Dit branchemagasin fra TechMedia A/S

Dansk Kemi

Nummer 2 - April 2024 / 105. årgang

Kemisk Forening - Kemiingeniørgruppen

Hvordan bliver koen mere klimavenlig?

Bæredygtig kemikalieproduktion med membranreaktor

Forskning afslører nye mulige klimaeffekter:

$FeCl_3$ dannes, når ørkenstøv møder havsalt-aerosoler

LabDays 2024

- trade fair for laboratory technology

COPENHAGEN, KB HALLEN 4 - 5 SEPTEMBER

FT-NIR SPECTROSCOPY

MATRIX-F II

Keeping an eye on your process

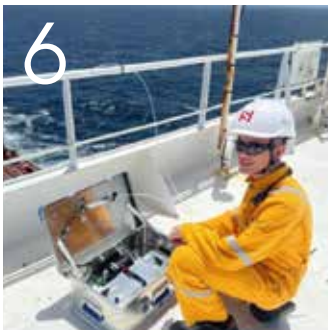
Optical spectroscopy is today a highly important technology for online process monitoring and optimization. Fiber-coupled probes allow a direct look into the process without time delay.

The MATRIX-F II FT-NIR spectrometer allows direct measurements in process reactors, pipelines or over conveyor belts, leading to a better understanding and control of the process. Its innovative technology provides consistent high quality results, less downtime and direct method transfer. All Bruker process spectrometers are characterized by robustness, long-term stability, and low maintenance costs.

- **Smart Analyzer - Integrated Process Communication**
  Fully autonomous with integrated PC
- **Long Life NIR Source - Average Lifetime >3 years**
  Less need of service interactions during operation
- **IoT Interface - Ready for Industry 4.0**
  Provides many additional device parameters for condition monitoring
- **Laser Diode - Reduced Cost of Ownership**
  Optimized x-axis calibration for added robustness

For more information please visit www.bruker.com/MATRIX-F

INDHOLD



1 **Forside**
Det er vist, at der dannes jern(III)kloridsalte, når støv fra Sahara-ørkenen blæser ind over Atlanterhavet og blandes med havsalt-aerosoler. Læs mere herom på side 6.
Foto: Freepik.com.

6 **Feltkampagner til bestemmelse af naturlig klordannelse fra jernsalt-aerosoler**
Ny forskning undersøger klorproduktionen fra interaktionen mellem salt-aerosoler og luftbårne støvpartikler.

9 **Fotokatalytisk klordannelse fra jernklorid-aerosoler kan oxidere metan**
Fotokatalyse kan blive et nyt redskab i fremtidens nedbrydning af drivhusgassen metan.

12 **Hydrogen - fremtidens grundstof**
Unikke hydrogenholdige forbindelser kan skabe nye muligheder for hydrogenlagring, nye typer af faststof-batterier og højtemperatur superledere.

16 **Kan koen blive mere klimavenlig?**
Gennem optimeret fodring kan koens metanudledning reduceres.

19 **Fremtidens CO_2-fangst**
Teknologisk Institut har indviet et nyt Carbon Capture anlæg.

20 **Halm som brændselskilde**
Udnyttelse af halm til energiformål kan forhindre anvendelse af fossilt kul, olie og naturgas.

22 **MACBETH: Banebrydende reaktorsystem gør industriel kemikalieproduktion mere bæredygtig**
En ny type af katalytisk membranreaktor giver øget energieffektivitet.

26 **Ozon ved Villum Research Station**
Ozon i det høje Arktis er særligt svært at simulere.

28 **Eufori i Nomenklaturudvalget**
Læs om nomenklatur af de euforiserende stoffer, der jævnligt omtales i dagspressen.

30 **Mindeord for professor Mikael Begtrup**

TechMedia

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

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

Ledelse:
Adm. direktør Peter Christensen
Direktør Rikke Marott Schelde

Redaktionskomité:
Professor Anne S. Meyer (formand)
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
Gruppeleder, EHS, 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:
Marianne Dieckmann
Tlf. 43 24 26 82, md@techmedia.dk

Layout: Trine Plass
Tryk: PE Offset A/S

Oplag: 4.190
Online læsere: 1.279

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

Trykt på miljøvenligt papir med vegetabilske miljøfarver.

NORDISK MILJØMÆRKNING 5041 0309 TRYKSAG

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 2024 her!
Scan med kameraet på din smartphone.

Kemi og universitetsreformen 2023

Kemi i Danmark går faktisk ret godt. En dansk kemiker vandt som bekendt Nobelprisen i 2022, og kemi er faktisk det eneste fag, hvori Danmark i de sidste 40 år har modtaget den fornemme pris. Og Danmarks økonomi er meget afhængig af et dansk firmas evne til at udvikle og sælge avancerede kemikalier mod diabetes og fedme.

Så et naturligt respons på dansk kemis succes ville være "Mer af det!". Men nej - tværtimod. Vi skal nu have færre kemikere - eller i hvert fald skal nogen af de kemistuderende have mindre kemi. Det bliver, får jeg at vide, ret sikkert resultatet af implementeringen af den universitetsreform, der blev vedtaget i 2023. I denne reform besluttede politikerne, at færre skulle have en toårig kandidatuddannelse. Og det resulterer nu i, at 30 procent af de studerende på kandidatuddannelsen i kemi i stedet for de normale to år må nøjes med et år.

> Jamen, det er jo på specialet, man lærer noget!

Den endelige implementering af denne forkortede kandidatuddannelse er stadig ikke fastlagt, men da alle andre naturvidenskabelige uddannelser får samme behandling, og da det vil være et stort ekstraarbejde at køre mange små uddannelser med to typer kandidatuddannelser, er det ikke sikkert, at de "uheldige" 30 procent kan få lov til at læse kemi. De vil måske være nødt til at vælge en anden kandidatuddannelse, som er etårig, og man har da med et pennestrøg reduceret antallet af kemikere, der uddannes med 30 procent.

Men også, hvis man opretter en forkortet etårig kandidatuddannelse i kemi, er det tudetosset. Den vil nemlig ikke passe ind i Bologna-systemet - det internationale system Danmark følger, hvor bacheloruddannelser er på tre år og kandidatuddannelser på to år, og som sikrer, at uddannelser accepteres på tværs af landegrænser. Kandidaterne vil derfor i udlandet ikke blive set som havende mere end den bacheloruddannelse, de allerede havde, hvilket er lidt af en katastrofe, når man nu har læst et internationalt fag som kemi.

Jeg må gå ud fra, at en hel del synes, universitetsreformen er en god idé - der er jo stort flertal i folketinget bag den. De facto betyder den, at specialet fjernes for de studerende, hvis uddannelse forkortes, og jeg tænker, det er den virkelige grund til reformen. Der har længe været indflydelsesrige folk, der ønskede specialet hen, hvor peberet gror. Blandt andet var der en tidligere statsminister, der sagde: "Et halvt år må være rigeligt til at skrive speciale".

Men for kemi er det en dårlig idé at fjerne specialet. Som nogle kemistuderende, som jeg diskuterede reformen med, sagde: "Jamen, det er jo på specialet, man lærer noget!" De har ret - og det skyldes blandt andet, at kemi er eksperimentelt. I specialet arbejder man på at løse virkelige problemer, og man lærer i en helt anden grad, hvad kemi er end ved at følge 1.000 kurser. En etårig kandidatuddannelse ville det derfor give mest mening, hvis den blev til rent speciale - men det er nok næppe det, der sker.

Mikael Bols

Beskyt miljø og drikkevand:
Pålidelige målinger af PFAS og Nitrat/Nitrit

2029 HD Process Photometer

- Kontinuerlig måling af nitrat- og nitrit 24/7
- Realtidsdata med indbygget alarm sikrer overholdelse af miljøregler
- Brugervenligt og kompakt design (H:57, B:32, L:27 cm)

Combustion IC

- Bestem **total PFAS**
- Et hurtigt, billigt screeningsalternativ
- Automatisk prøveforberedelse og analyse

mail@metrohm.dk **www.metrohm.com**

EUPHORE-kammeret i Valencia, Spanien.

Feltkampagner til bestemmelse af naturlig klordannelse fra jernsalt-aerosoler

Jernsalt-aerosoler er den største kilde til klorradikaler i Nordatlanten, men det globale omfang, effekten af støvkompositionen og interaktioner med luftforurening er indtil videre ukendt.

Af Luisa Pennacchio[1], Marie K. Mikkelsen[1], Chloe Brashear[2] og Matthew S. Johnson[1]

[1] Kemisk Institut, Københavns Universitet
[2] Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht, Utrecht University, Netherlands

Det er blevet vist, at når jernholdigt støv fra Sahara-ørkenen blæser ind over Atlanterhavet og blandes med havsalt-aerosoler, så dannes der jern(III)klorid-salte, som er i stand til at frigive Cl_2 gennem fotolyse. Fotolysen af Cl_2 giver klorradikaler, som er højst reaktive og i stand til at oxidere metan (CH_4) og andre kulbrinteforbindelser. Dette er den største kilde af klorradikaler i Nord-atlanten [1]. Mekanismen er katalytisk ved genoptagelsen af saltsyre, da dette både genintroducerer klor og sænker pH af aerosolerne, som ellers ville stige. I havets grænseoverflade findes der høje koncentrationer af saltsyre, men det er også produktet af klorradikalernes reaktion med CH_4 og andre kulbrinteforbindelser. Mekanismen er blevet fastlagt ved brug af isotopmålinger, global mo-

dellering, simplificeret fastfase laboratorieundersøgelser og aerosolforsøg med UV-lamper [1-5]. Matthew S. Johnson fra Kemisk Institut, Københavns Universitet er principal investigator af et vidtomspændende internationalt samarbejde kaldet ISAMO (Iron Salt Aerosol Methane Oxidation), som arbejder på at undersøge mekanismen og dens rolle på et globalt plan.

EUPHORE atmosfærekammer

Nye forsøg er nu blevet udført i den Europæiske Photoreactor "EUPHORE", som er et 200 m^3 kammer på taget af CEAM forskningsinstitutionen i Valencia, Spanien. På grund af kammerets størrelse og brugen af naturligt lys, er det muligt at simulere atmosfærekemi under næsten virkelige forhold. Kammeret er en halvkuppel lavet af gennemsigtigt fluor-ethen-propen (FEP), som lukker 80 procent af solens lys igennem. Inde i kammeret er der installeret to blæsere til at garantere grundig blanding inden for tre minutter, samt multipass spejle til Fourier-transform infrared (FTIR) spektroskopi med en vejlængde på 553,5 meter. Direkte under kammeret findes kontrolrummet, hvor måleinstrumenter er installeret samt ekstra plads til mulighed for at medbringe egne instrumenter [6-8].

Målet med kampagnen var at eftervise og undersøge mekanismen under så realistiske forhold som muligt. Klorproduktionen af fotolysen af jern(III) klorid-aerosoler blev derfor undersøgt under både tørre og fugtige forhold, samt under blanke forsøg hvor enten jern eller klor ikke var til stede i aerosolerne. Konstante målinger blev lavet med FTIR, Optical Particle Sizer, Scanning Mobility Particle Sizer, Proton-transfer-reaction mass spectrometer og Aerosol Chemical Speciation Monitor, samt af O_3, NOx, HCHO, HCl og CH_4. Dette muliggjorde målinger af udviklingen i gasfasekompositionen, såvel som ændringer i aerosolernes fysiske og kemiske egenskaber. Herudover blev der opsamlet gasprøver i løbet af forsøgene til efterfølgende isotopanalyse med isotop-ratio massespektrometri (IRMS). Indledende resultater viser en forøget CH_4 fjernelsesrate med 10 ppb/t under tørre forhold, når taget åbnes, hvilket indikerer fotolytisk dannelse af klor.

Støv fra verdens ørkener

For at simulere mekanismen så realistisk som muligt, var det næste skridt at undersøge klorproduktionen fra interaktionen mellem salt-aerosoler og luftbårne støvpartikler. I kampagnen blev der brugt støv fra Gobi-ørkenen i Kina, hvilket indeholder store mængder jernoxid. ISAMO stræber efter en opfølgende kampagne ved samme faciliteter, hvor fokus vil være på effektiviteten af støv fra forskellige ørkener rundt i verden for at undersøge den globale indvirkning af mekanismen. Indtil nu er den naturlige forekomst af mekanismen kun målt over Atlanterhavet med støv fra Sahara [9], men mange flere steder i verden kunne give anledning til denne ekstra klorproduktion. Ud over støvtransport fra ørkener til havene, kan mekanismen også forekomme grundet menneskeskabt luftforurening fra skibstransport, da skibsbrændstof indeholder jern. Den næste kampagne vil derfor også undersøge mekanismens interaktioner med luftforurening, hvilket modellering har vist, kan resultere i enten kortere eller længere livstider for CH_4, alt efter koncentrationerne [10].

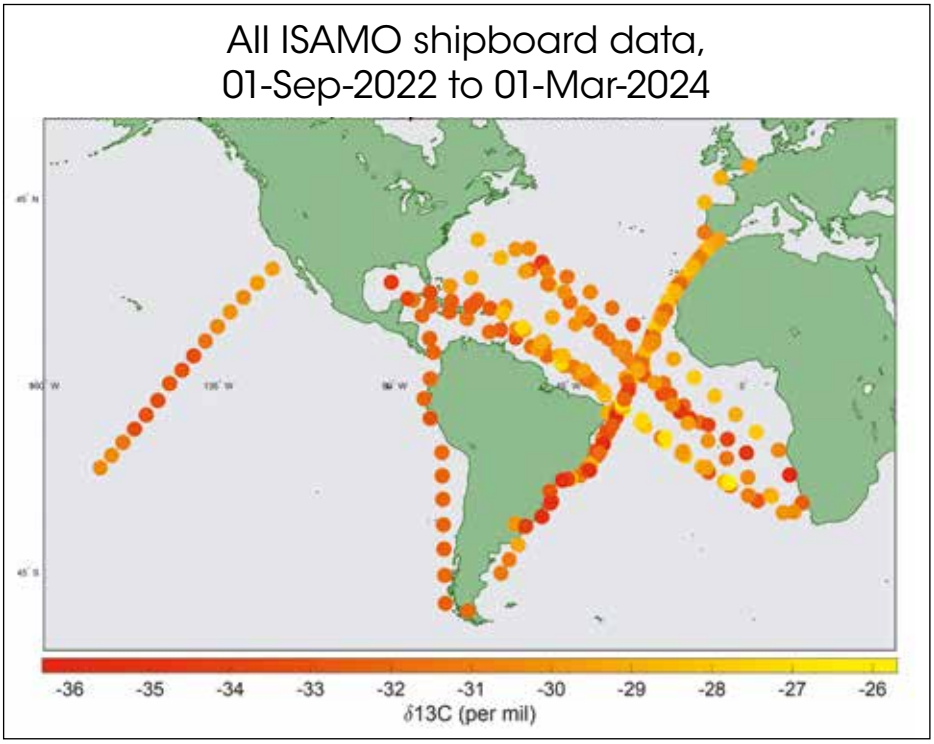


Illustration af geografisk lokation for prøver opsamlet af kommercielle tankskibe, samt deres $\delta^{13}C(CO)$ værdier.

Målinger over Nordatlanten

Den naturlige forekomst af jernsalt aerosol-mekanismen kan måles via carbon monoxid (CO) isotop-sammensætningen. CH_4 oxidation af klorradikaler involverer nemlig en stærk kinetisk isotopeffekt, hvilket resulterer i overførelsen af et isotopisk let kulstof til det første stabile produkt af reaktionen: carbon monoxid (CO). Ved at analysere $\delta^{13}C(CO)$ i den midt-Atlantiske grænseoverfladeluft, er det muligt at validere og indskrænke den naturlige forekomst af processen. I september 2022 påbegyndte ISAMO-projektet en toårig prøveudtagningskampagne, som består af 1) prøveudtagninger tre gange om ugen ved fire målestationer på tværs af Tenerife (IZO og IEO), Cape Verde (CVAO) og Barbados (RPB) og 2) transatlantiske prøveudtagninger ombord på kommercielle tankskibe. Data fra IZO, IEO, CVAO og RPB muliggør høj resolution ved de langsgående marginer af den transatlantiske støvtransport og ved kritiske lokationer, såsom Barbados, hvor sæsonale reduktioner i $\delta^{13}C(CO)$ er blevet lænket til øget oxidation grundet jernsalt-mekanismen [1,9]. For at udfylde de geografiske datahuller mellem stationerne, samarbejder ISAMO med Mærsk og Stolt-Nielsen for at samle baggrundsluftprøver i nord-til-syd transekter af Sahara-luftlaget. Samlet giver disse luftprøver muligheden for at undersøge den sæsonbestemte og geografiske indflydelse af Sahara-støv på troposfærisk kloroxidation.

Feltkampagne på Barbados

Mens målingerne fra skibe og målestationer giver værdifuld information om mekanismen, er det ikke muligt at undersøge den vertikale profil for processen. Dette er nødvendigt, da højden på støvskyen fra Sahara-ørkenen har stor variation gennem året. For at undersøge den vertikale profil er en feltkampagne planlagt til at starte i sommeren 2024 på Barbados, hvori et forskningsfly vil måle

På billedet ses besætningsmedlem med prøveudtagningskit på et skib i Nordatlanten.

in situ aerosol-, CO-, CO_2-, H_2O-, CH_4- og HCl-koncentrationer, samt opsamle gasprøver til efterfølgende isotopanalyse og aerosolprøver til elementær analyse. Denne viden er essentiel for at forstå den naturlige mekanisme bedre, men også for at undersøge potentialet for at bruge mekanismen som et klimaindgreb. En af usikkerhederne her er nemlig, om det ville kunne påvirke ozonlaget i stratosfæren, hvilket kun kan besvares ved at undersøge den vertikale profil for processen.

Konklusion

Fotolysen af jernsalt-aerosoler er den største kilde til klorradikaler i Nordatlanten. Disse aerosoler dannes ved interaktionerne mellem havsalt-aerosoler og jernholdige støvpartikler, men det globale omfang, effekten af støvkompositionen og interaktioner med luftforurening er indtil videre ukendt. ISAMO-projektet har til formål at udforske og kortlægge den naturlige forekomst, samt at undersøge mekanismens potentiale som klimaindgreb. Dette arbejde er undervejs som en interdisciplinær kombination af feltkampagner, laboratorieforsøg og modellering verden over. Dataanalyse for alle de igangværende kampagner er undervejs og vi ser frem til at præsentere dem i kommende artikler.

E-mail:
Matthew S. Johnson: msj@chem.ku.dk

Litteratur

1. van Herpen, M.M.J.W., Li, Q., Saiz-Lopez, A., Liisberg, J.B., Röckmann, T.,871. Cuevas, C.A., Fernandez, R.P., Mak, J.E., Mahowald, N.M., Hess, P., Meidan, D., Stuut, J.-B. W. & Johnson, M., 2023. Photocatalytic chlorine atom production on mineral dust–sea spray aerosols over the north atlantic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 120 (31), p. e2303974120.
2. Mikkelsen, M.K., Liisberg, J.B., van Herpen, M.M.J.W., Mikkelsen, K.V. & Johnson, M.S., 2024. Photocatalytic chloride to chlorine conversion by ionic iron in aqueous aerosols: A combined experimental, quantum chemical and chemical equilibrium model study. *Aerosol Research*, under review.
3. Wittmer, J., Bleicher, S. & Zetzsch, C., 2015. Iron(III)-Induced Activation of Chloride and Bromide from Modeled Salt Pans. *The Journal of Physical Chemistry A,* 119 (19), p.4373-4385.
4. Wittmer, J., Bleicher, S., Ofner, J. & Zetzsch, C., 2015. Iron (III)-induced activation of chloride from artificial sea-salt aerosol. *Environmental Chemistry*, 12 (4), p.461-475.
5. Wittmer, J. and Zetzsch, C., 2017. Photochemical activation of chlorine by iron-oxide aerosol. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 74, p.187-204.
6. Munoz, A., Vera, T., Sidebottom, H., Mellouki, A., Borras, E., Ródenas, M., ... & Vazquez, M., 2011. Studies on the atmospheric degradation of chlorpyrifos-methyl. *Environmental science & technology*, 45(5), p.1880-1886.
7. Munoz, A., Borras, E., Rodenas, M., Vera, T., & Pedersen, H.A., 2018. Atmospheric oxidation of a thiocarbamate herbicide used in winter cereals. *Environmental science & technology*, 52(16), p.9136-9144.
8. Feigenbrugel, V., Person, A.L., Calvé, S.L., Mellouki, A., Munoz, A., & Wirtz, K., 2006. Atmospheric fate of dichlorvos: photolysis and OH-initiated oxidation studies. *Environmental science & technology*, 40(3), 850-857.
9. Mak, J.E., Kra, G., Sandomenico, T., & Bergamaschi, P., 2003. The seasonally varying isotopic composition of the sources of carbon monoxide at Barbados, West Indies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D20).
10. Pennacchio, L., van Herpen, M.M.J.W., Meidan, D., Saiz-Lopez, A & Johnson, M.S., 2024. Catalytic efficiencies for methane removal: Impact of HOx, NOx and chemistry in the high-chlorine regime. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA,* under review.

From the 2023 Maersk Sustainability Report:

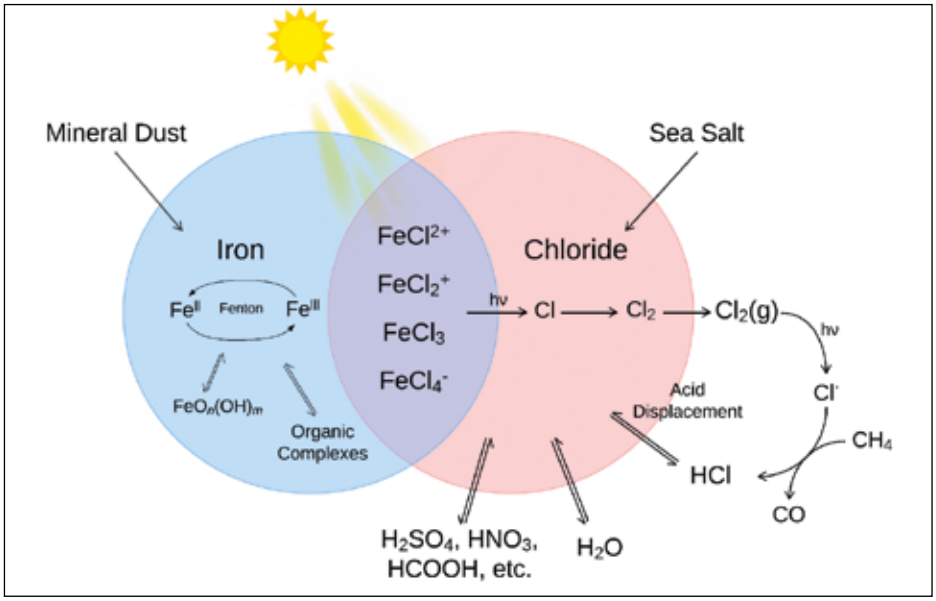
Supporting ocean and climate science Maersk continues to leverage our vessels and ocean networks in support of ocean and climate science through long-standing partnerships with research organisations. In 2023, Maersk supported the Oceans X - Xploration ISAMO project, an exploration of solutions that could one day recreate the natural process of methane oxidation, which removes methane (a greenhouse gas) from the atmosphere. Maersk crew on vessels crossing the Atlantic collected and returned 280 samples for analysis in 2023, helping scientists understand why methane oxidation occurs at an increased rate over the sea and in areas with high iron content, as well as the impact of dust from the Sahara Desert over the Atlantic Ocean.

Fotokatalytisk klordannelse fra jernklorid-aerosoler kan oxidere metan

En naturlig mekanisme kan blive en fremtidig metan-fjernelsesmetode.

Af Marie Kathrine Mikkelsen, Luisa Pennacchio og Matthew S. Johnson, Kemisk Institut, Københavns Universitet

Der har i de seneste år været øget fokus på metan (CH_4) fjernelse, da drivhusgassen varmer atmosfæren 82 gange mere end CO_2 over en periode på 20 år [1, 2]. Ser man på den naturlige måde, hvorpå CH_4 bliver fjernet i atmosfæren, sker det primært ved reaktion med hydroxylradikalet (OH) eller klorradikalet (Cl). Studier har vist, at der naturligt sker en førhen uforklarlig forøgelse af Cl over Nordatlanten, hvilket fremmer fjernelsen af CH_4. Denne artikel omhandler, hvordan opdagelsen af en naturlig mekanisme hvor fotolyse af jernsalt-aerosoler kan udnyttes til at fremme dannelsen af Cl og derved muliggøre en metode til at øge fjernelsen af CH_4.



Figur 1. De primære dannelses- og fjernelsesreaktioner for jern(II) og jern(III) ioner samt klorid i en atmosfærisk aerosol. Derudover deres indflydelse på dannelsen af jern(III) klorider under lave pH-betingelser [5].

Jernsalt aerosol-mekanismen

Tidligere forskning har vist, at klor kan aktiveres fotokemisk fra syreholdig jern(III)klorid [3,4]. Denne mekanisme har Mikkelsen et al. (2023) undersøgt dybdegående [5].

Figur 1 viser, hvordan jern fra støv og klor fra havspray kan danne jern(III) klorider i et lavt pH-regime. Sollys driver en ligand til metalladningsoverførsel ved Cl^- til Cl^0 og Fe(III) til Fe(II). Denne proces danner klorradikaler, der kan oxidere CH_4, hvilket danner HCl. Partiklen genoptager HCl i den vandige fase og sørger derfor for, at miljøet forbliver surt. Fenton-reaktionen driver oxidationen af Fe(II) til Fe(III) ved hjælp af hydrogenperoxid. Dette gør mekanismen katalytisk i både jern- og klorressourcer.

Ved brug af en vand-fase-model drevet af fysiske egenskaber, blev det påvist, at $FeCl_2^+$ er den vigtigste kromofor for klorproduktionen, da den forekommer mest i vandig fase.

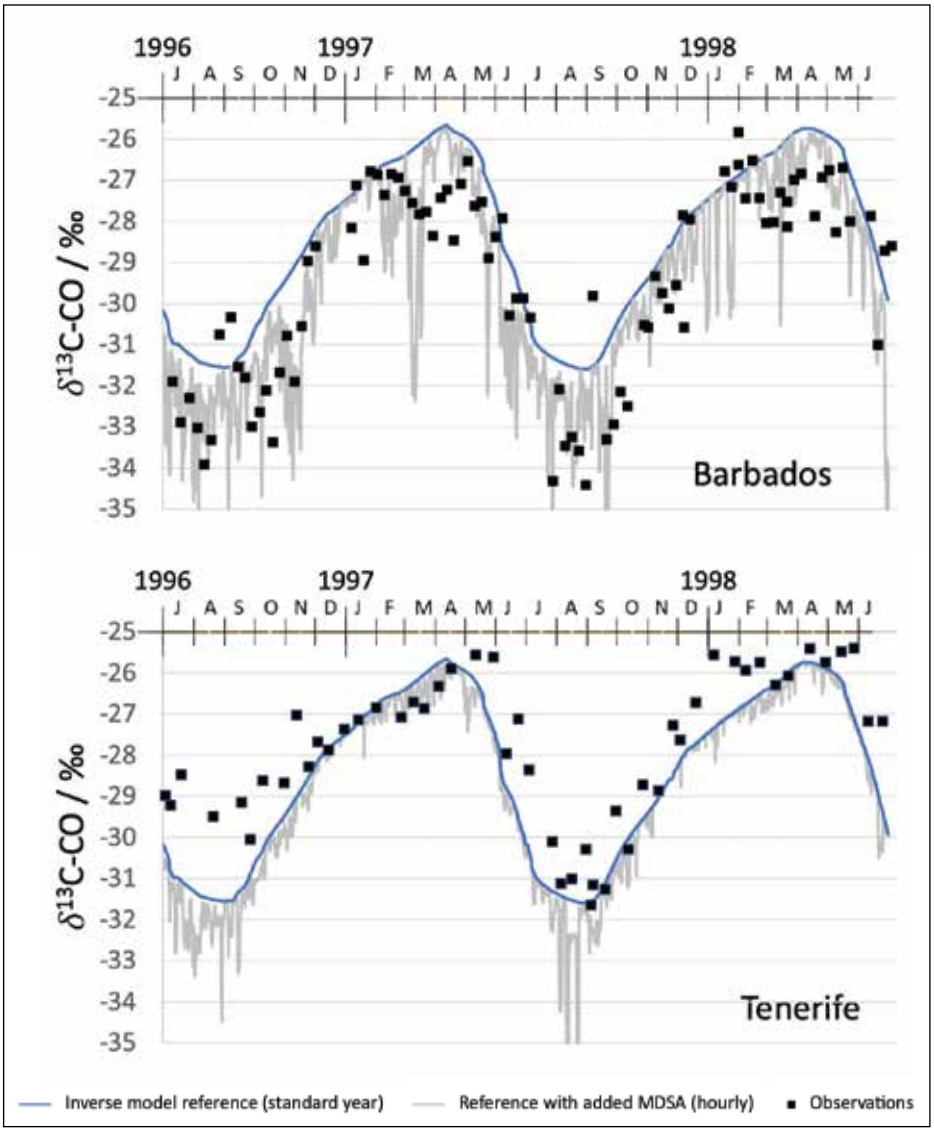
Det var førhen uvist, om jern(III)klorider kunne blive fotolyseret af sollys. Derfor blev der også gjort brug af kvantekemiske beregninger til at bestemme absorbansraten og energitærsklerne for dissociation af jern(III)kloriderne. Disse beregninger konkluderede, at alle specier absorberer lys i det synlige spektrum, hvilket blev beregnet i både vakuum, fast fase, havvand og vand. For både $FeCl_2^+$, $FeCl_3$ og $FeCl_4^-$ var den laveste energitærskel ved 573 nm.

Mikkelsen et al. (2023) påviste endvidere mekanismen eksperimentelt ved forskellige bølgelængder fra 408 til 601 nm for at lokalisere, ved hvilken bølgelængde den er mest aktiv. Dette resulterede i etablering af en aktiv rækkevidde fra 400 til 530 nm med et maksimum omkring 440 nm.

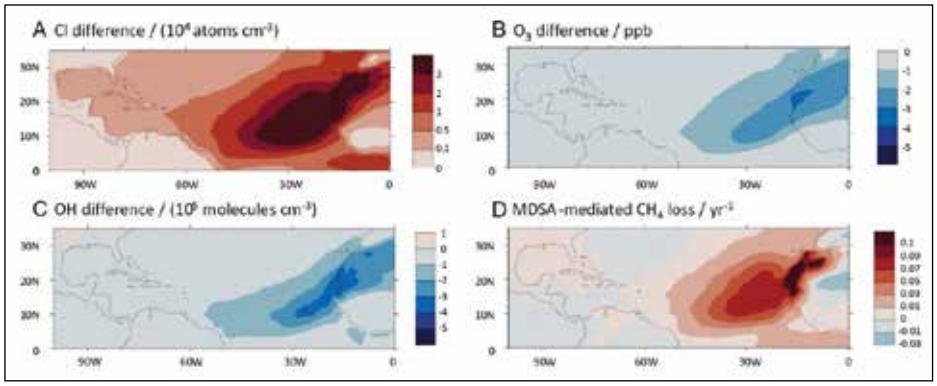
Målinger fra Barbados forklaret 20 år efter

Målinger af CO over Barbados fra 1996 til 2000 viste en sæsonmæssigt varierende isotopsammensætning (δ^{13}C-CO), som ikke kunne forklares ved allerede kendte variationer, såsom dem forårsaget af fossile brændstoffer [6]. Ifølge Mak et al. (2003) var δ^{13}C mindre end -34‰, især målt i sommermånederne, hvilket ikke kan forklares ved reaktionen af CH_4 og OH. Ifølge Mak et al. (2003) er den eneste forklaring en ukendt øget koncentration af Cl. Reaktionen mellem CH_4 og Cl ville give anledning til en lavere δ^{13}C, grundet at reaktionen har en højere kinetisk isotopeffekt (KIE) på 66‰.

20 år senere udgav van Herpen et al. (2023) deres svar på den sæsonmæssigt varierende isotopsammensætning [7]. Her bliver forslået en mekanisme kaldet "Mineral Dust-Sea spray Aerosols" (MDSA), der danner Cl ved blandingen af støv fra Sahara-ørkenen med havspray. På figur 2 ses δ^{13}C-målinger fra Barbados og Tenerife [6], hvor de sorte punkter er observationer, den blå linje er en standard "Community Earth System Model" (CESM) med traditionel kendt kemi, og den grå linje er en CESM, hvor MDSA-mekanismen er inkluderet. Det er tydeligt at se, hvordan den grå linje for Barbados stemmer overens med de variationer, der ses i δ^{13}C-observationerne, hvorimod der for Tenerife ikke ses samme variation i δ^{13}C.



Figur 2. Tidsserie, der viser δ^{13}C-CO ifølge CESM-simulationer, hvor MDSA-mekanismen er inkluderet. Barbados (øverst) og Tenerife (nederst; timevis; grå linje), sammen med en invers box-modelsimulation baseret på traditionel kemi for et normalt år, brugt af Mak et al. (2003) (blå linje). Modellen reproducerer de negative observationer i δ^{13}C-CO data fra Mak et al. (2003) [6].



Figur 3. Konturplot af de årlige gennemsnitlige ændringer i marinegrænselaget for (A) [Cl], (B) Δx_{O3}, (C) [OH] og (D) CH_4 fjernelsesrate grundet MDSA-fotokemien, der viser, hvordan MDSA-fotokemi påvirker CH_4 gennem effekten på OH og Cl.

Modellen af van Herpen et al. (2023) viste, at der er brug for en sæsonbestemt Cl produktionsrate op mod 6×10^5 cm^{-3} s^{-1}, til at forklare CO-isotopanomalien [7].

Det kan ses på figur 3A, hvordan MDSA-mekanismen øger det månedlige gennemsnit af Cl, hvilket øger brøkdelen af CH_4, der bliver oxideret af Cl. Dette leder til en lokal øget CH_4 fjernelsesrate på 20 procent (figur 3D), selvom OH-koncentrationen bliver mindsket med op til 10 procent (figur 3B og 3C). Deres model finder, at 3,8 Tg(Cl) y^{-1} produceres over Nordatlanten, hvilket vil gøre MDSA til den dominerende kilde til Cl i regionen. Hvis dette gør sig gældende på en global skala, ville Cl-produktionen stige med 41 procent [7].

Øget Cl-koncentration = mindre CH_4?

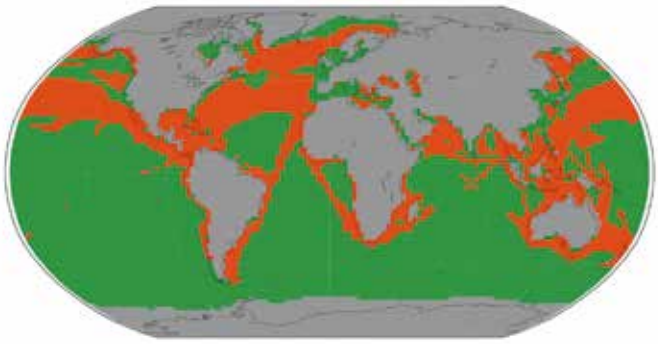
Det korte svar er ja og nej. En model af Pennacchio et al. (2023) viser, hvordan koncentrationen af NOx påvirker fjernelsen af CH_4 [8]. Grundet reaktioner mellem NOx og Cl-forbindelser, vil en NOx-koncentration mellem 50-390 ppt lede til en øget livstid for CH_4. På figur 4 ses et verdenskort over de områder, hvor NOx-koncentrationen er mellem 40-400 ppt. Uden for dette område vil enhver addition af Cl give anledning til en kortere CH_4 livstid.

Hvis en strategi for Cl-tilførsel til atmosfæren ville være at gøre brug af skibe som implementeringsmetode (diskuteret i Pennacchio et al. (2023)), vil NOx-koncentrationen ikke være favorabel for de fleste skibsruter.

Det er derfor vigtigt at vurdere mængden og metoden, hvorpå Cl tilsættes, da interaktioner med klimaet og miljøet potentielt vil kunne påvirkes [9]. Det er derfor afgørende nøje at vurdere, om tilgangen er holdbar og socialt acceptabel, før en mulig implementering virkeliggøres.

Konklusion

Denne artikel belyser, hvordan jernsalt aerosol-mekanismen kan generere Cl til at oxidere CH_4, hvilket er katalytisk i både jern- og klorressourcer. Denne mekanisme blev observeret i 1990'erne ved Barbados, og først forklaret i 2023.



Figur 4. Verdenskort, der viser de steder, hvor NOx-koncentrationerne ikke er favorable, 40-400 ppt (rød), for oxidationen af metan med Cl. Kilde: Pennacchio et al. (2023) [8].

Blandingen mellem Sahara ørkensand og havspray kan lokalt resultere i en kortere livstid for CH_4. Denne mekanisme kan til gengæld blive påvirket af lokal forurening, såsom NOx. En NOx-koncentration mellem 50-390 ppt vil endvidere øge livstiden for CH_4. Derfor skal implementering af et sådan klima tiltag vurderes nøje.

E-mail:
Matthew S. Johnson: msj@chem.ku.dk

Referencer

1. Myhre G., Shindell D. and Pongratz J. 2013 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) URL: https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018.
2. Forster P., Storelvmo T., Armour K., Collins W., Dufresne J.L., Frame D., Lunt D., Mauritsen T., Palmer M., Watanabe M., Wild M. and Zhang H. 2021 IPCC AR6 WGI p. 1017 URL https://doi.org/10.1017/9781009157896.009.
3. Wittmer, J., Bleicher, S., Ofner, J., & Zetzsch, C. (2015). Iron (iii)-induced activation of chloride from artificial sea-salt aerosol. Environmental Chemistry, 12 (4), 461-475.885 https://doi.org/10.1071/EN14279.
4. Wittmer, J., & Zetzsch, C. (2017). Photochemical activation of chlorine by iron oxide aerosol. Journal of Atmospheric Chemistry, 74, 187-204. https://doi.org/10.1007/s10874-016-9336-6.
5. Mikkelsen, M.K., Liisberg, J.B., van Herpen, M.M.J.W., Mikkelsen, K.V., and Johnson, M.S.: Photocatalytic chloride to chlorine conversion by ionic iron in aqueous aerosols: A combined experimental, quantum chemical and chemical equilibrium model study, Aerosol Research Discuss., 2023. https://doi.org/10.5194/ar-2023-13.
6. J.E. Mak, G. Kra, T. Sandomenico, P. Bergamaschi, The seasonally varying isotopic composition of the sources of carbon monoxide at Barbados, West Indies. J. Geophys. Res. Atmos. 108, 4635 (2003). https://doi.org/10.1029/2003JD003419.
7. van Herpen, M.M., Li, Q., Saiz-Lopez, A., Liisberg, J.B., Röckmann, T., Cuevas, C.A., Fernandez, R.P., Mak, J.E., Mahowald, N.M., Hess, P., Meidan, D., Stuut, J.-B., Johnson, M.S., Photocatalytic chlorine atom production on mineral dust-sea spray aerosols over the North Atlantic, Proceedings of the National Academy of Sciences 120(31), e2303974120, 2023. https://doi.org/10.1073/pnas.2303974120.
8. Pennacchio L., van Herpen M., Meidan D., Saiz-Lopez A. and Johnson M.S. 2023 ChemRxiv. Cambridge: Cambridge Open Engage This content is a preprint and has not been peer-reviewed. URL: https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-3r8sf.
9. Q. Li, D. Meidan, P. Hess, J.A. Añel, C.A. Cuevas, S. Doney, M.S. Johnson, D.E. Kinnison, R.P. Fernandez, M. van Herpen, L. Höglund-Isaksson, J.-F. Lamarque, T. Röckmann, N.M. Mahowald, A. Saiz-Lopez, Global environmental implications of atmospheric methane removal through chlorine-mediated chemistry-climate interactions, Nature Communications 14(4045), 2023. https://doi.org/10.1038/s41467-023-39794-7.

scion
INSTRUMENTS
A Techcomp Company

PREMIUM CHROMATOGRAPHY

Boost productivity and generate data confidently with our premium gas and liquid chromatography solutions.

SAMSI
ANALYTICAL APPLICATION SERVICES

Please contact SAMSI, our regional distributor
Email: samsi@samsi.no | Phone: +4735975600
www.samsi.no

scioninstruments.com

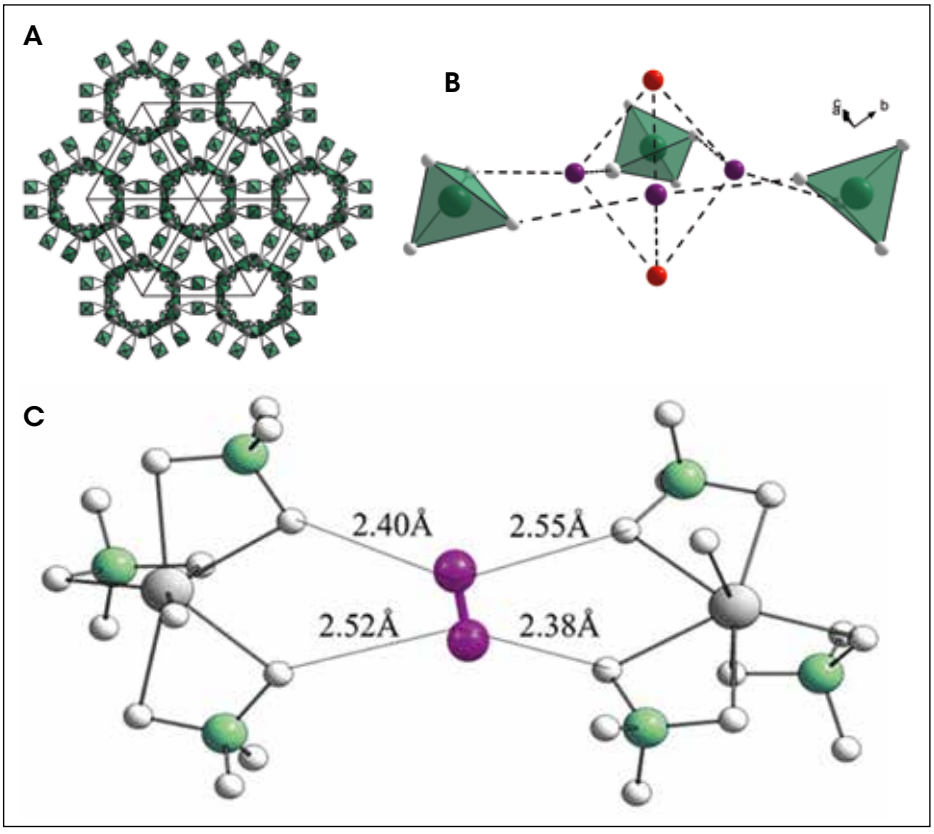
SCAN FOR MORE INFORMATION

Hydrogen - fremtidens grundstof

Forskning i unikke hydrogenholdige forbindelser kan føre til nye teknologiske fremskridt inden for forskelligartede områder som hydrogenopbevaring, nye typer af faststof-batterier og højtemperatur superledere.

Af Torben R. Jensen, Det Interdisciplinære Nanoscience center (iNANO) og Institut for Kemi, Aarhus Universitet

Hydrogen er det mest simple grundstof, men nok også dét der kan danne flest forskellige typer af kemiske bindinger, og hydrogen danner kemiske forbindelser med næsten alle andre grundstoffer. Det seneste i rækken af nye typer af bindinger er et penta-dihydrogen cluster med hexa-hydrogen bindinger, som bliver diskuteret nedenfor [1]. Det giver inspiration til at udvikle nye faste stoffer med et højt hydrogenindhold, som måske kan finde anvendelser inden for opbevaring af vedvarende energi i form af hydrogen. Senest har det vist sig, at forbindelser med et ekstremt højt hydrogenindhold kan fremstilles under højt tryk, kaldet "superhydrider". Nogen af disse forbindelser har unikke egenskaber såsom højtemperatur superledning. Nye forskningsresultater fra de seneste år har vist, at hydrider kan have meget høj ionledningsevne også for divalente kationer, såsom Mg^{2+} og Ca^{2+}. Det har kastet nyt lys over mulighederne for at lave faststof magnesium og calciumbatterier, da ionledningsevnen er exceptionelt høj.



Figur 1. A) Den "tomme" nanoporøse struktur af γ–$Mg(BH_4)_2$. Strukturen indeholder både store (~9 Å) og små kanaler (~5.8 Å). B) Penta-dihydrogen-enhed i strukturen af γ–$Mg(BH_4)_2{\cdot}2{,}33H_2$. C) Hydrogenmolekylerne på position D22 danner retningsbestemte hexa-hydrogen bindinger, $(B–H^{\delta-})_2\cdots H–H\cdots(H^{\delta-}–B)_2$ med delvist negativt ladet hydrogen i gitterstrukturen. Figur A og B er baseret på resultater fra neutrondiffraktion, hvorimod figur C er beregnet med DFT-metoder. Bor er grøn og BH_4^- er vist som tetraedere i figur A og B. Hydrogen er hvid og magnesium er vist som større grå kugler. Dihydrogenmolekyler på position D11 er vist som røde kugler og på position D22 som violette kugler i figur B, og med hydrogenatomer angivet i figur C.

Hydrogen adsorberet i et nano-porøst metalborhydrid

Magnesium tetrahydridoborat kendes på syv forskellige krystallinske former, og én af dem, γ–$Mg(BH_4)_2$, er nanoporøs med cirka 30 procent åbent rum i det faste stof. Denne polymorf blev opdaget i 2010 på Institut for Kemi ved Aarhus Universitet og blev strukturelt undersøgt. Strukturen indeholder et 3-dimensionelt net af kanaler med en porediameter på ~9 Å og mindre åbninger på ~5.8 Å, som sætter forbindelsen i stand til at adsorbere mindre molekyler såsom dichlormethan (CH_2Cl_2), nitrogen (N_2) og hydrogen (H_2). Det porøse stof, γ–$Mg(BH_4)_2$, udmærker sig ved at have en delvist negativ indre overflade dannet af $B–H^{\delta-}–Mg$ bindinger.

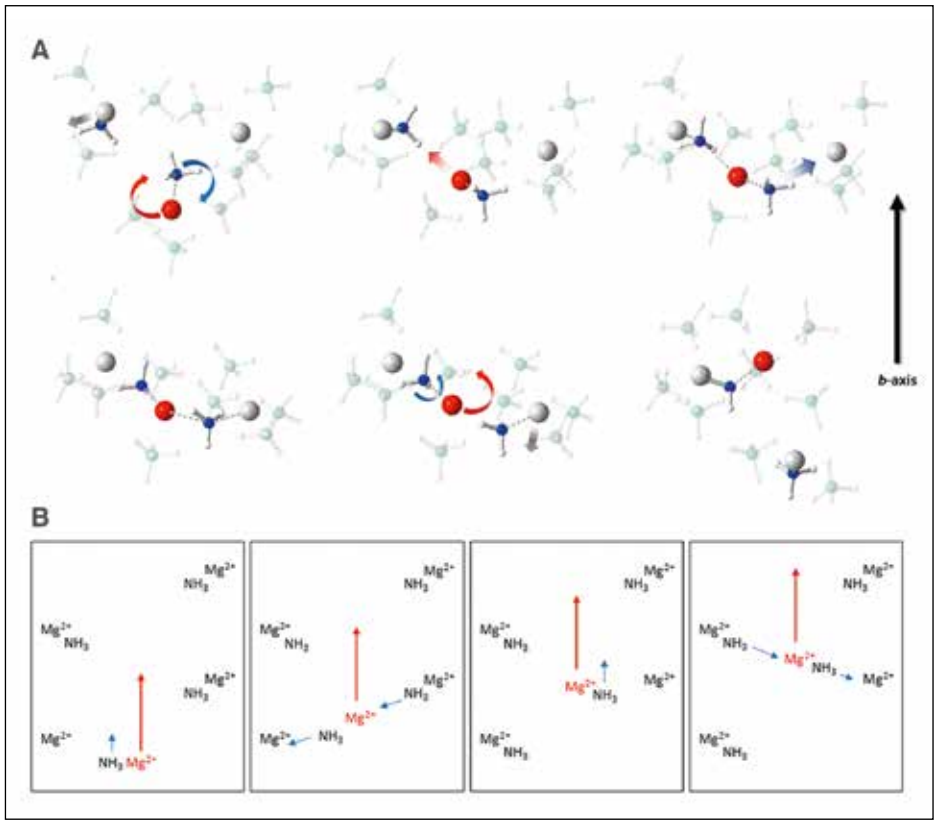
Tidligere undersøgelser har ikke lykkedes med at lokalisere dihydrogenmolekyler med røntgenstråling, så det blev antaget, at det adsorberes på samme positioner som nitrogen, da de to molekyler har næsten samme størrelse (den kinetiske diameter er hhv. $d(H_2/D_2)$ = 2.89 Å og $d(N_2)$ = 3.64 Å). En nitrogen- og hydrogengas-adsorptionsmåling i det porøse stof, γ–$Mg(BH_4)_2$, gav overraskende nok meget forskellige resultater og antydede, at der var noget "galt". Det udregnede Brunauer-Emmett-Teller (BET) specifikke overfladeareal for γ–$Mg(BH_4)_2$ bestemt fra en N_2 isotherm

målt ved 77 K er kun $S_{BET}(N_2)$ = 610 m^2/g, hvorimod en H_2 isotherm (målt ved 20 K) giver resultatet $S_{BET}(H_2)$ = 1.787 m^2/g eller 1.577 m^2/g, når man bruger tværsnitsarealet for hydrogenmolekylet på flydende eller fast form [1].

Denne observation inspirerede til at fremstille en dobbelt isotopberiget variant af stoffet, γ–$Mg(^{11}BD_4)_2$, som tillader, at man kan lave neutrondiffraktion og undersøge mere nøjagtigt, hvor N_2 og H_2/D_2 i virkeligheden sidder i det nanoporøse stof. Det viste sig hurtigt, at hydrogen adsorberes på andre positioner end nitrogen. Nitrogen foretrækker at sidde midt i en pore så langt fra strukturen af γ–$Mg(BH_4)_2$ som muligt, hvorimod hydrogen gerne vil placere sig tættere på. Den nye hydrogenposition (kaldet D11) tillader et maksimalt hydrogenindhold svarende til γ–$Mg(BH_4)_2$·1,33H_2, hvorimod nitrogenpositionen tillader færre molekyler, svarende til sammensætningen γ–$Mg(BH_4)_2$·2/3N_2. Yderligere forsøg med neutrondiffraktion ved højere partialtryk af hydrogen (T = 25 K og $p(D_2)$ = 203 mbar) har dog vist, at der findes endnu en position, hvor hydrogen kan adsorberes (kaldet D22). De krystallografiske data viser således, at det nanoporøse stof, γ–$Mg(BH_4)_2$, kan optage 2,33 dihydrogenmolekyle per formelenhed svarende til sammensætningen γ–$Mg(BH_4)_2$·2,33H_2, og at dihydrogenmolekyler på de to positioner er organiseret i trigonal bipyramidale enheder, kaldet penta-dihydrogen clustre. Det svarer til 8,0 wt% dihydrogen adsorberet i det porøse stof og et totalt hydrogenindhold på 21.7 wt%.

Dihydrogenmolekyler, der er adsorberet, er utrolig tæt pakket svarende til cirka 144 gram H_2 per liter pore rumfang. Det er dobbelt så tæt pakket som i rent flydende hydrogen, der har densiteten, $\rho(H_2)$ = 71 g/L. Den meget tætte pakning af dihydrogenmolekyler fortæller, at der er kort afstand mellem dem og også kort afstand til gitterstrukturen i det porøse stof [1].

Strukturen af γ–$Mg(BH_4)_2$·2,33H_2 er efterrationaliseret med computerberegninger, kaldet density functional simulations (DFT). Det viser sig, at dihydrogen adsorberes tæt på hydrogen i gitterstrukturen (korteste afstand, H···H_2 er 2.69 Å), og at der er kort afstand mellem molekylerne i penta-dihydrogen enhederne mellem gitterstrukturen (korteste afstand, D11···D22 er 2.64 Å). Den sidste afstand svarer til afstanden mellem dihydrogenmolekyler, H_2···H_2, i fast hydrogen, som er 2.66 Å (ved et tryk på 5.4 GPa).



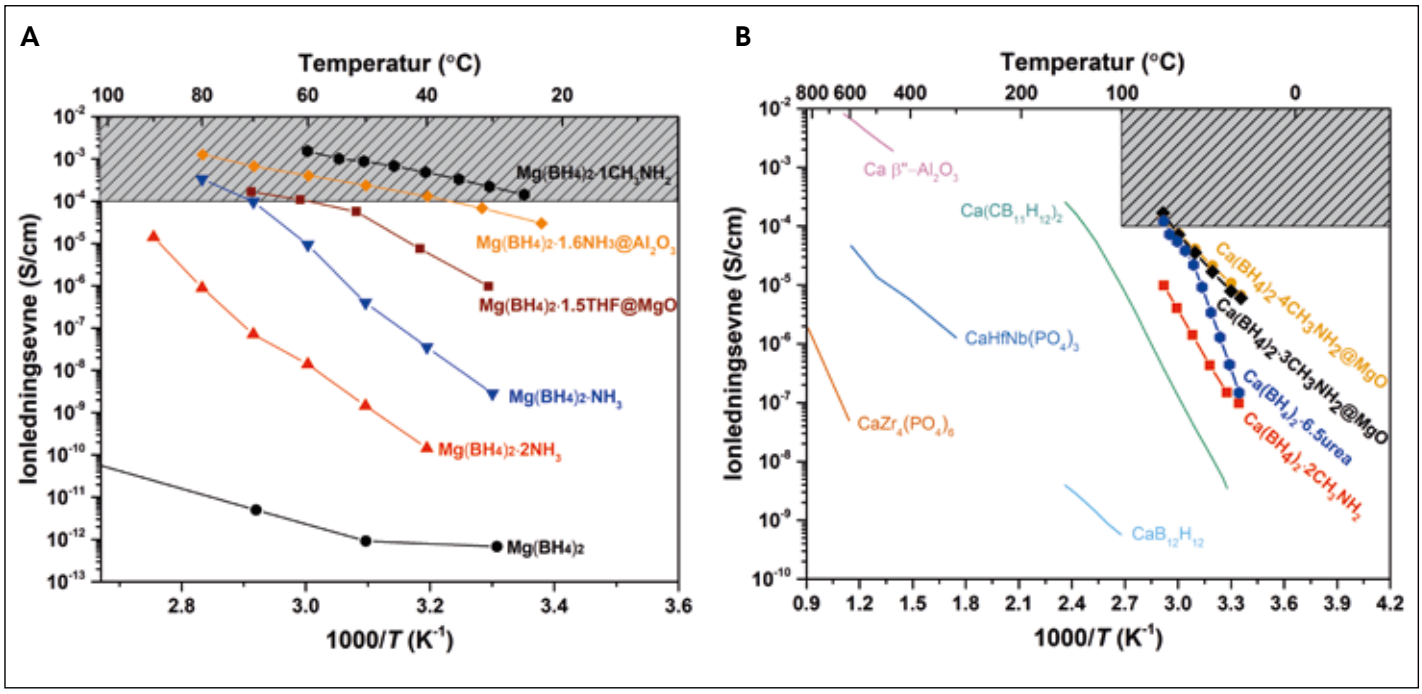
Figur 2. Illustration af hvordan en "ekstra" (interstitiel) magnesium ion (Mg^{2+}, rød) kan bevæge sig igennem det faste stof, $Mg(BH_4)_2$·NH_3, langs *b*-aksen i strukturen ved at låne ammoniakmolekyler. Øverst: Detaljerede "snapshots", der viser den strukturelle fleksibilitet i stoffet $Mg(BH_4)_2$·NH_3, som dels skyldes de svage di-hydrogenbindinger, men også den fleksible ligand, BH_4^-. Den sammensatte ion, BH_4^-, kan koordinere til magnesium via et hjørne, en kant, eller en flade, og det kan ændres ved rotation eller forskydning i det faste stof. Nederst: Skematisk illustration af en magnesium ion (rød), der bevæger sig igennem $Mg(BH_4)_2$·NH_3. Den interstitielle magnesium ion (rød) koordinerer til et ammoniakmolekyle (NH_3) og tager et par "dansetrin" fremad. Så leveres NH_3 tilbage til sin oprindelige partner (en magnesium ion i gitterstrukturen, grå). Herefter låner det interstitielle magnesium et nyt NH_3-molekyle og tager et par hop fremad i strukturen. Denne nye mekanisme for kationledningsevne i fast stof minder om en dans (*pas-de-deux*) [2]. Farvekode: H er hvid, B grøn, N blå, Mg i gitterstrukturen er grå, og det interstitielle magnesium er rød. Figuren er reproduceret fra reference [2] med tilladelse fra "the Royal Society of Chemistry".

Beregningerne viser også, at hydrogenmolekyler binder sig forskelligt i det faste stof. Hydrogenmolekyler på position D11 kan rotere frit om deres massemidtpunkt, og er bundet til det faste stof med ikke-retningsbestemte dispersionskræfter (van der Waals vekselvirkninger). Hydrogen på position D22 derimod, er bundet med veldefinerede retningsbestemte bindinger og er placeret en smule tættere på gitterstrukturen i det porøse stof γ–$Mg(BH_4)_2$ end hydrogen på position D11. Det skaber en elektrostatisk vekselvirkning mellem hydrogen (D22) og den delvist negativt ladede gitterstruktur B–$H^{\delta-}$···H_2. Faktisk dannes der hexa-hydrogenbindinger, $(B–H^{\delta-})_2$···H–H···$(H^{\delta-}–B)_2$, med en samlet bindingsstyrke på 8.5 kJ/mol [1].

Computerbaserede beregninger (DFT), neutron diffraktion og gasadsorptionsmålinger viser også, at først adsorberes dihydrogen på positionen D11 og derefter på positionen D22. Det stemmer også overens med DFT-beregninger, som viser, at når penta-H_2 enheden er dannet, så vindes der yderligere ~1 kJ/mol per H_2 molekyle i stabiliseringsenergi.

Hydrogenopbevaring

Den nye forbindelse, som er beskrevet ovenfor, γ–$Mg(BH_4)_2$·2,33H_2, illustrerer problemet med hydrogenopbevaring som faststof. Hydrogen danner bindinger med de fleste andre grundstoffer i det periodiske system, men med meget forskellig bindingsstyrke. De polære kovalente bindinger, B–$H^{\delta-}$, er relativt stærke, og derfor skal $Mg(BH_4)_2$ varmes op til over 200 °C, før det afgiver hydrogen. På den anden side er hydrogen det mindste molekyle, vi kender med kun to elektroner, så det adsorberes med de svageste dispersionskræfter



Figur 3. Nye forbindelser med høj magnesium eller calcium ionledningsevne fremstillet ved Institut for Kemi og iNANO, Aarhus Universitet (data vist som punkter). Kationledningsevnen, $\sigma(Mg^{2+}/Ca^{2+})$, er vist med en logaritmisk 2.-akse og som funktion af reciprok temperatur ($1/T$) og hældningen af linjen angiver aktiveringsenergien, E_A, for processen. Det skraverede område viser, hvor batterianvendelser begynder at være realistisk, $\sigma(Mg^{2+}/Ca^{2+}) > 10^{-4}$ Scm^{-1}. (A) Magnesium ionledningsevne for $Mg(BH_4)_2$ og nogen afledte forbindelser som funktion af temperaturen. (B) Calcium ionledningsevne for nogen forbindelser afledt af $Ca(BH_4)_2$ (punkter) sammenlignet med nogen kendte forbindelser (streger) som funktion af temperaturen.

sammenlignet med større molekyler. Derfor afgives hydrogen adsorberet på position D11 og D22 i γ–$Mg(BH_4)_2{\cdot}2{,}33H_2$ ved lave temperaturer ($T < 0$ °C, afhængigt af partialtryk af hydrogen).

Nye ionledende stoffer

En anden polymorf af magnesium tetrahydridoborat, α–$Mg(BH_4)_2$, har en mere tæt struktur, men kan reagere med ammoniak og danner forbindelsen $Mg(BH_4)_2{\cdot}NH_3$. Det var en stor overraskelse, at denne forbindelse har en høj magnesium ionledningsevne, $\sigma(Mg^{2+}) = 3{,}3{\cdot}10^{-4}$ Scm^{-1} (T = 80 °C), da $Mg(BH_4)_2$ selv er en isolator. Derfor blev forbindelsen $Mg(BH_4)_2{\cdot}NH_3$ underkastet en grundig undersøgelse med DFT [2]. Krystallografisk undersøgelse viser, at denne forbindelse indeholder kæder af Mg^{2+}–BH_4^-–Mg^{2+}–BH_4^-– holdt sammen af dihydrogenbindinger, N–$H^{\delta+}\cdots{}^{-\delta}$H–B, som kan dannes, når et fast stof indeholder både hydrogen bundet til et mere elektronegativt grundstof, her nitrogen, og mindre elektronegativt, som bor. Så vil det faste stof også indeholde delvist positivt ladet hydrogen, N–$H^{\delta+}$, og delvist negativt ladet hydrogen, $^{-\delta}$H–B.

DFT-beregninger viser, at dihydrogenbindingen har en bindingslængde på ~2 Å og styrke på ~20 kJ/mol. Det er det samme som den velkendte hydrogenbinding, der findes i næsten alt biologisk stof og bidrager til den tertiære struktur af proteiner og biologiske stoffers strukturelle fleksibilitet. På samme måde bidrager dihydrogenbindinger i strukturen af $Mg(BH_4)_2{\cdot}NH_3$ også til strukturel fleksibilitet, når et "ekstra" interstitielt Mg^{2+} bevæger sig igennem strukturen. Ydermere har DFT vist, at ammoniak hopper fra magnesium i gitterstrukturen og koordinerer det interstitielle Mg^{2+} og hjælper dette Mg^{2+} med at hoppe fremad i strukturen, inden det (NH_3) vender tilbage til sin oprindelige partner og det interstitielle Mg^{2+} "låner" det næste NH_3. Vi mener, at der er tale om en ny mekanisme for kationledning i fast stof (kaldet "ligand assisted

Hydrider som batterimaterialer

Inden for de seneste par år er en række nye hydrogenholdige kemiske forbindelser blevet opdaget og har vist sig at have meget høj kationledningsevne. Høj ledningsevne ved moderat temperatur af monovalente ioner, såsom Li^+ eller Na^+, er velkendt, men meget sjældent eller ikke-eksisterende for divalente kationer, såsom Mg^{2+} og Ca^{2+}. Ovenfor beskrives den delvist åbne og fleksible struktur af hydrider som en af årsagerne til den høje kationledningsevne, men der er også andre interessante egenskaber. Når man blander to kemiske stoffer, vil blandingen ofte have egenskaber svarende til gennemsnittet af de to komponenter, men hvis man blander $Mg(BH_4)_2{\cdot}NH_3$ (40%) og $Mg(BH_4)_2{\cdot}2NH_3$ (60%), så får man en komposit med sammensætningen $Mg(BH_4)_2{\cdot}1{,}6NH_3$, der har cirka 100 gange højere Mg^{2+} kation ledningsevne [3]. Det kan måske skyldes, at overfladen mellem krystallitterne har høj ledningsevne. Denne blanding er eutektisk smeltende (ved 55 °C), men smelten kan stabiliseres af elektrisk isolerende og inerte nanopartikler (for eksempel Al_2O_3), så der dannes et funktionelt nanokomposit batterimateriale.

Det interessante er, at aktiveringsenergien for kationmigration er mindre end for de rene stoffer. Derfor er ledningsevnen højere ved lave temperaturer, som ellers er meget vanskeligt at opnå. Bemærk data for $Mg(BH_4)_2{\cdot}1{,}6NH_3@Al_2O_3$ i figur 3A. Ved anvendelse af disse principper har vores forskningsgruppe ved Institut for Kemi og iNANO vist, at vi kan lave nye faststof Li^+, Na^+ og Mg^{2+} ionledere, der også kan danne basis for helt nye faststof-batterier, som også er beskrevet i ref. [4]. Figur 3B viser, at vi også har opdaget helt nye calciumborhydrider med højere ionledningsevne ved lavere temperaturer end andre kendte forbindelser.

cationic conductivity"), og har observeret noget tilsvarende for andre forbindelser [2]. Forbindelsen $MgCl_2{\cdot}2NH_3$, som ikke har dihydrogenbindinger, blev også undersøgt, og det viste sig, at det er en isolator.

Nye superledende superhydrider

Opdagelsen af superledning i forbindelsen svovltrihydrid, H_3S, ved lavere temperatur end $T_c \sim 203$ K og et ekstremt højt tryk på 200 GPa, blev starten på et "hydrid rush", hvor hydrider med højere hydrogenindhold, end man normalt kender til (kaldet "superhydrider"), blev undersøgt [5]. Et stort antal forskere har kastet sig over at forudsige nye forbindelser med et unaturligt højt hydrogenindhold ved brug af computerbaserede metoder. Disse foreslåede forbindelser har kun i meget få tilfælde kunnet fremstilles og undersøges eksperimentelt og kun under helt ekstreme tryk og lave temperaturer. Det er dog lykkedes at fremstille nogle få superhydrider af sjældne jordarter, så som lanthan decahydrid, LaH_{10}. Denne forbindelse danner en kubisk struktur, hvor lanthan er placeret i clathrat-lignende bure opbygget af 32 hydrogenatomer [6]. Bindingsafstanden mellem hydrogen, H–H, er sammenlignelig med den forventede afstand mellem H-atomer i metallisk hydrogen (ved det helt ekstreme tryk 500 GPa). Så lanthan decahydrid, LaH_{10} kan siges at være "La-doppet" metallisk hydrogen, som bliver superledende "allerede" ved et tryk på 138 GPa og en kritisk temperatur $T_c \sim 243$ K, hvor den elektriske modstand forsvinder.

Der pågår intens forskning inden for udvikling af nye superhydrider, der er stabile ved lavere tryk. Og i den forbindelse kom den forudsagte forbindelse $LaBH_8$ i fokus [7]. Denne forbindelse er beregnet til at være stabil ved 40 GPa og skulle have overgangstemperatur til superledning ved $T_c \sim 126$ K. Stoffet har også en sodalit-lignende gitterstruktur af metallisk hydrogen, hvori lanthan og bor-atomer er placeret.

Konklusion

Hydrogen er det stof, der har det højeste vægtmæssige energiindhold overhovedet (120 MJ/kg), så der er store perspektiver i at udnytte H_2 til energiopbevaring. Nye kemiske forbindelser med stort hydrogenindhold kan skabe nye muligheder for opbevaring af vedvarende energi som hydrogen i et fast stof. Inden for de sidste par år er nye "superhydrider" kommet i fokus, da de er superledende ved høje temperaturer, måske helt op til stuetemperatur. Ulempen er, at de er svære at fremstille og kun er stabile ved ekstremt høje tryk.

I dag er det velkendte litium ion-batteri nok den mest succesfulde måde til energiopbevaring, men energiindholdet er desværre cirka 80 gange mindre end benzin. Derfor er der stort fokus på at udvikle helt nye typer af batterier baseret på grundstoffer, vi har rigeligt af, såsom magnesium og calcium. Her har hydrogenholdige forbindelser kastet helt nyt lys over udviklingen af faststof-batterier, idet nogle forbindelser har ekstremt høj magnesium- eller calcium-ionledningsevne. Forskning i helt nye typer af hydrogenholdige forbindelser kan føre til nye teknologier, vi ikke kan forestille os i dag.

Acknowledgement: Danmarks Frie Forskningsfond | Tematisk forskning - Grøn omstilling via Calcium Metal Battery - CaMBat (DFF - 0217-00327B) og SOlid-State Magnesium Batteries - SOS-MagBat (9041-00226B), og Villum Fonden (VIL40717) takkes for støtte til dette videnskabelige arbejde.

E-mail:
Torben R. Jensen: trj@chem.au.dk

Referencer

1. **Ultra-dense hydrogen in small pore hydridic framework**, H. Oh, N. Tumanov, V. Ban, X. Li, B. Richter, M.R. Hudson, C.M. Brown, G.N. Iles, D. Wallacher, S.W. Jorgensen, L. Daemen, R. Balderas-Xicohténcatl, Y. Cheng, A.J. Ramirez-Cuesta, M. Heere, M. Hirscher, T.R. Jensen, Y. Filinchuk, *Nature Chemistry,* 2024. https://doi.org/10.1038/s41557-024-01443-x.
2. **The mechanism of Mg^{2+} conduction in ammine magnesium borohydride promoted by a neutral molecule**, Y. Yan, W. Dononelli, M. Jørgensen, J.B. Grinderslev, Y.-S. Lee, Y.W. Cho, R. Černý, B. Hammer, T.R. Jensen, *Phys. Chem. Chem. Phys*., 2020, 22, 9204-9209. DOI: 10.1039/D0CP00158A.
3. **Ammine Magnesium Borohydride Nanocomposites for All-Solid-State Magnesium Batteries**, Y. Yan, J.B. Grinderslev, M. Jørgensen, L.N. Skov, J. Skibsted, T.R. Jensen, *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3, 9264-9270. https://dx.doi.org/10.1021/acsaem.0c01599.
4. **På vej mod faststofbatterier**, M.B. Amdisen, T.S.S. Kjær, L.G. Kristensen, J.B. Grinderslev, L.N. Skov, T.R. Jensen, *Aktuel Naturvidenskab*, 2023, 5, 27-31.
5. **Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system.** A.P. Drodzov,M. I. Eremets, I.A. Troyan, V. Ksenofontov, and S.I. Shylin, *Nature* (London) 2015, 525, 73-76.
6. **High-temperature superconductivity on the verge of a structural instability in lanthanum superhydride**, D. Sun, V.S. Minkov, S. Mozaffari, Y. Sun, Y. Ma, S. Chariton, V.B. Prakapenka, M.I. Eremets, L. Balicas, F.F. Balakirev, *Nature Comm.*, 2021, 12, 6863. https://doi.org/10.1038/s41467-021-26706-w.
7. **$LaBH_8$: Towards high-Tc low-pressure superconductivity in ternary superhydrides**, S. Di Cataldo, C. Heil, W. von der Linden, and L. Boeri, *Phys. Rev. B* 2021, 104, L020511, DOI: 10.1103/PhysRevB.104.L020511.

OTTO – DIGITAL SERVICE FRA BUSCH

OTTO overvåger dine vakuumpumper, overalt, når som helst.

Se tilstanden af din proces eller vakuumpumper med vores digitale service.

OTTO sender automatisk beskeder til Busch i tilfælde af forstyrrelser i din proces.

Oplev fordelen af tilstandsovervågning.

Busch Vakuumteknik A/S
87 88 07 77
info@busch.dk
www.buschvacuum.com

BUSCH
VACUUM SOLUTIONS

Kan koen blive klimavenlig?

Køer og andre drøvtyggere producerer metan, men gennem fodringsstrategier kan emissionen reduceres.

Af Peter Lund[1], Ole Højberg[1], Christian F. Børsting[1], Mette Olaf Nielsen[1], Trine Willumsen[2] og Martin R. Weisbjerg[1]

[1] Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab, Aarhus Universitet
[2] Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, Aarhus Universitet

Foto: Wikimedia.

Drøvtyggere (kvæg) er i langt højere grad end enmavede dyr (grise) afhængige af mikroorganismer i mave-tarmkanalen for at omsætte og udnytte deres foder. Vommen fungerer således som en bioreaktor, hvor mikroorganismerne nedbryder svært tilgængelige, strukturelle kulhydrater (fibre) og mere let nedbrydelig stivelse til mindre sukkerenheder, der efterfølgende forgæres til organiske syrer - især eddikesyre, propionsyre og smørsyre. Disse kortkædede fedtsyrer optages så over vomvæggen og indgår i koens stofskifte.

Ved forgæringsprocesserne dannes der også kuldioxid (CO_2) og brint (H_2). Med udgangspunkt i glukose ($C_6H_{12}O_6$) kan følgende forgæringsligninger opskrives:

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2 \quad \text{Eddikesyre}$$

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O \quad \text{Propionsyre}$$

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2 \quad \text{Smørsyre}$$

Ved dannelsen af propionsyre forbruges brint, mens der ved dannelsen af eddikesyre og smørsyre dannes både kuldioxid og brint. Hvis den dannede brint ophobes i vommen, kan den, på grund af termodynamiske forhold, hæmme visse forgæringsprocesser og dermed koens foderudnyttelse. En særlig gruppe bakterielignende mikroorganismer, såkaldte metandannende arkæer eller blot metanogener, kan imidlertid omdanne kuldioxid og brint til metan (CH_4) ved følgende proces:

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

I modsætning til brint påvirker den dannede metan ikke processerne i vommen, men den kan heller ikke omsættes, og afgår derfor gennem munden via opræbning eller udånding, mens en mindre del af det metan, der dannes ved forgæring i blind- og tyktarm, udskilles via anus. Den succesfulde symbiose mellem koen og forskellige typer af mikroorganismer, som igennem evolutionen har udviklet sig i vommen, har været til gavn for koen i forhold til at kunne udnytte svært nedbrydelige kulhydrater. En højtydende malkeko producerer dagligt cirka 700 liter metan og det udskilte metan er dels tab af energi for dyret og desuden et velkendt problem for klimaet. Emission af metan fra mave-tarm-systemet (kaldet enterisk metan) fra kvæg udgør således omkring en tredjedel af udledningen af de direkte landbrugsmæssige drivhusgasser (metan og lattergas) i Danmark, og er dermed den klart største enkeltkilde i landbruget.

Hvordan måler man emission af metan?

Når en række fodermidler eller foderadditiver skal evalueres for deres potentielle metanreducerende effekt, vil dette ofte først ske i laboratorieforsøg (in vitro), inden de afprøves i dyreforsøg (in vivo). I sådanne laboratorieforsøg efterlignes omsætningen i koens vom. Dette gøres ved, at en given mængde foder inkuberes sammen med vomvæske, buffer og eventuelt foderadditiv under iltfrie forhold og ved 39°C i små glasflasker. Mængden af produceret metan registreres løbende og denne metode giver mulighed for screening af mange forskellige fodermidler eller foderadditiver på én gang.

Den daglige produktion af enterisk metan fra dyr måles typisk i såkaldte respirationskamre, som for eksempel er beskrevet detaljeret for mere end 100 år siden af Mølgaard & Andersen (1917) [1]. Metoden er baseret på, at koen opbindes i et lukket kammer, som i vores udgave er en stor kasse beklædt med transparente polycarbonatplader (figur 1). Ud fra koncentrationen af metan i indsugnings- og afgangsluft samt mængden af luft som suges ud af respirationskammeret per tidsenhed, er det muligt løbende at beregne produktionen af enterisk metan fra det pågældende dyr. Dette system giver mulighed for måling af enterisk metan fra fermentering både i vommen og i blind- og tyktarmen, samt beregning af tidsserier for produktionen af metan, for eksempel hen over døgnet.

Denne målemetode giver samlet set mulighed for meget præcise målinger om end på et lille antal dyr, og betegnes som "Golden standard" inden for måling af emission hos husdyr.

Der er imidlertid ofte behov for måling på et betydeligt højere antal

dyr, og til dette anvendes ofte et system kaldet GreenFeed. Det er en avanceret kraftfoderautomat, hvor koen tildeles en lille portion kraftfoder som lokkemad, og hvor mængden af produceret metan samtidig måles. Denne metode måler ikke produktionen af metan kontinuerligt som i respirationskamrene, men er afhængig af, at antallet af besøg er tilstrækkeligt til, at målingerne af metan er repræsentative for et helt døgns emission. Metoden måler kun metan udskilt gennem munden, og vil derfor svagt underestimere den samlede produktion af metan fra koens omsætning af foderet.

Reduktion i enterisk metan via ændring i rationens sammensætning

Reduktion af enterisk metan kan ske ved at optimere på egenskaberne af visse komponenter af koens foderration, som vil blive beskrevet i det følgende.

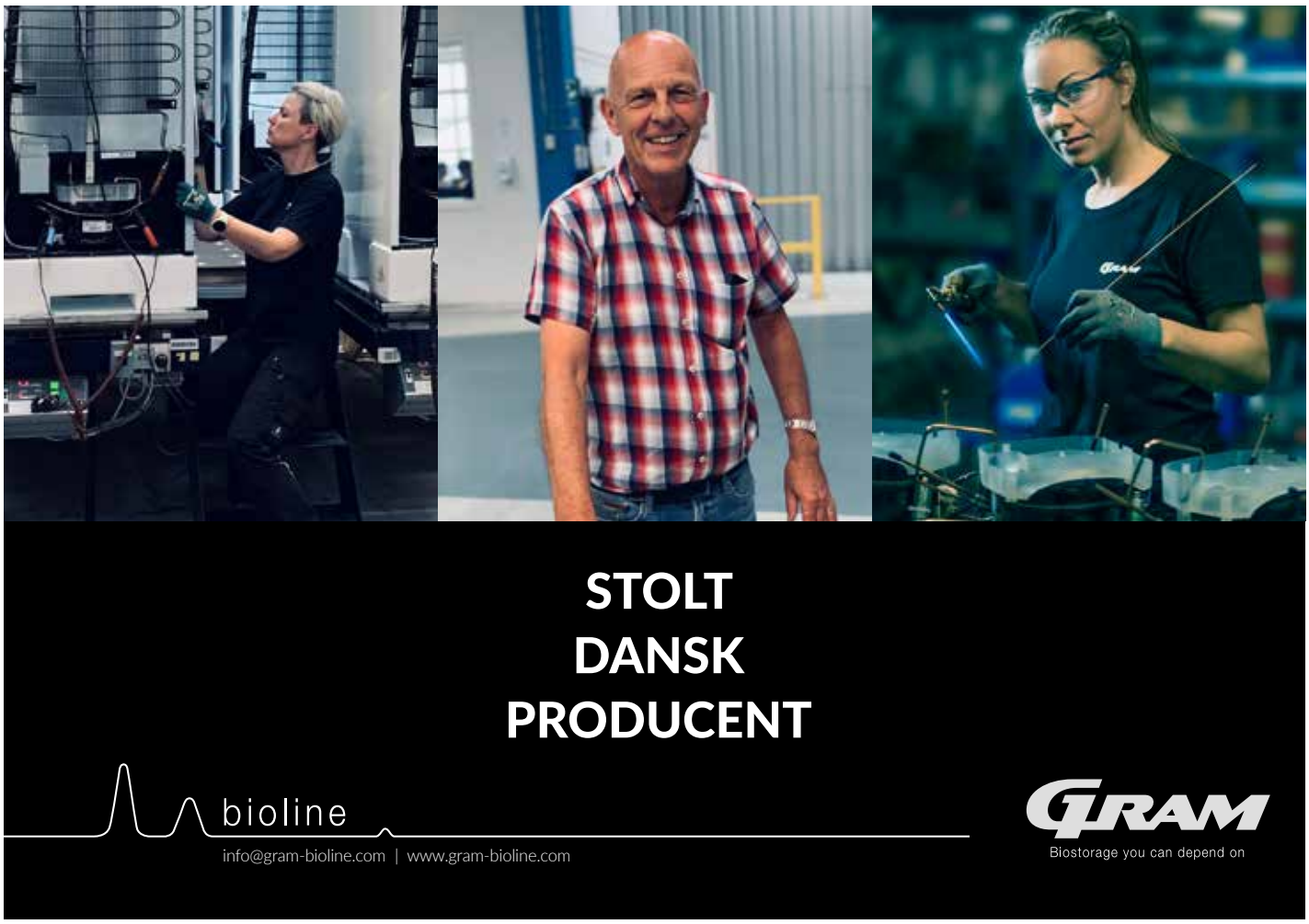
Fedt

Fedtsyrer forgæres ikke i vommen, og ombytning af fermenterbart organisk stof som for eksempel stivelse eller fiber

Figur 1. Malkekøer i respirationskamre på Institut for Husdyrvidenskab, Aarhus Universitet.

med fedt vil derfor direkte reducere produktionen af enterisk metan. Samtidig har fedt en inhiberende effekt på særligt de fibernedbrydende og metanproducerende mikroorganismer i vommen. Da fermentering af fiber hovedsageligt er koblet til produktionen af eddikesyre, vil denne inhibering medføre et fald i produktionen af brint og kuldioxid og dermed mindre substrat for metanogenerne, jf. overstående reaktionsligninger.

På tværs af en række forsøg er det beregnet, at 20 gram fedtsyrer per kilo fodertørstof kan reducere produktionen af enterisk metan med cirka 8 procent. Om dette fedtniveau er økonomisk optimalt, afhænger af forholdet mellem prisen for tilskudsfedt, mælk og i fremtiden også klimagasser. I Danmark anvendes blandt andet palmefedt og danskavlede rapskager. Klimaaftrykket af palmefedt er cirka det tredobbelte af rapskager, hvis klimaeffekten af regnskovsrydningen regnes ind. Ved brug af importeret palmefedt i stedet for danskavlede rapskager vil den nationale emission således reduceres væsentligt, mens den globale emission kun vil blive reduceret lidt eller eventuelt være uforandret, da reduktionen i produktionen af enterisk metan helt eller delvist modsvares af øgede emissioner ved dyrkning af palmefedt.



Grovfodertype
Som nævnt hænger produktionen af enterisk metan blandt andet sammen med nedbrydning af foderets fibre i vommen. Hvis græs høstes på et tidligt udviklingstrin og med et lavere indhold af fibre, så falder produktionen af enterisk metan per kilo fodertørstof. Hvis græsensilage, som indeholder meget fiber, erstattes af majsensilage, som indeholder meget stivelse, sker der en forskydning i forgæringsprocesserne i vommen, således at der produceres forholdsvis mere propionsyre og mindre eddikesyre, og dermed er der også mindre brint til rådighed for metanogenerne. Men når der også tages hensyn til, at klimaaftrykket er lavere ved dyrkning af græs end majs, så bliver det samlede klimaaftryk nogenlunde det samme, omend det samlede klimaaftryk er meget afhængigt af udbytteforholdet mellem dyrkning af græs og majs.

Forholdet mellem grovfoder og kraftfoder
En udskiftning af fiberrigt grovfoder med kraftfoder vil medføre, at produktionen af enterisk metan reduceres. Dette skyldes, at kraftfoder typisk indeholder mere fedt og stivelse end grovfoderet, hvorved forgæringsmønsteret i vommen ændres mod en højere andel propionsyre og en mindre andel eddikesyre, hvilket jf. ovenstående ligninger medfører mindre brint, som ellers ville indgå i dannelsen af metan. For at køerne kan opretholde deres normale drøvtygningsfunktion, er der dog grænser for kraftfoderets andel af rationen.

Reduktion i enterisk metan via brug af foderadditiver

3-Nitrooxypropanol
3-Nitrooxypropanol (3-NOP) er en kemisk forbindelse, som har vist sig effektiv til at reducere produktionen af enterisk metan med op til 30 procent hos malkekøer under danske forhold. Stoffet hæmmer et særligt enzymsystem, som kun findes i de metanogene mikroorganismer, og det vil derfor ikke hæmme de bakterier, der er ansvarlige for forgæringen i vommen. Stoffet er netop blevet godkendt i EU under navnet Bovaer og kan derfor nu tages i brug på konventionelle bedrifter, men det vil sandsynligvis ikke blive en accepteret mulighed i den økologiske produktion.

Nitrat
Nitrat er en anden forbindelse, som kan reducere produktionen af enterisk metan. Her er den primære virkningsmekanisme imidlertid anderledes end for 3-NOP. Nitrat omsættes således af særlige bakterier i vommen til ammoniak ved en proces, hvor der forbruges brint, som dermed ikke er tilgængelig for de metanogene mikroorganismer. Den dannede ammoniak vil efterfølgende kunne indgå i den mikrobielle proteinsyntese i vommen. Brugen af nitrat kan føre til øget kvælstofudledning i gødningen, hvis ikke rationens øvrige proteinkilder reduceres tilsvarende. Desuden kan nitrat omdannes til nitrit, som potentielt kan hæmme hæmoglobins evne til transport af ilt i dyret. Vores forsøg tyder dog på, at denne bekymring er ubegrundet.

Tang/makroalger
Der arbejdes forskellige steder i verden på at udvikle dyrkningssystemer til en tropisk makroalge ved navn Asparagopsis. Denne alge har i forsøg kunnet hæmme emissionen af metan fra vommen hos stude og får med op til 90 procent. Malkekøer er mere følsomme over for påvirkning af vommiljøet, og hos malkekøer har man ikke kunnet reducere emissionen af metan med mere end 30 procent, før det begyndte at give markant negative udslag på foderoptagelse og mælkeydelse.

De bioaktive stoffer i Asparagopsis, der hæmmer dannelsen af metan i vommen, er såkaldte halometaner, som for eksempel bromoform og kloroform, som det ikke er specielt ønskværdigt at få ind i fødekæden. Det er imidlertid tilladt at anvende alger, herunder Asparagopsis, som foder til drøvtyggere i EU, og Asparagopsis er på nuværende tidspunkt reelt det eneste foderadditiv, bortset fra fedt, der vil kunne udnyttes i økologisk jordbrug til at reducere metan. Begrænsningen her og nu er at levere tilstrækkelige mængder til markedet. Dansk forskning har vist, at der findes andre arter af makroalger, der er naturligt forekommende, som kan dyrkes på vore breddegrader, og som har en vis metanreducerende effekt og som ikke indeholder førnævnte halometaner.

Stof X
Danske foderstofvirksomheder arbejder på at få patenteret et stof, kaldet X, der har vist sig at kunne reducere aktiviteten af metanogenerne. Stof X virker sandsynligvis ved at blokere et nøgleenzym hos metanogenerne, der er nødvendigt for at danne metan ud fra kuldioxid og brint. Der er på nuværende tidspunkt udført tre intensive forsøg med malkekøer i Danmark, og på den baggrund er det realistisk at forvente, at stof X vil kunne reducere emission af metan fra malkekøer med 30-40 procent uden at påvirke køernes mælkeydelse og foderoptagelse negativt. Der vil formodentlig gå et par år, før stoffet har været igennem den nødvendige godkendelsesproces. Der er dog stor optimisme i forhold til, at godkendelsen vil blive givet, da stoffet allerede er godkendt til brug i fødevareindustrien, bare ikke som foderadditiv.

Brint er en udfordring
En af udfordringerne ved flere af de meget potente metanreducerende foderadditiver er, at reduktionen i metan er ledsaget af en markant øgning i produktionen af brint i vommen, og der forskes i, om dette har sammenhæng til de markante fald i foderoptagelse, som er set ved brug af flere af disse foderadditiver i høje koncentrationer. En hypotese er, at ophobningen af brint i vommen har en negativ tilbagekobling på den mikrobielle fermentering, som dermed går langsommere, hvorved også foderoptagelsen reduceres. En anden hypotese er baseret på, at metanogenerne omsætter fem gasmolekyler (fire brint og en kuldioxid) til et gasmolekyle (metan), og når denne reaktion hæmmes, sker der rent volumenmæssigt en øget ophobning af gas i vommen, som er til gene for koen enten direkte fysisk eller fysiologisk via ændring i de fysiske og kemiske ligevægte i vommen.

Konklusion

Som beskrevet findes der forskellige strategier for at reducere køers metanemission via foder og foderadditiver. Men ud over foder, spiller genetik også ind på metanemissionen. Disse nedarvede egenskaber har blandt andet indflydelse på vommens kapacitet og foderets opholdstid i vommen og dermed fordøjelsen i vommen, og hvorledes forskellige typer af mikroorganismer klarer sig i vommen. Flere studier, blandt andet i Danmark, har vist, at der er en arvbarhed på omkring 0,2 for metanproduktion hos malkekvæg. Så hvor tilsætning af effektive foderadditiver giver en øjeblikkelig effekt på produktionen af enterisk metan, er avl efter køer, der producerer mindre metan, en langsommere proces. Denne artikel er en modificeret version af en artikel, der tidligere har været bragt i Vand & Jord.

E-mail:
Peter Lund: peter.lund@anivet.au.dk

Referencer
1. Møllgaard, H. & A.C. Andersen (1917): Et pettenkofersk respirationsapparat til forsøg med malkende kvæg. Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole Aarsskrift 1917, 195-307.

Fremtidens CO_2-fangst

På Teknologisk Institut har et nyt Carbon Capture-anlæg set dagens lys - det første modulære laboratorium dedikeret til at teste og forfine teknologier til solventbaseret CO_2-fangst og -rensning.

Foto: Teknologisk Institut.

Carbon Capture Lab er et modulært laboratorium designet til at teste alle faser af fangstprocessen.

Af Anne Mette Frey,
sektionsleder, Teknologisk Institut

I fremtiden bliver det afgørende at indfange CO_2-gas fra store udledere for enten at lagre den under jorden eller anvende den til at fremstille brændstoffer, plastik og andre kemikalier. Indfangning af CO_2 fra røggasser før frigivelse i atmosfæren kræver avancerede teknologiske processer. Det nyligt indviede Carbon Capture Lab på Teknologisk Institut sigter mod at støtte udviklingen af effektive Carbon Capture-løsninger med fokus på næste generations teknologier.

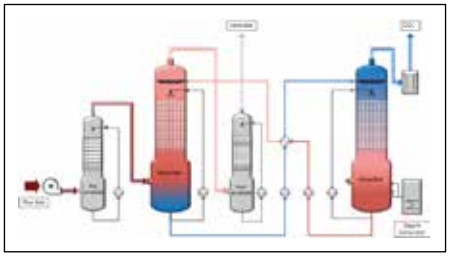
Solventbaseret anlæg med fokus på energioptimering

Carbon Capture Lab er baseret på solventteknologi og kan håndtere forskellige væsketyper som aminer og kaliumkarbonatsystemer til at absorbere CO_2 fra røggas. Fremtiden byder på undersøgelser af diverse solventsammensætninger og additiver. Teknologisk Institut vil blandt andet undersøge solventernes levetid, skumdannelse samt reduktion af sundhedsskadelige nedbrydningsstoffer fra solventet.

Energioptimering af fremtidens fangstteknologier er lige så vigtig. Carbon Capture er en energikrævende proces, og teknologier, der reducerer desorptionstemperaturen på solventet for at mindske energiforbruget, vil være i fokus på Carbon Capture Lab.

Industriens teknologiske testfacilitet

Carbon Capture Lab er et modulært laboratorium designet til at teste alle faser af fangstprocessen. Valget med et modulært design er ikke tilfældigt. Virksomhederne får med den opbygning mulighed for at afprøve nye teknologienheder. De kan både teste renseteknologier, solventer, måleudstyr, håndtering af CO_2, pumper eller andre komponenter med forskellige fokusområder.



Skitse over de enkelte elementer af fangstanlægget. Virksomhederne kan både teste renseteknologier, solventer, måleudstyr, håndtering af CO_2, pumper eller andre komponenter med forskellige fokusområder.

Når industrien bruger Capture Capture Lab til at teste deres fangstteknologier, kan de også få afdækket muligheder for reduktion af energiforbrug, fangstmaterialets levetid, CO_2'ens renhed og en lang række andre teknologiske udfordringer og dermed få minimeret risiko på større anlægsprocesser eller opbygget viden.

Et stærkere beslutningsgrundlag

For industrien er det en unik mulighed at afprøve løsninger i en håndterbar og økonomisk rentabel skala, tilpasset den enkelte virksomheds behov. Anlægget kan derfor bidrage til at optimere industrielle applikationer og minimere risikoen ved investeringer i store og omkostningstunge anlæg.

E-mail:
Anne Mette Frey: amfr@teknologisk.dk

Fakta om anlægget

CO_2 fangstanlægget er koblet til en CO_2-kilde. I første omgang er det en biomassekedel til simulering af CHP-anlæg, men kan erstattes med andre CO_2 punktkilder som for eksempel en motor eller et naturgasfyr. Røgen renses for partikler via et elektrostatisk filter. Efter rensningen ledes den igennem en pre-scrubber, hvor svovlforbindelser bliver fjernet, inden den introduceres i absorberen. I absorberen trækkes CO_2 ud af røggassen og over i solventet, som risler ned over røggassen. CO_2'en er nu opfanget. Den CO_2-frie røggas føres ind i en post-scrubber, hvor røggassen behandles. Eventuelle rester af solvent og nedbrydningsprodukter opfanges, inden den rensede røggas ledes ud. Solventet, som nu indeholder CO_2, ledes herfra ind i en desorber, hvor den opvarmes og CO_2 frigives, hvorefter den kan renses, komprimeres eller anvendes direkte. Solventet, som nu er frit for CO_2, ledes tilbage til absorberen, hvor det opsamler ny CO_2.

Halm som brændselskilde

Store mængder af kul, olie og naturgas kan forblive i jorden ved anvendelse af halm i kraftvarmeværker.

Af Frans W. Langkilde[1], Søren Brøgger Christensen[2], Gustav von Rosen[3] og Sten Scheibye[4]

[1] Katrinedal I/S, 4780 Stege
[2] Institut for Lægemiddeldesign og Farmakologi, Københavns Universitet
[3] Rudbjerggård, 4983 Dannemare
[4] Bøged Skov, 4720 Præstø

Foto: Wikimedia.

I fortsættelse af artikler i Dansk Kemi om landbrugets [1] og skovbrugets [2] klimapåvirkning, og om hvordan halm og træflis substituerer fossile brændsler, vil vi i nærværende artikel kvantificere denne substitution.

Halmens substitution af fossile brændsler

CO_2 bindes via fotosyntesen i planter og omdannes til sukker, stivelse og cellulose. Ved konventionel dyrkning på god jord yder en hvedemark 10 tons kerne og godt 5 tons halm per hektar per år. I kernen opbygges stivelse og protein svarende til binding af cirka 3,8 tons kulstof (C) eller cirka 14 tons CO_2 ækvivalenter (CO_2e) per hektar per år. I halmen opbygges cellulose og lignin svarende til binding af cirka 2,2 tons C eller cirka 8 tons CO_2e per hektar per år. Hvis halmen bjærges og leveres til et varmeværk, vil de 8 tons CO_2e frigøres til atmosfæren, men igen optages af planter i naturens kulstofcyklus. Ved afbrænding af halm og andre planteprodukter som træflis genoptages CO_2 ved fornyet dyrkning. Ved afbrænding af fossile brændsler som naturgas, olie og kul forøges mængden af CO_2 i atmosfæren. Da halmen substituerer fossile brændsler, kan disse forblive i undergrunden. Derved undgås det, at CO_2 fra fossile kilder udledes til atmosfæren, antagelig den vigtigste årsag til menneskeskabt global opvarmning.

Nedenstående beregninger viser, hvor store mængder af fossile brændstoffer som substitueres, når et varmeværk producerer el og varme fra halm eller andre af landbrugets restprodukter. Tabel 1 er baseret på en tabel over brændværdier fra Energistyrelsen [3]. I en anden publikation fra Energistyrelsen [4] findes lignende tal.

Referencerne indeholder også værdier for CO_2-udledning i (kg CO_2)/enhed. I tabel 1 er der ikke værdier for CO_2-udledning for træpiller og træflis, da disse afhænger af vandprocenten (ligeledes for brændværdien i øvrigt). For halm er den frigjorte mængde af CO_2 på 1.600 (kg CO_2)/ton sat til den mængde af CO_2, der blev optaget, da halmen dannedes på marken. Værdien for stenkul på 3.664 (kg CO_2)/ton er beregnet ud fra (molmasse CO_2) og (molmasse C), altså for rent kulstof.

For kul varierer værdierne for brændværdi og CO_2-udledning mellem elværkskul, stenkul og koks [3,4]. Det afhænger antageligt af arten og mængden af gasser i materialet. Værdien 3.664 (kg CO_2)/ton for rent C ligger over værdierne for både stenkul og koks.

Ifølge tabel 1 har 5 tons halm (fra 1 hektar i 1 år) en brændværdi på 5 x 4.028 = 20.140 kWh. Det svarer til 20.140/11.300 = 1,78 tons fuelolie. Disse udleder 1,78 x 3,173 = 5,655 tons CO_2. Når hvedehalm fra 1 hektar erstatter fuelolie, substitueres 5,655 tons CO_2e af fossil oprindelse med CO_2 frigjort fra plantemateriale.

Ved afbrænding af halm i stedet for naturgas, undgås det, at 20.140/11.000 x 2,245 = 4,11 tons CO_2e af fossil oprindelse udledes.

For stenkul giver beregningen, at 20.140/7.360 x 3,664 = 10,03 tons CO_2e af fossil oprindelse undgås. For koks er tallet 7,83 tons CO_2e; denne værdi er nok mere pålidelig end den for stenkul.

Når hvedehalm fra 1 hektar i 1 år erstatter fossile brændsler i et varmeværk, undgås udledning til atmosfæren af 4-8 tons CO_2e af fossil oprindelse i rækkefølgen naturgas, fuelolie, kul/koks. Det undgås at afbrænde 1,54 tons naturgas (20.140/11.000 x 0,840 ton), 1,78 tons fuelolie eller 2,47 tons koks. Hermed konverteres binding af CO_2 i en etårig afgrøde til binding i undergrunden i tusinder af år. Disse betragtninger indgår ikke i beregninger af landbrugets CO_2-regnskab,

måske fordi FN's klimaorgan IPCC har valgt at se bort fra CO_2-bindingen i etårige afgrøder [5,6]. Tilsvarende beregninger kan udføres for brænde, træflis eller træpiller. Træ har en højere vandprocent end halm; det mindsker både brændværdi og CO_2-udledning per ton.

Tabel 1 viser også kWh/(kg CO_2). Værdierne i søjle 6 er beregnet ved division af værdierne i søjle 4 med værdierne i søjle 5 og ligger højest for naturgas og lavere for halm. Dette forhold får nogle debattører til fejlagtigt at hævde, at naturgas og olie er mere klimavenlige brændsler end halm. De overser, at CO_2 fra naturgas og olie er af fossil oprindelse, mens halmens CO_2 er hentet ned fra atmosfæren samme år.

Implikationer for anvendelsen af halm og andre biobrændsler

Produktion og anvendelse af kornhalm i Danmark er vist i tabel 2 [7]. Det dækker altså alle jordtyper og dyrkningsmetoder. Kun en mindre del af halmen anvendes direkte til energiformål. En del af den halm, som anvendes til hakkelse eller dybstrøelse, går via biogas til energiformål. En stor del af halmen bjærges ikke. Det er altså muligt at forøge brugen af halm til bæredygtig energi, eventuelt via biogas for den del, som er af dårligst kvalitet. Halmmængden kan også øges ved valg af sorter og afgrøder, for eksempel vintersæd (raps, hvede, byg) i stedet for efterafgrøder. Nedmuldning af halm kan have positive effekter på jordstrukturen, men klima-

Foto: Wikimedia.

effekten ved sekvestrering (opbygning af C i jorden) er lille [8].

De principper, som er fremført for halm som energikilde, gælder ligeledes for brænde og træflis. I 2022 var det samlede danske elforbrug 35,2 TWh. Det samlede forbrug af naturgas, ekskl. bionaturgas, dvs. af fossil naturgas, var 13,44 TWh. Den samlede halmmængde i tabel 2, inkl. rapshalm, er 6,03 millioner tons. 6,03 millioner tons x 4.028 kWh/ton halm giver 24,3 TWh. Hvis brænde og træflis inkluderes, er det tæt på, at Danmarks forbrug af el kan erstattes med klimaneutrale brændsler. Med halm alene dækkes forbruget af fossil naturgas næsten to gange med klimaneutrale brændsler. Tankevækkende.

Klimagevinsten ved anvendelse af halm i et varmeværk overses stort set i den offentlige debat, også i den aktuelle diskussion om pyrolyse/biochar. På baggrund af ovenstående betragtninger konkluderer vi, at IPCC's beslutning om ikke at inkludere etårige afgrøder i deres beregninger har konsekvenser, som direkte kan skade klimaet. I vores optik er IPCC's regneregler netop regneregler, som bør vurderes kritisk ved udvikling af et lands strategi på klimaområdet.

Konklusion

Udnyttelse af halm til energiformål kan forhindre anvendelse af fossilt kul, olie og naturgas. I beregningen af landbrugets CO_2-belastning burde udnyttelse af halm og biogas (og brænde og træflis) til energiformål indregnes i landbrugets CO_2-regnskab. Det ville gøre en reel forskel for det globale klima og motivere samfundet til at optimere anvendelsen af landbrugets restprodukter til fremstilling af grøn energi, samt udfase fossile brændsler. Det burde kunne få politikere, meningsdannere, beslutningstagere og mange forskere til at forstå denne betydelige del af Danmarks virkelige klimaregnskab.

E-mail:
Frans W. Langkilde:
franswlangkilde@outlook.dk
Søren Christensen:
soren.christensen@sund.ku.dk

Brændsel/ energiform	Enhed	Vægt i kg	kWh/enhed (ton[a]) [3]	(kg CO_2)/enhed (ton[a]) [3]	kWh/(kg CO_2)
Halm	1 ton	1.000	4.028[b]	1.600[c,d]	2,52
Træpiller	1 ton	1.000	4.861		
Træflis	1 ton	1.000	2.600		
Fuelolie	1 ton	1.000	11.300	3.173	3,56
Naturgas	1.000 m^3	840	11.000	2.245	4,90
Stenkul	1 ton	1.000	7.360	3.664[d]	2,01
Koks	1 ton	1.000	8.140	3.165	2,57

[a] For naturgas 840 kg. [b] 15% vand. [c] 12% vand. [d] For halm og stenkul er CO_2-værdien beregnet.

Tabel 1. Brændværdi (kWh) og CO_2-udledning (kg CO_2) for forskellige brændsler [3].

Total Mio. ton per år	Anvendelse til energi	Føde til dyr (hakkelse)	Dybstrøelse	Ikke bjærget	Rapshalm, total (ikke medregnet)
5,46	1,56	0,83	0,86	2,20	0,57

Tabel 2. Produktion og anvendelse af kornhalm i Danmark. Gennemsnit for årene 2016, 2017, 2019, 2020 [7]. Året 2018 er udeladt i [7].

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. Energistyrelsen, Håndbog for Energikonsulenter (HB2023). Ebergistyrelsen, Ed. Energistyrelsen: https://hbemo.dk/vejledning/tabeller-og-vaerktoejer-hb2023/braendvaerdier-og-co2-emissionsfaktorer, 2023.
4. Energistyrelsen, 2022 Data, tabeller, statistikker og kort. Energistatisik 2022. Energistyrelsen, Ed. 2022.
5. Lasco, R.D.; Ogle, S.; Raison, J.; Verchot, L.; Wassmann, R.; Yagi, K.; Bhattacharya, S.; Brenner, J.S.; Daka, J.P.; González, S.P.; Krug, T.; Li, Y.; Martino, D.L.; McConkey, B.G.; Smith, P.; Tyler, S.C., *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories, Agriculture, Forestry and other Land Use*. IPCC: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html, 2006; Vol. 4 Kap. 5.1.
6. Working Group III, Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. ipcc, Ed. ipcc: 2022. https://report.ipcc.ch/ar6/wg3/IPCC_AR6_WGIII_Full_Report.pdf.
7. Elsgaard, L.; Adamsen, A.P.S.; Møller, H.B.; Winding, A.; Jørgensen, U.; Mortensen, E.Ø.; Arthur, E.; Abalos, D.; Andersen, M.N.; Thers, H.; Sørensen, P.; Dinessa, A.A.; Eofson., K. *Knowledge synthesis on biochar in Danish Agriculture. DCA report No. 208*; Aarhus University: 2022.
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.

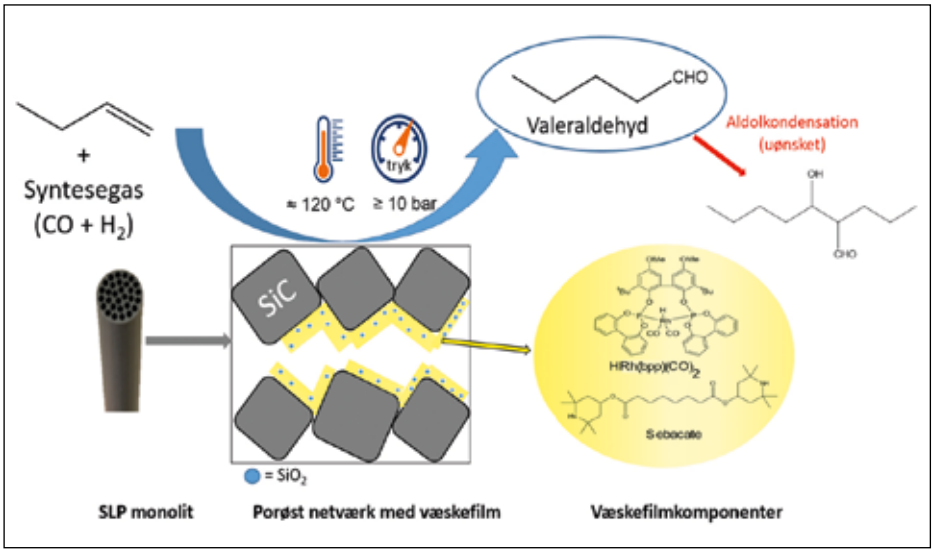
MACBETH:

Banebrydende reaktorsystem gør industriel kemikalieproduktion mere bæredygtig

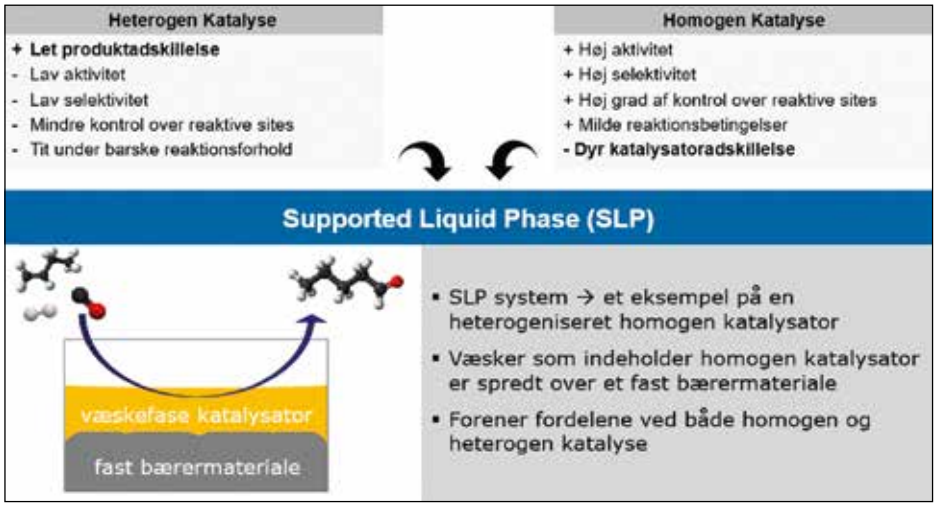
Anvendelse af en ny type katalytisk membranreaktor giver 70 procent øget energieffektivitet samt store CO_2-besparelser for den kemiske industri i produktionen af storskalakemikalier.

Af Leonhard Schill, seniorforsker, Mahtab Madani, ph.d.-studerende, Rasmus Fehrmann, professor emeritus og Anders Riisager, professor, DTU Kemi

Den kemiske industri bidrager betydeligt til drivhusgasudledningen i EU. I MACBETH-projektet udvikles en innovativ løsning til mere klimavenlig produktion af organiske aldehyder med et "Supported Liquid Phase (SLP)"-materiale i en katalytisk membranreaktor. Langtidstests med reaktorsystemet udføres i et industrielt demonstrationsanlæg til at producere valeraldehyd (n-pentanal). Valeraldehyd er et storskalakemikalie og indgår som bestanddel i en række produkter i for eksempel medicinal-, fødevare- og plastindustrien.



Figur 1. SLP-katalysatorsystem til hydroformylering af 1-buten til valeraldehyd.



Boks 1. Fordele og ulemper ved homogen og heterogen katalyse samt princippet for SLP-katalyse.

Drivhusgasudledning fra kemisk industri

De fleste danskere er meget bevidste om nødvendigheden af en grøn omstilling i energiproduktionen og transportsektoren. Der er mindre fokus på klimavenlige teknologier til den kemiske industri, selvom sektorens udledning af drivhusgasser i EU i 2021 var 125 millioner tons CO_2-ækvivalenter [1], hvilket svarer til næsten tre gange Danmarks samlede årlige udledning [2].

En betydelig del af udledningen af drivhusgasser i kemisk produktion - herunder specielt CO_2 - skyldes anvendelse af energitunge enhedsoperationer som for eksempel destillation til at afdampe vand og adskille væskeblandinger. Et godt eksempel på dette er storskala-

produktionen af valeraldehyd. Hvert år produceres der op mod 7 millioner tons valeraldehyd, som primært bruges til at lave plastblødgørere, gummiprodukter og smags- og aromastoffer. I de kommende år forventes produktionen at vokse yderligere, da markedet for disse produkter er stødt stigende.

Aldehyd-produktion med hydroformylering

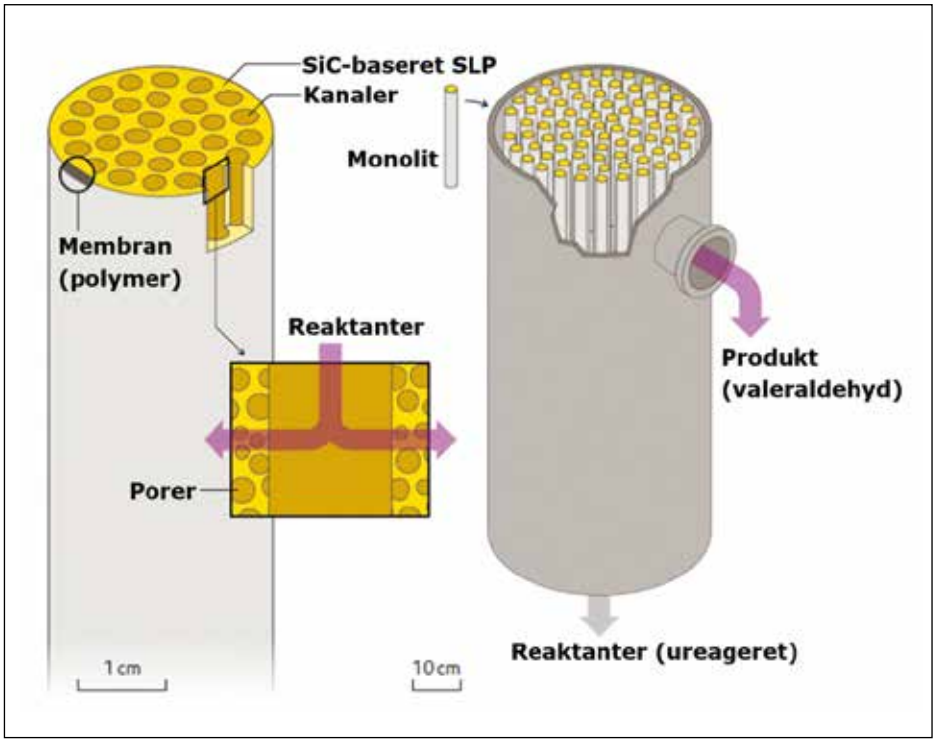
Valeraldehyd fremstilles industrielt ved hydroformylering, som er en reaktion, der omdanner olefiner (alkener) med syntesegas (CO og H_2) til aldehyder. Reaktionen forløber normalt under betingelser, hvor et katalytisk aktivt metalkompleks (typisk Rh-kompleks) er opløst i et organisk opløsningsmiddel. Efter reaktionen forbliver valeraldehyd opløst i selvsamme opløsningsmiddel, og det nødvendiggør den energitunge adskillelse ved destillation. Denne type produkt/katalysator adskillelse er en meget generel metode benyttet for homogent katalyserede reaktioner, se boks 1.

Klimaaftrykket fra destillation kunne i princippet reduceres ved brug af varmepumper eller andre typer af systemer, som benytter grøn energi, men der findes også alternative muligheder for at reducere energiforbruget og dermed klimaaftrykket, og det er netop sådan en løsning, der udvikles i det EU-støttede projekt MACBETH (Membranes And Catalysts Beyond Economic and Technological Hurdles) [3].

MACBETH-teknologien

I MACBETH benyttes en teknologi, der består af to dele. For det første bruges der en såkaldt "Supported Liquid Phase" (SLP)-katalysator, som er en speciel type fast homogen katalysator [4]. Her drages nytte af fordele fra både heterogen- og homogen katalyse, idet produkt/katalysator separation muliggøres (typisk for heterogen katalyse), uden at gå på kompromis med høj aktivitet og selektivitet ved relativt lave temperaturer (typisk karakteristika for homogen katalyse).

SLP-type katalysatorer baseret på saltsmelter benyttes allerede industrielt til flere vigtige processer (for eksempel svovlsyreproduktion) under høje reaktionstemperaturer og specielle betingelser [5]. I MACBETH udvikles en anderledes lav-temperatur SLP-katalysator indeholdende et Rh-phosphit metalkompleks opløst i en ikke-flygtig amin (sebacate), som smelter ved 85°C. Denne væske har et ubetydeligt lavt damptryk ved den typiske temperatur for industriel hydroformylering på 110-130°C.



Figur 2. Illustration af monolit SLP-katalysator med membran og reaktordesign (modificeret med tilladelse fra [6]).

Væsken indeholdende metalkomplekset er fordelt på et keramisk materiale udformet som en monolitisk struktur, se figur 1. Monolitten består af siliciumkarbid (SiC) pålagt silica (SiO_2) nanopartikler. Dette lag har en multimodal porestørrelsesfordeling, hvor mindre porer (2-30 nm) giver det nødvendige overfladeareal til spredning af væsken, mens de større porer (cirka 15 µm) sikrer effektiv transport af de gasformige reaktanter og produkter til og fra væsken. Makroskopisk er katalysatoren (monolitten) derfor en fast fase, mens reaktanter og produkter befinder sig i gasfasen under reaktionsbetingelserne, hvilket eliminerer behovet for den energikrævende adskillelse af valeraldehyd fra katalysatorsystemet.

En udfordring med SLP-katalysatoren er, at en del af valeraldehyd-produktet kan undergå reaktion med sig selv og danne højtkogende aldol-produkter. Disse molekyler kondenserer delvist i monolittens porøse netværk og deaktiverer katalysatoren over tid. For at reducere aldol-dannelsen kommer den anden del af teknologien i spil. Her kombineres den katalytiske reaktion i monolitten med kontinuerlig fjernelse af produktet under reaktionen gennem en membran, der er pålagt monolitten udvendigt. Dette danner en såkaldt katalytisk membranreaktor. Denne kombination fører således til effektiv fjernelse af valeraldehyd fra monolitten, hvilket nedsætter aldol-dannelsen betydeligt.

Optimering af SLP-katalysatoren og membranen

I projektet er det porøse netværk i monolit-katalysatoren blevet optimeret ved at justere både mængden og størrelsen af de mindre porer (2-30 nm) i silica-laget. En speciel termisk forbehandling af monolitten resulterede også i betydelig reduktion af de højtkogende aldol-produkter og en tilsvarende forbedring af katalysatorens stabilitet [4]. Denne optimering blev udført af to danske partnere i projektet, som stod for hhv. fremstilling og modifikation af monolitten (LiqTech, Ballerup) samt optimering og evaluering af de katalytiske egenskaber i et minipilotanlæg (DTU Kemi).

Membranen i systemet er et polymermateriale, monteret på monolittens ydre overflade, se figur 2. For at opnå god vedhæftning af membranen på overfladen skal monolitten være glat. Dette blev i projektet opnået ved at belægge monolitten med et ekstra tyndt lag af små SiC-partikler (< 1 µm). Belægningen blev introduceret under monolitfremstillingen (LiqTech), mens membranudviklingen blev foretaget af en tysk partner (Helmholtz-Zentrum Hereon, Hamborg).

Test i demonstrationsanlæg

Et vigtigt skridt mod kommercialise-

ring af MACBETH-teknologien for hydroformylering er at demonstrere, at systemet også fungerer under industrielle forhold. Til dette formål er et demonstrationsanlæg opført i tilknytning til et fuldskala valeraldehyd produktionsanlæg hos en anden tysk partner (Evonik Oxeno, Marl), se figur 3a. Anlægget er det første i verden, som benytter en SLP homogen katalysator til denne reaktion på TRL (Technology Readiness Level) niveau 7.

Demonstrationsanlægget er opbygget af moduler, hvilket er et design, der gør anlægget fleksibelt og flytbart - noget som den kemiske industri generelt stræber efter. Den katalytiske membranreaktor i anlægget indeholder 54 monolitter (2,5 × 118 cm), se figur 3b og c. Reaktoren har to udtag: et til den gasstrøm, som passerer gennem membranen (permeat), og et til den gasstrøm, som tilbageholdes og ikke passerer gennem membranen (retentat). Da membranen er designet til at have stor gennemtrængelighed for aldehyder, er permeatet beriget med valeraldehyd. Retentatet er derimod rigt på ureageret olefin, da membranen er mindre gennemtrængelig for olefiner. Retentatet med ureageret olefin og syntesegas kan efterfølgende sendes igennem membranreaktoren igen, så der opnås effektiv olefin omdannelse.

SLP-monolitterne med membransystemet er blevet testet på demonstrationsanlægget i flere tusinde timer med en industriel olefin fødestrøm af teknisk kvalitet, som også indeholder urenheder. Disse tests er altafgørende for at vise systemets og processens stabilitet og det kommercielle potentiale. Indtil nu ser resultaterne både lovende ud, hvad angår stabilitet og den katalytiske dannelse af valeraldehyd.

Figur 3. a) Modulært SLP demonstrationsanlæg til hydroformylering i tilknytning til valeraldehyd produktionsanlæg hos Evonik Oxeno, Marl, Tyskland. b) Den katalytiske membranreaktor. c) De 54 monolitter monteret i reaktoren set ovenfra.

Bred anvendelse af teknologien

Reaktorkonceptet i MACBETH udvikles også for tre andre reaktionstyper, som alle danner produkter med stor efterspørgsel og markedspotentiale i den kemiske industri. Disse omfatter produktion af brint fra biogas ved damp-reformering (steam-reforming), produktion af propen fra propan ved dehydrogenering samt produktion af fedtsyrer og deres alkylesterderivater ud fra vegetabilske olier. De første to processer benytter kemiske katalysatorsystemer, mens den sidste anvender en biokemisk katalysator.

Alle reaktionerne i MACBETH deler det fælles træk, at den katalytiske membranreaktor muliggør brugen af mindre produktionsanlæg med betydelige energibesparelser. Ud over mindre CO_2-udledning forventes således reduktioner i kapitaludgifter (CAPEX) på op til 50 procent og driftsudgifter (OPEX) på op til 80 procent. Dette vil bidrage til at styrke konkurrenceevnen for en væsentlig del af den kemiske industri i Europa betydeligt.

Forfatterne ønsker at takke den Europæiske Kommission for økonomisk støtte inden for Horizon2020-SPIRE-projektet MACBETH under bevillingsaftale nr. 869896.

E-mail:
Anders Riisager: ar@kemi.dtu.dk
Leonhard Schill: leos@kemi.dtu.dk

Referencer

1. Cefic, the European Chemical Industry Council (17.01.2024): https://cefic.org/a-pillar-of-the-european-economy/facts-and-figures-of-the-european-chemical-industry/environmental-performance.
2. European Environment Agency (17.01.2024): https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer.
3. MACBETH-projektet (17.01.2024): https://www.macbeth-project.eu.
4. M. Madani, L. Schill, N. Zahrtmann, R. Portela, L. Arsenjuk, R. Franke, R. Fehrmann, A. Riisager, *Top. Catal*. 2023, 66, 1440-1450.
5. Supported liquid catalysts. A. Riisager, R. Fehrmann, P. Wasserscheid, *Handbook of Heterogeneous Catalysis* (Eds. G. Ertl, H. Knözinger, J. Weitkamp), 2. udgave, Wiley-VCH, Weinheim, 2008, Kap. 2.4.11, 631-644.
6. K. Hübner, Enter Macbeth, Elements 2/2021, 45-49 (30.08.2023): https://elements.evonik.com/wp-content/uploads/2021/07/EVMAG_0221_EN_WEB_K2.pdf.

Dansk NMR-møde 2024

Det danske NMR-møde nummer 45 blev afholdt af Roskilde Universitet på Comwell i Roskilde den 29.-30. januar. Med 100 deltagere fra Danmark, Norge, Sverige, Tyskland og Østrig havde mødet en international karakter.

En række udenlandske og danske foredragsholdere dækkede vigtige emner og aspekter inden for kemi, biologi og NMR: brug af NMR i cancerforskning, neurodegenerative sygdomme, recycling af plastik, kemisk karakterisering af tang, hvordan vand påvirker papbaserede emballager, hvordan er strukturen af cement og hvad vand gør der, samt væsentlige bidrag inden for NMR-teori: brug af kunstig intelligens i udviklingen af NMR, brug af dobbeltroterende gradienter i diffusions MRI (MR-scanning), brug af dynamisk polarisering med tilfældige bølgeformer for at opnå stærkere signaler.

Inden middagen et tilbageblik over den tidlige NMR og de mange Nobelpriser, der er uddelt i NMR.

Udover de mange foredrag var der også mange spændende postere og prisen for den bedste poster, præsenteret af en student, tilfaldt, efter hård konkurrence, Nina Jacobsen, Københavns Universitet/Leo Pharma: *The effect of phosphorylation in the signaling pathways of the Interleukin-4 receptor*. Bedste foredrag af en student gik til Jonathan Jedal, Roskilde Universitet med foredraget: *Metabolites, ions and the mechanisms behind freeze protection in seasonal cold hardening of Pyrochroa coccinea (Pyrochroidae) larvae.*

Her får Nina Jacobsen fra Københavns Universitet/Leo Pharma og Jonathan Jedal fra Roskilde Universitet pris for bedste studenterposter og studenterforedrag af Poul Erik Hansen og Bill Goldring fra Roskilde Universitet.

Anders Malmendal og
Poul Erik Hansen, poulerik@ruc.dk

Ozon ved Villum Research Station

De seneste resultater fra forskning i de parametre, der kontrollerer ozonniveauerne i den arktiske troposfære.

Atmosfære-målehuset på Villum Research Station med specielle prøveindløb til aerosolmålinger og til gasser, samt skorstene for at fjerne luften, der suges ind i huset, så vi undgår kontaminering af vores egen prøveluft.

Af Jens Hjorth[1], Jakob Boyd Pernov[2] og Henrik Skov[1]

[1] Institut for Miljøvidenskab, iClimate, Arctic Research Center, Aarhus Universitet
[2] Extreme Environments Research Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Schweiz

I denne artikel opsummerer vi seneste resultater vedrørende ozonniveauer i den arktiske troposfære. Observerede tendenser og fænomenet Ozon Nedbrydnings Episoder præsenteres og diskuteres.

Introduktion

Ozon (O_3) i troposfæren er den tredje mest vigtige antropogene drivhusgas efter CO_2 og metan; det er kendt for at skade vegetation og udgøre en risiko for menneskers sundhed i områder med højt forureningsniveau. Det spiller også en vigtig rolle som reaktant i fotolytiske og andre kemiske reaktioner i atmosfæren. Kilderne til troposfærisk ozon er fotokemiske reaktioner, der involverer både naturlige og antropogene emissioner, samt import fra stratosfæren. På trods af dens anerkendte vigtighed er forståelsen af den komplekse kemi af ozon stadig ufuldstændig. En hovedårsag til, at ozon i det høje Arktis er særligt svært at simulere ved atmosfærisk kemisk transportmodellering, er forekomsten af Ozon Nedbrydnings Episoder (engelsk; ozone depletion events - ODE'er) i forårsmånederne, hvor ozonkoncentrationerne reduceres drastisk på grund af kemiske reaktioner, der involverer halogener, især brom. Dette fænomen, som endnu ikke er fuldt forstået, er relateret til heterogene reaktioner på sne- og isoverflader samt vindblæst sne og aerosolpartikler. Under ODE'er forøges også aflejringen af kviksølv på grund af dets reaktion med halogenradikaler [1,2].

På Villum Research Station (Villum) blev ozonmålinger påbegyndt i 1996 og fortsætter stadig, med en afbrydelse fra 2002 til 2007. Ozonkoncentrationen bestemmes ud fra dets absorption

Forskere og logistikere foran Villum Research Stations Forskerhus. Fra venstre: Henrik Skov, Christel Christoffersen, Stephan Ingeman Bernberg, Andreas Massling og Jørgen Skafte.

Site	Annual trend (%)	P-value	Period
High Arctic:			
Alert	**0.29**	0.044	1999-2019
	0.24	0.038	1993-2019
Utqiagvik	0.53	0.129	1999-2019
	0.26	0.258	1993-2019
Villum	**1.98**	0.034	1999-2019
	0.68	0.162	1996-2019
Zeppelin	-0.19	0.497	1999-2019
	0.18	0.089	1993-2019
Summit	-0.28	0.142	2001-2019
European continental Arctic and near-Arctic:			
Esrange	0.08	0.697	1999-2019
	0.00	0.610	1993-2019
Pallas	-0.30	0.327	1998-2019
	-0.40	0.067	1995-2019
Tustervatn	**-0.52**	0.003	1999-2019
	-0.18	0.103	1994-2019

Figur 1. Venstre: Placering af overflade (fremhævet) og ozonsonde (kursiv) målestationer samt Polarcirklen (66.55°N). Højre: Tendenser i O_3-ændringer ved overfladestationer i ppbv per årti (venstre kolonne) og p-værdier for de årlige tendenser. Statistisk signifikante tendenser (>90% CL, p<=0.1) er fremhævede. Geografiske koordinater for alle steder er angivet i [4]. Figur fra [3].

ved 254 nm, og instrumentets stabilitet sikres ved generering af en intern ozonstandard, som kan spores til en primær standard. Den relativt lange tidsserie af observationer har gjort det muligt at undersøge tendenser samt studere de processer, der fører til de observerede koncentrationer. I 2023 blev analyser af observationerne ved arktiske målestationer, herunder Villum, offentliggjort i to artikler, én om tendenser [3] og en anden om nuværende viden og modellers evne til at reproducere observerede ozonniveauer [4]. Nogle resultater af disse studier præsenteres i det følgende.

Årlig cyklus, tendenser og modellers præstationsniveau

Ozon på steder tæt på Polarcirklen har en årlig cyklus med maksimale værdier om foråret, som det også ses i områder fjernt fra forureningskilder ved vores breddegrader. Dette forårsmaksimum skyldes påvirkning fra stratosfærisk indtrængning samt af højere bidrag i denne periode fra ozon dannet i troposfæren. Sammenligning mellem modelresultater (deres medianværdi) og observationer viste, at 12 "state of the art"-modeller kan reproducere dette maksimum. Også de relativt lave ozonkoncentrationer om sommeren, forklaret ved fotokemisk nedbrydning af ozon, og de højere værdier om vinteren blev reproduceret af multimodelmedianen (MMM).

Imidlertid kunne det forårsminimum, der observeres på arktiske lokaliteter som Villum, forårsaget af ODE'er, ikke beskrives af modellerne, der generelt ikke havde en tilstrækkelig beskrivelse af halogenkemien. Der var stor variabilitet blandt modellerne, både med hensyn til overfladeozon og for ozon i den frie troposfære, som generelt kun blev reproduceret inden for ±50 procent. MMM-værdierne viste den bedste overensstemmelse med målingerne.

Tendensanalyserne (se figur 1), baseret på den ikke-parametriske Mann-Kendal-metode, viste en markant forskel mellem karakteristika for højarktiske stationer og for stationer tæt på Polarcirklen. Over den længste periode (alle år med tilgængelige data mellem 1993 og 2019) havde de højarktiske stationer generelt positive årlige tendenser, mens to ud af de tre skandinaviske og finske stationer havde negative tendenser (Tustervatn og Pallas). En analyse af de månedlige tendenser viste, at stigningerne i ozon på de højarktiske steder primært fandt sted i vintermånederne. Ved at se på en kortere periode (1999-2019) blev de positive tendenser ved Alert, Utqiaġvik og Villum mere markante, især på Villum, mens Zeppelin havde en svagt negativ tendens. Igen viser to ud af de tre stationer tæt på Polarcirklen negative tendenser. Tendenser i fri troposfærisk ozon blev også beregnet, baseret på data fra ozon-sonder fra de steder, der vises i figur 1: Vintertidsstigninger blev fundet på de fleste steder, mens tendenserne om foråret primært var negative; der er imidlertid stor variabilitet mellem stederne.

De stigende vintertidsoverflade- og fri troposfæriske ozonkoncentrationer på højarktiske lokaliteter samt nogle positive tendenser om sommeren blev reproduceret af modellerne, men modellerne har tendens til at overvurdere disse tendenser. Reducerede emissioner af NO_x menes at forårsage disse positive ozontendenser ved vores breddegrader på grund af reduceret titrering af ozon, og dette kan også være forklaringen på de arktiske tendenser. Denne forklaring bliver understøttet af, at kulilte, der udledes sammen med NO_x fra forbrændingskilder, havde stærkt negative vintertendenser ved to af de højarktiske stationer. Reducerede emissioner af de stoffer, der danner ozon ved fotokemiske processer (NO_x, kulilte og flygtige organiske forbindelser), kan også forklare

de negative tendenser observeret ved de nordlige skandinaviske steder om foråret og tidlig sommer; i denne periode er den negative påvirkning fra NO_x-emissioner på ozonkoncentrationen mindre vigtig end påvirkningen fra fotokemisk produktion.

Hvordan vil klimaforandringerne påvirke ODE'erne

Observerede tendenser er ikke fuldt forstået og kræver yderligere undersøgelser. Blandt de mulige forklaringer på de observerede tendenser, udover ændrede emissioner, er ændringer i tørdeposition af ozon eller ændringer i storskala meteorologiske transportmønstre. Hvad angår forårsperioden, har ODE'er en stærk indflydelse på ozonkoncentrationerne i Højarktis, og derfor har en ændring i ODE-hyppighed eller varighed sandsynligvis indvirkning på overflade- og fri troposfæriske ozonkoncentrationer. Derfor er det vigtigt at forstå, hvordan klimaændringer vil påvirke ODE'er i fremtiden.

Arbejdet med ozon på Villum fokuserer i øjeblikket på at undersøge tendenser i de observerede ODE'er og at forstå de processer, der påvirker dem. Forholdet mellem ODE'er og meteorologiske parametre og luftmassens historie undersøges. I retrospektive analyser undersøges forskellige overfladers (land uden sne, hav, havis eller sne på land) betydning for forekomsten af ODE'er.

I tendensanalysen viste ODE-varighed og -hyppighed positive tendenser i henholdsvis april og maj, men tendensen i ODE-hyppigheden er forbundet med stor usikkerhed. Positive tendenser i ODE-hyppigheden på andre arktiske stationer antyder dog, at dette er et panarktisk fænomen. Mulige årsager til stigningen i varighed og hyppigheden af ODE'er omfatter stigende arealer med ny havis, højere BrO-koncentrationer, stigende havsaltkoncentration i sne, ændrede transportmønstre og øget forekomst af genfrysning af våger (som kilde til Br-forbindelser i luften).

For at studere relationen mellem meteorologiske parametre og ODE'er anvendes en "machine learning"-model, som gør det muligt at studere de vigtigste parametre for ODE-forekomst. Det vil forbedre muligheden for at forudsige virkningen af fremtidige klimaændringer på ODE'er.

■ Begrebet antropogen stammer fra sammensætningen af de to græske ord: anthropos, som betyder "menneske", og gen, som betyder "født". Udtrykket betyder derfor "født af mennesker" eller mere direkte: "menneskeskabt".

Taksigelse

Energistyrelsen og Miljøstyrelsen takkes for finansiel støtte igennem årene til AMAP CORE Atmosphere fra midlerne i "Miljøstøtte til Arktis". Villum Fonden takkes for den store bevilling, der har gjort det muligt at bygge Villum Research Station. Artiklen er en lettere modificeret version af et engelsksproget bidrag til Villum-stationens årsrapport.

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

Referencer

1. Skov, H., Brooks, S., Goodsite, M.E., Lindberg, S.E., Meyers, T.P., Landis, M., . . . Christensen, J. (2006). The fluxes of Reactive Gaseous mercury measured with a newly developed method using relaxed eddy accumulation. Atmospheric Environment, 40, 5452-5463.
2. Skov, H., Hjorth, J., Nordstrom, C., Jensen, B., Christoffersen, C., Poulsen, M. B., . . . Christensen, J.H. (2020). Variability in gaseous elemental mercury at Villum Research Station, Station Nord, in North Greenland from 1999 to 2017. Atmospheric Chemistry and Physics, 20(21), 13253-13265. doi:10.5194/acp-20-13253-2020.
3. Law, K.S., Hjorth, J.L., Pernov, J.B., Whaley, C.H., Skov, H., Collaud Coen, M., Langner, J., Arnold, S.R., Tarasick, D., Christensen, J., Deushi, M., Effertz, P., Faluvegi, G., Gauss, M., Im, U., Oshima, N., Petropavlovskikh, I., Plummer, D., Tsigaridis, K., Tsyro, S., Solberg, S., and Turnock, S.: Arctic Tropospheric Ozone Trends, Geophysical Research Letters, 50, e2023GL103096, https://doi.org/10.1029/2023GL103096, 2023.
4. Whaley, C.H., Law, K.S., Hjorth, J.L., Skov, H., Arnold, S.R., Langner, J., Pernov, J.B., Bergeron, G., Bourgeois, I., Christensen, J.H., Chien, R.-Y., Deushi, M., Dong, X., Effertz, P., Faluvegi, G., Flanner, M., Fu, J.S., Gauss, M., Huey, G., Im, U., Kivi, R., Marelle, L., Onishi, T., Oshima, N., Petropavlovskikh, I., Peischl, J., Plummer, D.A., Pozzoli, L., Raut, J.-C., Ryerson, T., Skeie, R., Solberg, S., Thomas, M.A., Thompson, C., Tsigaridis, K., Tsyro, S., Turnock, S.T., von Salzen, K., and Tarasick, D.W.: Arctic tropospheric ozone: assessment of current knowledge and model performance, Atmospheric Chemistry and Physics, 23, 637–661, https://doi.org/10.5194/acp-23-637-2023, 2023.

Euforiserende stoffer i N

Kemisk Forenings Nomenklaturudvalg opsamler systematiske navne for fødevaretilsætningsstoffer (stoffer med E-numre), godkendte aktive lægemiddelstoffer og pesticider samt forbudte euforiserende stoffer og præsenterer systematiske IUPAC-navne for disse forbindelser i databasen på udvalgets hjemmeside *Dansk Kemisk Nomenklatur* [1].

Siden 2010 har udvalget arbejdet med at oprette poster i databasen for de forbudte euforiserende stoffer nævnt i bekendtgørelserne over disse [2]. Der kommer flere til, efterhånden som markedet for ulovlige stoffer udvikler sig, og dette afspejles i nye bekendtgørelser. Der er nu omkring 500 sådanne poster i databasen.

Af de euforiserende stoffer har 177 også fundet anvendelse som lægemidler og er derfor blevet tildelt et INN (*International Nonproprietary Name*), som gives med det formål at standardisere lægemiddelnavngivningen for at minimere fejl ved brugen [3].

Euforiserende stoffer omtales jævnligt i dagspressen, oftest ved brug af "gadenavne" eller akronymer. Det er ikke altid klart, præcis hvilket stof der er tale om. For nylig var der omtale af GHB [4], et akronym, der både bruges om syreformen 4-hydroxybutansyre og den korresponderende base, 'gamma-hydroxybutyrat' (altså 4-hydroxybutanoat). GHB er en CNS-depressant (gruppe 7 i oversigten nedenfor).

Det internationale arbejde med de illegale euforiserende stoffer koordineres af FN-organet UNODC, United Nations Office on Drugs and Crime. På deres hjemmeside er der en oversigt over de euforiserende materialer eller stoffer under international kontrol, som mest almindeligt fremstilles, forarbejdes og misbruges.

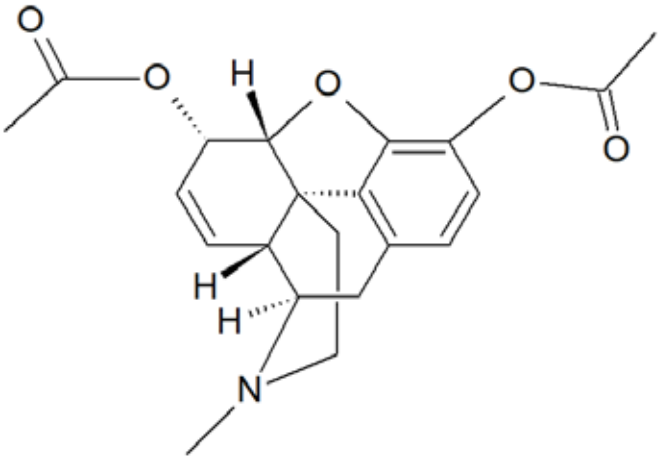
UNODC har valgt at inddele stofferne i otte grupper (se [5] for flere detaljer og forklaringer på betegnelserne):

1. Cannabis eller naturstoffer derfra

For eksempel THC [tetrahydrocannabinol, helsystematisk (6a*R*,10a*R*)-6,6,9-trimethyl-3-pentyl-6a,7,8,10a-tetrahydro-6*H*-dibenzo[*b*,*d*]pyran-1-ol].

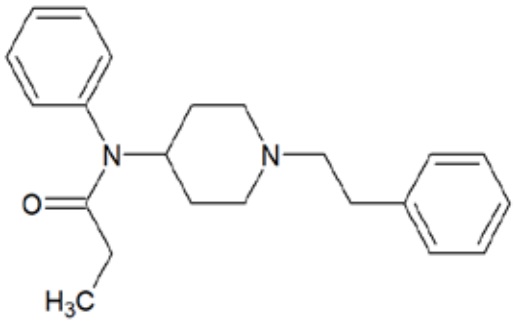
Nomenklaturudvalget

2. Syntetiske cannabinoid-receptoragonister
Der er en mindre sværm af JWH (17 stykker) registreret i DKN-databasen, for eksempel JWH-073. Forkortelsen JWH står for John W. Huffman, en af stoffets opfindere [6].



Figur 1. Heroin, (17-methyl-7,8-didehydro-4,5α-epoxymorphinan-3,6α-diyl)di(acetat). Stamforbindelsen morphinan kan findes i DKN-databasen. Selve morphin (morfin) er den tilsvarende 3,6α-diol.

3. Opium og opiater
Alkaloider, for eksempel morphin og derivatet heroin (figur 1).

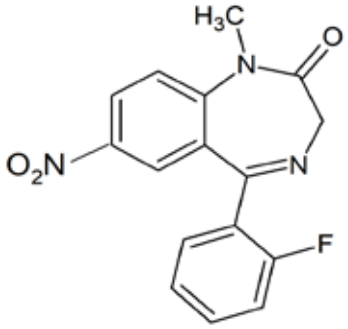


Figur 2. Fentanyl, *N*-phenyl-*N*-[1-(2-phenylethyl)piperidin-4-yl] propanamid.

4. Opioider
For eksempel fentanyl (syntetisk), figur 2, som er mere vanedannende end heroin. Der er en veritabel fentanyl-epidemi i gang i USA [7].

5. Coca og cocain
For eksempel cocablade som tygges sammen med hydrogencarbonat eller planteaske.

6. Amphetamin-type stimulanter
For eksempel metamfetamin (methamphetamin), (2*S*)-*N*-methyl-1-phenylpropan-2-amin.



Figur 3. Flunitrazepam, 5-(2-fluorphenyl)-1-methyl-7-nitro-1,3-dihydro-2*H*-benzo[*f*][1,4]diazepin-2-on.

7. Centralnervesystem(CNS)-depressanter
For eksempel flunitrazepam (figur 3) og det føromtalte GHB. Flunitrazepam er også et INN, jf.ovenfor.

8. Hallucinogener
For eksempel LSD eller dimethyltryptamin.

Som det fremgår, er euforiserende stoffer en temmelig divers samling af strukturelt forskellige forbindelser - en naturlig konsekvens af, at de påvirker forskellige dele af nervesystemet, alt efter hvilken effekt der ønskes af (mis)brugeren.

Målgruppen for nomenklaturudvalgets anstrengelser er ikke de skumle typer nede på gadehjørnet, som sælger rekreative pulvere. Fra et nomenklatursynspunkt ville det ellers ikke være ringe, hvis konversationen mellem sælgeren og kunden kunne forløbe sådan:

”Hey bro, stik mig et gram (6a*R*,9*R*)-*N*,*N*-diethyl-7-methyl-4-propanoyl-6,6a,8,9-tetrahydroindolo[4,3-*fg*]quinolin-9-carboxamid”.

”Nada bro, det har jeg ikke, du kan få et gram *N*-(1-amino-3,3-dimethyl-1-oxobutan-2-yl)-1-(cyclohexylmethyl)-1*H*-indazol-3-carboxamid”.

Så var kunden sikker på at få den rigtige vare! Navnene på gadeplan kan ellers godt være flertydige. (Navnene her kan de to tjekke på DKN-siden!).

MTJ og TD, Nomenklaturudvalget

Referencer
1. https://kemisknomenklatur.dk.
2. Bekendtgørelsen: https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2021/2446 (BEK nr 2446 af 12/12/2021) og Bekendtgørelse om ændring af bekendtgørelse om euforiserende stoffer (BEK nr 424 af 05/04/2022): https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2022/424.
3. Lægemiddelnavne: se kapitel 4 i den trykte udgave af *Kemisk Ordbog*, ligger nu på nettet: www.ordbogen.com/assets/dictionary/chemical-dada/docs/chapters/kapitel_04.pdf.
4. Politiken 2/12, 2023: Flere og flere tager rusmiddel i forbindelse med sex: “Det er bare eskaleret”.
5. Terminology and Information on Drugs, third edition, UNODC. United Nations Office on Drugs and Crime, 2016. https://www.unodc.org/unodc/en/scientists/terminology-and-information-on-drugs_new.html.
6. Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/JWH-073.
7. https://nyheder.tv2.dk/udland/2023-11-16-jeg-har-aldrig-set-noget-vaerre-siger-usa-korrespondent-om-fentanylmisbrugere.

Professor Mikael Begtrup

Dansk kemi mistede en markant personlighed, da Mikael Begtrup gik bort 23. januar 2024, 83 år gammel.

Af Per Vedsø, Klaus Bock, Karl Anker Jørgensen og Jesper Kristensen

Mikael var uddannet på Danmarks Tekniske Højskole (DTH, nu DTU), hvor han senere fik ansættelse som først amanuensis, lektor og docent. I 1990 tiltrådte han som professor i organisk kemi ved Danmarks Farmaceutiske Højskole og i 2007 ved Institut for Medicinalkemi ved Københavns Universitet frem mod hans pensionering i 2010.

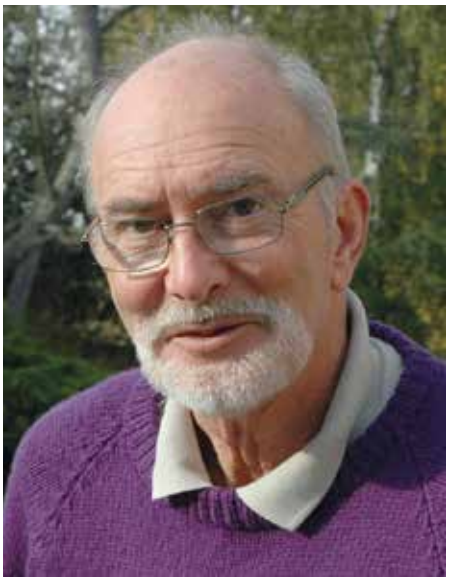
Gennem sin videnskabelige karriere satte Mikael både nationale og internationale videnskabelige aftryk, specielt inden for den gren af den syntetiske organiske kemi, der arbejder i spændingsfeltet mellem heterocyklisk og metalorganisk kemi. Begge områder er af fundamental betydning for blandt andet medicinalindustrien, og her bidrog Mikael med at udvikle nye reaktioner til fremstilling af disse vigtigske kemiske forbindelser.

Mikael var meget omhyggelig og velorganiseret, både som underviser og forsker. For eksempel indsamlede og opbevarede han sine NMR-spektre i hjemmet i Hillerød til kollegaers store misundelse, uden at Kirstens (Mikaels hustru gennem mere end 60 år) holdning til denne samling kom frem i lyset. Mikael var også en pioner med at arbejde med meget små mængder stof, og han rådede over instituttets samlede beholdning af udstyr med kolber på under 10 mL, der kunne lånes mod behørig lovning om aflevering efter brug. Mikael var også meget hjælpsom, når det gjaldt praktiske kemiske problemer eller vedligehold af instrumenter. For eksempel konstruerede han, sammen med instituttets værksted, en ny vandkølingsenhed til instituttets NMR-apparat, da det ikke længere kunne skaffes fra leverandøren.

I 1990 forlod Mikael DTH for at blive professor i syntesekemi på det daværende Danmarks Farmaceutiske Højskole. Her etablerede han Syntesekemigruppen, der satte et stærkt præg på instituttets kemifaglighed. Som leder af Syntesekemigruppen tiltrak Mikael mange studerende og med sit behagelige, inkluderende og entusiastiske væsen, skabte han et meget udviklende og inspirerende forskningsmiljø, kendetegnet ved høj faglighed og en stærk holdånd. Hans dør stod altid åben, og på de daglige formiddagsmøder på hans kontor, blev kemiske landvindinger og problemstillinger flittigt diskuteret. Når kemien drillede og alt så håbløst ud havde Mikael en særlig evne til at finde lyspunkter og se nye muligheder, og hans optimisme og engagement smittede af på alle, som arbejdede tæt sammen med ham. Han var altid stærkt fokuseret på, at nye opdagelser skulle deles med andre og helst publiceres i internationale anerkendte tidsskrifter, for som han yndede at sige *"publikationer er som penge i banken"*. Som en anerkendelse for sin kemiske forskning blev Mikael Begtrup i 2001 den første modtager af "Carlsbergs Forskerpris til støtte for kemi".

Mikael havde en stor kærlighed til eksperimentel organisk kemi. Gennem udgivelsen af "Håndbog i organisk synteseteknik" og etableringen af videregående kurser inden for praktisk organisk syntese fik han sat mærkbart aftryk på de praktiske færdigheder, ikke kun på DFU/KU, men også gennem udbuddet af tilsvarende nationale kurser for ph.d.-studerende, ansatte i industrien og efteruddannelse af laboranter - alt sammen medvirkende til at skabe et stort netværk og uddanne flere generationer af kemikere, der har fundet ansættelse bredt i det danske samfund.

Mikael var en meget afholdt og inspirerende underviser og havde en formidabel evne til at formidle kemiens univers, og i 1991 blev han af de studerende på Danmarks Farmaceutiske Universitet valgt som årets underviser. Hans formidlingstrang rakte langt ud over DFU og internationale kongresser. Han var således flittig foredragsholder



på Forskningens Døgn, Naturvidenskabsfestival og mange øvrige arrangementer, hvor kemi og anden videnskab blev formidlet på inspirerende og let forståelig vis.

Mikael sagde aldrig nej til at være censor ved danske universiteter og varetog desuden en række faglige poster i både ind- og udland, som for eksempel formand for bestyrelsen for Kemisk Forening og for Undervisningsministeriets kemiudvalg, samt medredaktør af internationale videnskabelige tidsskrifter.

Mikael havde også stor appetit på andet end kemien. Igennem livet engagerede han sig i mange forskellige ting: musik, drageflyvning, bueskydning og flagermus - for blot at nævne nogle få. Dog var familien altid omdrejningspunktet for Mikaels liv, hvor hustruen Kirsten ofte fulgte ham på rejser i udlandet, sørgede for, at der var styr på hjemmefronten og udviste stor gæstfrihed, når man var inviteret i hjemmet i Hillerød.

Ved bisættelsen fra Ullerød kirke skinnede solen fra en skyfri himmel og familie, venner og tidligere kollegaer var mødt op for at sige et sidste farvel.

Æret være Mikael Begtrups minde.

Serin som middel mod leversygdom

Danske Cysbio har udviklet en billig og mere miljøvenlig måde at fremstille aminosyren serin på. Produktet kan forebygge sygdommen fedtlever, og omsætningen forventes at overstige 50 millioner kroner inden for to til tre år. Ikke-alkoholisk fedtleversygdom (NAFLD) er en udbredt, men ofte overset sygdom. På verdensplan vurderes det, at op mod 20 procent har eller er i risiko for at udvikle fedtlever. Alene i Europa svarer det til lige under 90 millioner mennesker. Nyere forskning fra blandt andet et svensk forskerteam i Stockholm indikerer, at sygdommen og andre markante livsstilsygdomme kan forebygges eller behandles gennem et dagligt indtag af aminosyren serin i kombination med andre simple kosttilskudsprodukter, og der er ny medicin på vej baseret på en række kliniske studier og afprøvning af ny medicin.

Den danske biotekvirksomhed Cysbio kan nu berette, at virksomheden som de første i verden - i samarbejde med en kinesisk produktionspartner, Zhejiang NHU, har udviklet en både enklere, mere omkostningseffektiv og mere bæredygtig fermenteringsteknologi, der kan anvendes til produktion af serin. De har ligeledes vist i et større studie, at alene serin indtaget som et simpelt kosttilskud over tre måneder kan forbedre tilstanden hos mennesker med konstateret NAFLD.

- Serin produceres i dag for det meste ved kemisk syntese, hvor der blandt andet anvendes formaldehyd, men vi har nu udviklet en fremstillingsmetode via simpel fermentering, hvor glukose eller andre fornybare kulstofkilder omsættes af bakterier til serin. Det betyder, at produktet nu bliver tilgængeligt til en lavere pris, og at det er produceret via biologiske og bæredygtige metoder, fortæller Henrik Meyer, der er CEO i Cysbio.

Foto: Cysbio.

Som de første i verden har danske Cysbio udviklet en billig og mere miljøvenlig måde at fremstille aminosyren serin på. Produktet kan forebygge sygdommen fedtlever.

Aminosyren serin anvendes allerede bredt i meget forskellige produkter, for eksempel som ingrediens i lægemidler, der behandler forskellige neurologiske sygdomme som Parkinson, og produktet indgår desuden i kosmetik, som kosttilskud i sportsdrikke og som smagsstof i hundefoder.

Cysbio modtog tilbage i 2021 33 millioner kroner i EU-støtte, og cirka 15 millioner kroner af støtten er sidenhen blevet brugt på at gøre fremtidens brug af aminosyrer mere miljørigtig. Cysbio har en række patenter, som beskytter deres produktionsmetoder af serin.

Kilde: Pressemeddelelse fra Cysbio

SIKKERHEDSFOKUS

Nyt FOKUS-site fra TechMedia med nyheder, nyttig viden og nye produkter inden for sikkerhed

Brand | IT-sikkerhed | Laboratorie
Personbeskyttelse | Security

Tilmeld dig nyhedsbrevet på **sikkerhedsfokus.dk** og få ugentlige opdateringer inden for sikkerhedsområdet

Har du også andre fokusområder? - Tjek vores andre sites:
ELEKTRONIKFOKUS EMBALLAGEFOKUS FOODPROCESFOKUS KEMIFOKUS
KLIMAFOKUS HVACFOKUS TEKNISKFOKUS FØDEVAREFOKUS ELFOKUS

Intelligent Chemistry
Biolab A/S Automation Specialist

Biolab A/S Custom Solutions
Liquid dispensing - Vial handling - Measurement of weight- pH - and a lot more...

JASCO
Advanced Spectroscopic & Purification Solutions

SP Scientific
Automated Sample Concentration - Freezedrying

Gilson and Hudson Robotics Inc.
Advanced Automation solutions.

Rheosense - Viscosity on 15ul
Advanced Viscosity profiles

BIO LAB

The only limitation is your imagination

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