, more cost-effective analytical process monitoring installations
- Enhanced speed, precision, sensitivity and LoD with the innovative HTVS™ technology - all while minimizing laser power usage.
- When used with the OPIS 35™ ATEX Certified Laser Safety Accessory, it can be installed in a controlled environment.
- Large probe variety to accommodate any sample or environment
- 21 CFR Part 11 compliance

For more information please visit
bruker.com/optics • tornado-spectral.com