

Dansk Kemi

Nummer 6 - November 2025 / 106. årgang

Kemisk Forening - Kemiingeniørgruppen

Status på
enhedspotentsystemet

Kviksølv-isotoper
som fingeraftryk

Grønlandske miner og metaller

Beskyttelse af unikke idéer

Plougmann Vingtoft er et prisvindende konsulentfirma, der har specialiseret sig i håndtering, beskyttelse og kommercialisering af IPR - patenter, varemærker og designs.



Scan QR-koden
og læs mere på
www.pv.dk

PLOUGMANN
VINGTOFT®





RAMAN PROCESS SPECTROSCOPY

Hyperflux™ Pro Plus



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

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

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

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





1 Forside
Maarmorilik-minen i Grønland efter nedlukning. En uafdækket gråbjergsdump ses på bjergsiden under aftegningen af "Den Sorte Engel". Læs mere om grønlandske miner og metaller i artiklen side 13. Foto: Christian Frigaard Rasmussen.

6 To år med enhedspatentet og Enhedspatentdomstolen
Enhedspatentsystemet har nu kørt i to år, og Anders Heebøll-Nielsen giver her en beskrivelse af status.

10 Kan kviksølv-isotoper være nøglen til at forstå kviksølvforureningen i Arktis?
Måling af kviksølv-isotoper giver ny indsigt i kviksølvets komplicerede kredsløb.

16 Bliv fri for begroning: Del 3
Sidste del af miniserien om begroning belyser væskestrømmen.

18 Er der salat i solcreme?
Man kan støde på, at solcremer angives at indeholde homosalat. Læs om forklaringen på dette pudsige navn.

20 Materialer til konstruktion af små modulære atomreaktorer med smeltet fluorid-salt
4. generations atomreaktorer kræver særligt hårdføre materialer, og forskning gransker, hvordan korrosionsprocesser kan undersøges.

24 Per- og polyfluorerede alkylstoffer (PFAS) – et problem i hele Kongeriget Danmark
Målinger viser, at miljøet og mennesker i Danmark, Færøerne og Grønland kan være kritisk belastet af per- og polyfluorerede alkylstoffer.

27 Sodpartikler i København
Studie har undersøgt, om kortvarige, høje koncentrationer af sodpartikler kan relateres til emissioner fra enkelte køretøjer.

30 Cement med markant lavere CO₂-aftryk ved hjælp af strøm
Forskningsprojekt skal gøre cementproduktion grønnere.

31 Foreningsnyt fra Kemisk Forening
Bog anmeldelse: Naturvidenskabens ildsjæle

TechMedia

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

Ledelse:
David Wall

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

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 Foersom
(Næstformand, Kemilærerforeningen)
Chefkonsulent Helle Westphal
Senior Environmental Specialist,
FMC Site Rønland
Inge Margrethe Jensen
Fagkonsulent Mette Malmqvist

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

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

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

Annonceproduktion:
Nicoline Plass
Tlf. 43 24 26 82, np@techmedia.dk

Layout: Trine Plass
Tryk: PE Offset A/S

Antal abonnenter: 3.600

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

Trykt på
miljøvenligt papir
med vegetabiliske
miljøfarver.



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.dansk kemi.dk

Se også: www.kemifokus.dk

Eller find
Dansk Kemi på:



Scan og hent Dansk Kemi's
medieinformation 2026 her!
Scan med kameraet
på din smartphone.



Nobelprisen 2025 gik til metal-organiske rammer

I 2025 blev nobelprisen i kemi endnu engang uddelt og gik, efter min mening, til et meget velvalgt område. Denne gang var det til opdagelsen af metal-organiske rammer (en direkte oversættelse af den svenske betegnelse) eller metal-organic frameworks (MOF'er), som de hedder på engelsk. Det er et vidunderligt nyt område af kemien, der begejstrer videnskaben. De tre forskere, der delte prisen, var Susumu Kitagawa, Richard Robson og Omar Yaghi.

Metal-organiske rammer eller MOF'er er materialer, der i mange tilfælde "bare" er salte mellem metal-ioner og organiske forbindelser og som i fast form danner et tredimensionelt netværk. Fordi de organiske forbindelser er multivalente, store og ofte linære, er netværket fuldt af huller, som kan fyldes af små molekyler. Især en tidlig opdagelse af Yaghis gruppe; at en MOF på størrelse med en sukkerknald har en indre overflade på størrelse med en fodboldbane forandrede stor begejstring.

Det er særligt MOF'ernes evne til at absorbere store mængder gasser, der i øjeblikket vækker stor interesse til for eksempel absorption og opbevaring af drivhusgasserne CO_2 og metan eller til opbevaring af hydrogen. Men man kan også tænke sig alle mulige andre fremtidige anvendelser, fordi MOF'erne er lette at lave og variationsmulighederne i den organiske del af rammen er nærmest uendelige.

Derved kan hullernes størrelse justeres, og man kan relativt let designe molekyler, der passer med den ønskede størrelse. På sigt kan det også tænkes, at man kan opnå enzymagtige katalysatorer, hvor et substrat, der passer til hullernes størrelse, omdannes til produkt af strategisk placerede katalytiske grupper.

Nobelprisen i kemi har unik værdi ved at markere store opdagelser inden for kemien og ved at belønne det grundlæggende og ikke altid glamourøse hårde forskningsarbejde med at undersøge ting, som ingen andre på det tidlige tidspunkt troede, kunne blive epokegørende. Et godt eksempel på dette er Richard Robsons pionerarbejde fra 1990'erne, som altså i år giver ham nobelprisen. Nobelkomiteen skal roses for deres meget grundige undersøgelsesarbejde, der gør nobelprisen i kemi til meget mere end en popularitetskonkurrence. Det samme kan bestemt ikke siges om alle andre priser.

Vil man gerne vide mere om, hvem der får, eller kan få nobelprisen i kemi, kan man hvert år deltage i Kemisk Instituts nobel-krystalkuglearrangement, som holdes i auditorium 1 i H.C. Ørsted-bygningen dagen før eller få dage før uddelingen. Der vil 4-5 kemikere give deres bud på, hvem der modtager nobelprisen. Skønt det ikke er altid, at forslagsstillerne gætter rigtigt samme år, får et flertal af forslagene prisen et senere år. Således forudsagde professor Jesper Bendix i 2023, at MOF ville få prisen. Arrangementet er en lærerig og sjov indgang til de vigtigste opdagelser inden for kemi, og er i de senere år blevet kopieret af flere andre, blandt andet chemical engineering news, der holder det som et webinar.

Mikael Bols

Nobelkomiteen skal roses for deres meget grundige undersøgelsesarbejde, der gør nobelprisen i kemi til meget mere end en popularitetskonkurrence



Savner du også det store overblik?

PFAS

Med Combustion IC (CIC) får du den totale mængde PFAS i dine prøver.

Med mere end 10.000 forskellige PFAS er det vigtigt at få det fulde billede.

Få hurtige og pålidelige resultater - for alle PFAS.

Med CIC efter den nye standardmetode DIN-38409-59 får du:

Selektiv bestemmelse af AOF, AOCl, AOBr og AOI i forskellige vandprøver

AOF som en hurtig, ikke-målet screening for PFAS'er

Effektivt system med meget lidt vedligeholdelse

Let at bruge, robust og pålideligt



To år med enhedspatentet og Enhedspatent- domstolen

Enhedspatentsystemet har nu været i kraft i to år,
og de nye muligheder bliver brugt.

Foto: Freepik.com.



Af Anders Heebøll-Nielsen,
partner, European Patent
Attorney, AWA Denmark A/S

I 2011 skitserede jeg, hvordan fremtidens EU-patent kunne etableres [1] ud fra to EU-forordninger, men der manglede yderligere lovgivning og især med-

lemslandenes enighed. I 2013 var aftalen om en fælles patentdomstol ("Aftalen") defineret [2], og i 2022 var medlemslandenes ratificering af Aftalen stort set på plads [3]. I juni kunne enhedspatentsystemet fejre to års jubilæum, og jeg giver her et overblik over, hvordan de nye muligheder bliver brugt.

Baggrund

Aftalen er en mellemstatslig aftale blandt EU-lande i et forstærket EU-samarbejde, og fra den trådte i kraft 1. juni 2023, kunne europæiske patenter (EP'er) registreres som enhedspatenter (heri forkortet "UP"). Figur 1 viser enhedspatentlandene. De blå lande er med i



Foto: Freepik.com.



Figur 1. UPC's afdelinger og funktioner. UP-lande er blå, gule lande er med i det forstærkede samarbejde, men ikke UP-lande, røde lande står udenfor og violette lande er EP-lande.

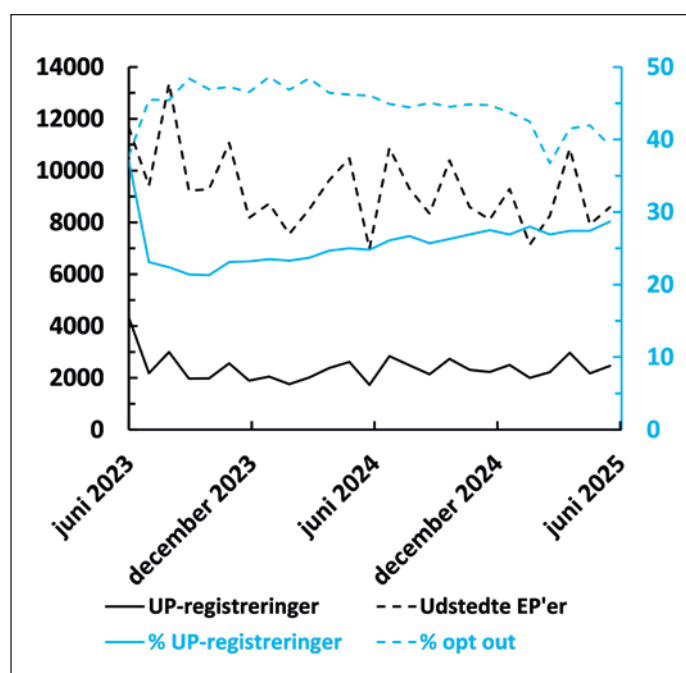
Aftalen, og de gule lande er med i det forstærkede samarbejde, men har ikke ratificeret Aftalen. Kroatien har aldrig taget stilling, og Spanien har valgt at stå udenfor. Alle EU-lande kan når som helst tilslutte sig Aftalen.

Enhedspatentregistreringer

Et UP dækker i dag Belgien, Bulgarien, Danmark, Estland,

Finland, Frankrig, Holland, Italien, Letland, Litauen, Luxembourg, Malta, Portugal, Rumænien, Slovenien, Sverige, Tyskland og Østrig. Irland kræver en folkeafstemning, der forventes, når politikerne er sikre på at opnå tilslutning. For de øvrige lande er det mere uklart, om der vil ske ændringer. Når et land tilslutter sig, vil et UP fremover dække landet, men det vil ikke gælde med tilbagevirkende kraft.

Figur 2 viser de første to års UP-registreringer sammen med de samlede EP-udstedelser (venstre akse) og procentdelen af UP-registreringer (højre akse). Frem til Aftalens ikrafttræ-



Figur 2. Absolutte og relative tal for UP-registreringer, udstedte EP'er og opt outs.

Sprog	Antal	Procent	UP-land?
Spansk	19.961	30,9	Nej
Engelsk	16.293	25,2	Kræves for EP på tysk eller fransk
Tysk	14.090	21,8	Ja
Italiensk	4.317	6,7	Ja
Fransk	3.273	5,1	Ja
Hollandsk	1.452	2,2	Ja
Polsk	1.119	1,7	Nej
Svensk	972	1,5	Ja
Rumænsk	619	1	Ja
Portugisisk	598	0,9	Ja
Finsk	471	0,7	Ja
Dansk	363	0,6	Ja
Tjekkisk	285	0,4	Nej
Bulgarsk	207	0,3	Ja
Græsk	122	0,2	Nej
Ungarsk	101	0,2	Nej
Slovakisk	86	0,1	Nej
Slovensk	65	0,1	Ja
Litauisk	51	0,1	Ja
Estisk	48	0,1	Ja
Lettisk	36	0,1	Ja
Maltesisk	11	0	Ja
Kroatisk	9	0	Nej
Irsk	2	0	Nej
<i>Total</i>	<i>64.551</i>	<i>100</i>	

Tabel 1. Oversættelser brugt ved UP-registreringer per 15. august 2025.

Proceduresprog	EP'er	Procent	UP-afgørelser	Procent
Engelsk	51.441	74,9	120	63,5
Tysk	13.370	19,5	58	30,7
Fransk	3.849	5,6	5	2,6
<i>I alt</i>	<i>68.660</i>	<i>100</i>	<i>189</i>	<i>96,8</i>

Tabel 2. Sprog hos EPO og UPC.

Land	Før UP	Efter UP	Ændring
Danmark	7,8	4,5	-42
Sverige	13	6,3	-52
Holland	17	12	-29
Spanien	19	18	-5
Norge	6,5	5,7	-12

Tabel 3. Procent validerede EP'er i udvalgte lande.

Område	Befolkning (mio.)
Frankrig + Tyskland	152,5
UP	318,4
UP + Spanien	365,6

Tabel 4. Befolkningstal fra CIA World Factbook.

Sagstype	Antal
Krænkelssager	384
Modkrav om ugyldiggørelse	310
Ugyldiggørelsessager	71
Modkrav om krænkelser	3
Erklæringer om ikke-krænkelser	4
Appel	242

Tabel 5. Udvalgte sagstyper hos UPC.

den kunne patentansøgere anmode den Europæiske Patentmyndighed (EPO) om udskydelse af udstedelse af patenter, så disse kunne registreres som UP'er, og den første måned blev en uforholdsmæssig høj procentdel (37 procent) registreret som UP, men der synes dog efterfølgende at være en stigende tendens.

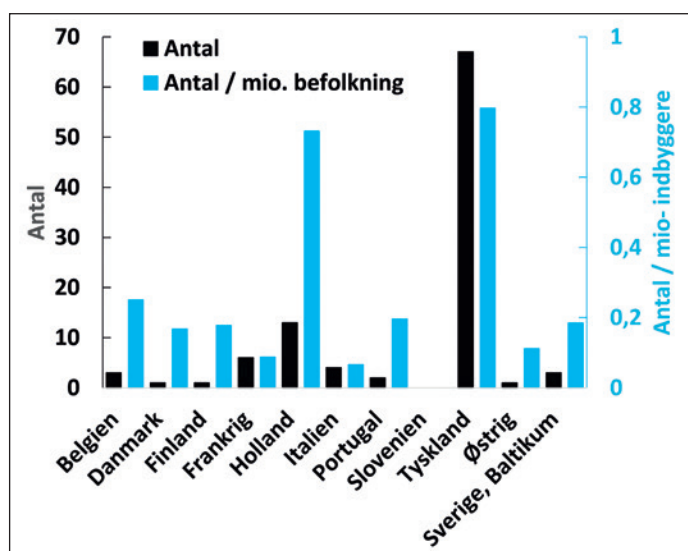
EP'er udstedes på engelsk, tysk eller fransk, og når et UP registreres, skal patentets tekst oversættes. Patenter på tysk og fransk skal oversættes til engelsk, men for patenter på engelsk kan man frit vælge blandt officielle EU-sprog, og man kan vælge en oversættelse, der kan benyttes til at validere patentet i et land, der ikke er dækket af UP'et. Tabel 1 viser, hvilke sprog der har været benyttet. Man kan vælge ud fra, hvor man får mest for pengene, og derfor kan spanske oversættelser veje tungt, men da visse lande kræver, at en første patentansøgning indsendes på det lokale sprog, kan de "mindre sprog" i tabel 1 afspejle, at der forud har eksisteret oversættelser til disse sprog. Til sammenligning viser tabel 2 proceduresprogene hos EPO.

EP'er kan fortsat valideres som før Aftalens ikrafttræden, men et EP kan ikke være i kraft for samme land som UP og valideret EP. Tabel 3 viser tal for valideringer i udvalgte lande før og efter Aftalens ikrafttræden. For UP-landene Danmark, Sverige og Holland synes der at være et signifikant fald i antal valideringer.

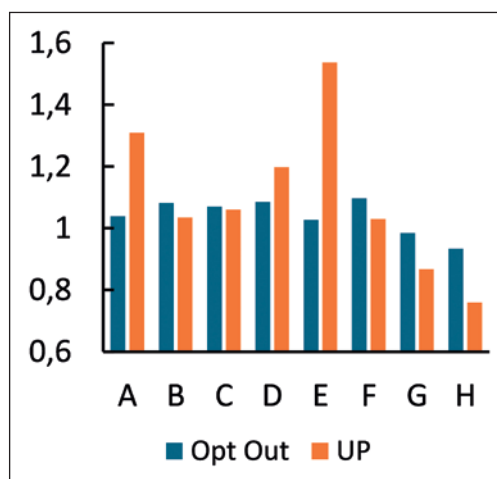
Frankrig og Tyskland kræver ikke yderligere oversættelse ved validering, og man kan dække en stor befolkningsgruppe for en lav pris med disse to lande (se tabel 4). Hvis blot et enkelt UP-land er vigtigt for patentbeskyttelse, vil den typiske pris for dette land være sammenlignelig med prisen for at registrere et UP.

Enhedspatentdomstolen

Retssager om EP'er skal føres ved Enhedspatentdomstolen (UPC), hvor krænkelssager anlægges ved en lokal eller den regionale afdeling af UPC, og ugyldiggørelsessager anlægges ved den centrale domstol. Tabel 5 viser antallet af hyppige sagstyper. Patenter klassificeres efter deres tekniske område, og den centrale domstol har tre afdelinger, der håndterer tekniske områder ud fra de internationale patentklasser (IC) A til H; tabel 6 sammenfatter IC-klasserne og viser klassernes andel mod det samlede antal EP'er, og tabel 7 viser antallet af patenter, som "hører til" hver afdeling, og antallet af afgørelser truffet hos de tre afdelinger. En patentansøgning klassificeres ofte i flere klasser på tværs



Figur 3.
Afgørelser ved
UPC's lokale
afdelinger.



Figur 4. Relativ
fordeling af
UP'er og *opt
outs* i IC-klasser.

af A til H, og derfor summerer tallene i tabel 6 til mere end 100. Af UPC's 189 afgørelser er 60 appelaftgørelser, og figur 3 viser antallet af afgørelser for lokale afdelinger i UPC-landene og en sammenligning med landenes befolkningsstørrelse.

Tilgængelige sprog defineres af de lokale afdelinger, som alle tillader de nationale sprog og engelsk, og tabel 2 viser også

IC	IC-beskrivelse	IC i %
A	Human necessities	24
B	Performing operations; transporting	31
C	Chemistry; metallurgy	20
D	Textiles; paper	2
E	Fixed constructions	5
F	Mechanical engineering; lighting; heating; weapons; blasting	16
G	Physics	33
H	Electricity	34

Tabel 6. Fordeling af EP'er i internationale patentklasser (IC).

Afdeling	IC	Afgørelser	'000 patenter
Paris	B, D, E, G, H	18	689
München	F	4	167
Milano	A, C	5	329

Tabel 7. Afgørelser fra de centrale afdelinger.

antal UPC-afgørelser på EPO's proceduresprog. Tyskland og Holland er traditionelle hotspots for patentsager, og dette skinner igennem, da begge lande også scorer højt på antal sager per millioner indbyggere, og desuden er andelen af tysksprogede UP-afgørelser væsentligt højere end andelen af EP'er på tysk.

Opt out af europæiske patenter

I en overgangsperiode kan patenthavere fravælge UPC's jurisdiktion for validerede EP'er, så en retssag føres ved en national domstol – dette kaldes *opt out*. En afgørelse truffet af UPC gælder umiddelbart i alle UP-lande, hvorimod nationale domstolsafgørelser netop er nationale. Som patenthaver må man afveje risikoen for at miste et patent mod fordelene ved at stoppe en krænkelse i alle UP-lande, men det er ikke entydigt, om *opt out* er bedre, end at et patent falder under UPC. En *opt out* kan dog altid trækkes tilbage.

En *opt out*-anmodning kunne indsendes, før Aftalen trådte i kraft, og angiveligt havde EPO modtaget 418.000 anmodninger 1. juni 2023. For tiden er der indsendt 540.000 *opt out*-anmodninger sammenlignet med 2,1 millioner udstedte EP'er og verserende EP-ansøgninger. Figur 2 viser også procentdelen af *opt out*-anmodninger sammenlignet med EP-udstedelser samme måned, og figur 2 kan tolkes at vise en faldende tendens i ønsket om at fravælge UPC.

Hvor *opt out*-procenten er omtrent 26 procent, er omkring 23 procent af alle EP'er registreret som UP'er, og figur 4 viser for hver IC-klasse den relative fordeling af *opt outs* mod det samlede antal EP'er/EP-ansøgninger og UP-registreringer mod det samlede antal UP-registreringer. Klasse E, *fixed constructions*, er en af de mindste IC-klasser, men UP-registreringer er åbenbart særligt interessante for patenthavere i denne klasse. Lægemedelpatenter er blandt de mest værdifulde patenter, og det er derfor særlig oplagt at overveje fordele og ulemper ved *opt out* mod UP-registrering. Klasse A er den typiske IC-klasse for lægemedelpatenter, og figur 4 antyder, at branchen har tillid til UPC, da relativt flere UP'er er registreret for denne klasse, og *opt outs* er tæt på gennemsnittet. Modsat har patenter for digital teknologi i klasse H det mindste relative antal UP-registreringer, men samtidig den laveste relative andel af *opt outs*. EPO oplyser, at de mest aktive firmaer til at registrere UP'er er Siemens AG, Samsung Group og Johnson & Johnson.

Afsluttende bemærkninger

Tal til denne artikel dækker patenter i kraft fra 1. juni 2023 og er især indhentet i september 2025 fra patentdatabasen PatBase. PatBase er sat op til at finde patentfamilier ud fra et søgekriterie, og et "hit" kan derfor både opfylde kriteriet og samtidig omfatte patentsager, der falder uden for kriteriet, og ydermere er databasen dynamisk, så samme søgning kan give varierende tal på adskilte dage, men de viste tal giver mit bedste bud på udviklingen inden for UP-systemet.

E-mail:

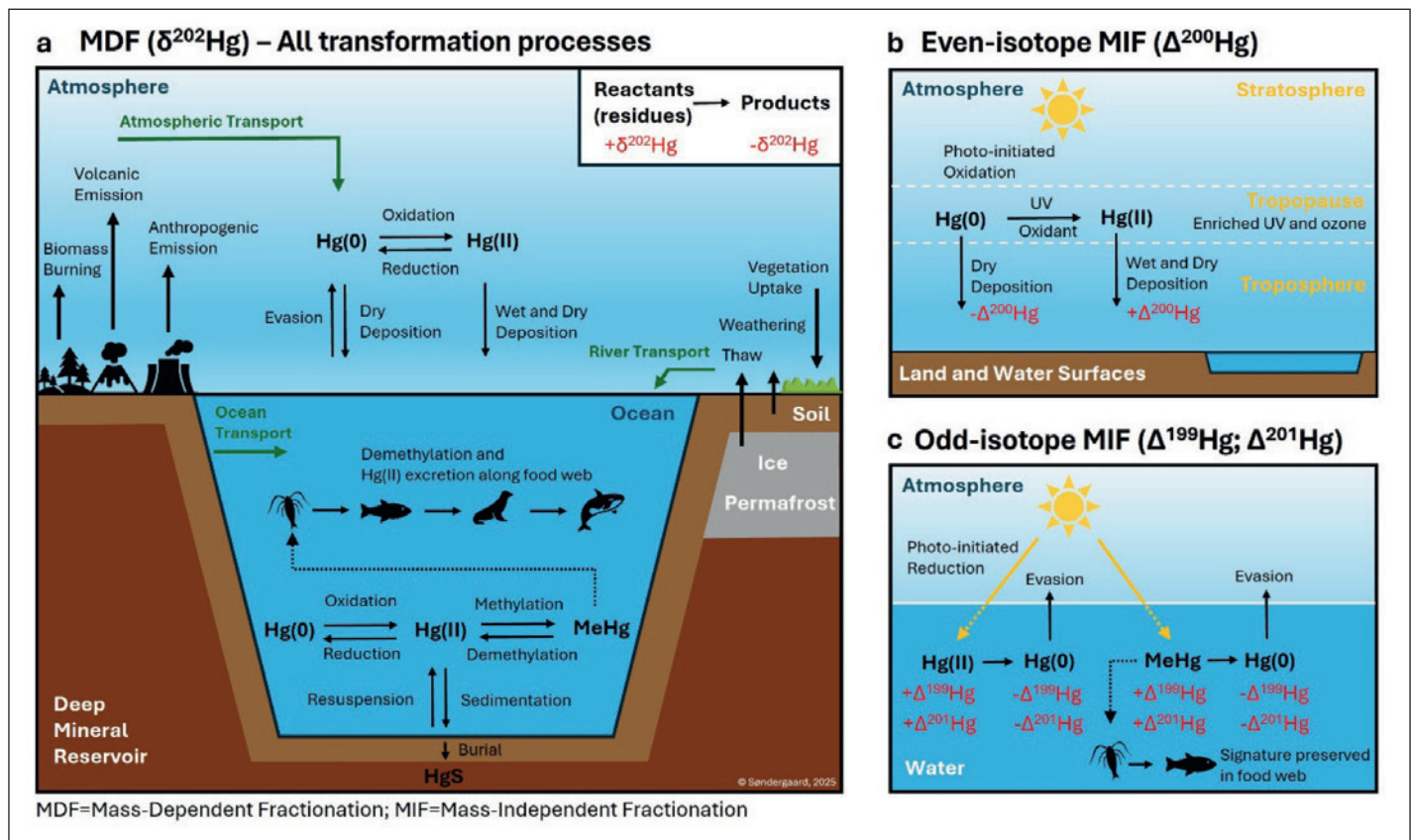
Anders Heebøll-Nielsen: anders.heeboll-nielsen@awa.com

Referencer

- Anders Heebøll-Nielsen. EU-patentet rykker nærmere. Dansk Kemi 92, nr. 3, 2011, pp. 16-17.
- Anders Heebøll-Nielsen. Fremtidens EU-patentsystem. Dansk Kemi 94, nr. 11, 2013, pp. 16-17.
- Anders Heebøll-Nielsen. Nu tror jeg på, at EU-patentet kommer! Dansk Kemi, 103, nr. 6, 2022, pp. 6-7.

Kan kviksølv-isotoper være nøglen til at forstå kviksølvforureningen i Arktis?

I de senere år har den teknologiske udvikling medført, at det er muligt at måle kviksølv-isotoper med så høj præcision, at disse kan bruges som et slags "fingeraftryk" og give ny viden om kilder, transportveje og processer i kviksølvets komplicerede kredsløb.



Figur 1. Kviksølv (Hg) kredsløbet i Arktis med de vigtigste kilder, transportveje og transformationsprocesser samt forskellige typer Hg-isotop fraktionering. **a** "Mass-Dependent Fractionation (MDF)" (beskrives ved $\delta^{202}\text{Hg}$ signaturen, se faktaboks 1, side 12) kan ske ved alle transformationsprocesser. **b** "Even-isotope Mass-Independent Fractionation (MIF)" (beskrives ved $\Delta^{200}\text{Hg}$ signaturen) sker kun som følge af fotokemisk oxidation i tropopausen [3]. **c** "Odd-isotope Mass-Independent Fractionation (MIF)" (beskrives ved $\Delta^{199}\text{Hg}$ og $\Delta^{201}\text{Hg}$ signaturen) sker som følge af fotokemisk reduktion af både uorganiske $\text{Hg}(\text{II})$ og methyl-Hg (MeHg) i vandmiljøet til frit $\text{Hg}(0)$ [4]. $\Delta^{199}\text{Hg}$ og $\Delta^{201}\text{Hg}$ signaturen ændres ikke ved bioakkumulering af Hg i fødekæden og kan således give information om de fotokemiske forhold i vandmiljøet, herunder for eksempel ændringer i isdække og turbiditet over tid, og ved hvilken vanddybde dyrene får deres primære Hg-optag fra.

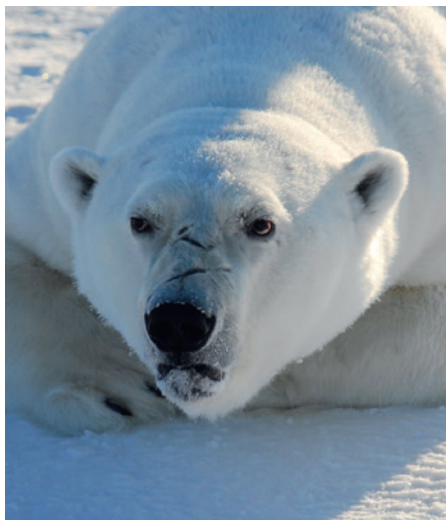
Af Jens Søndergaard, seniorforsker, Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet

I dag måles høje koncentrationer af kviksølv (Hg) i især top-rovdyr som isbjørne og tandhvaler i Arktis, hvor Hg

udgør et sundhedsproblem. Kviksølvet stammer både fra naturlige og menneskeskabte kilder, blandt andet afbrænding af kul og guldminedrift. Globalt er der stort fokus på at nedbringe Hg-udledningerne, blandt andet under FN's Minamata Konvention, som Danmark

tiltrådte i 2017. Men på trods af faldende globale Hg-udledninger og Hg-koncentrationer i atmosfæren over Arktis, har de seneste årtiers data vist en stigende tendens i de fleste biologiske tidsserier i Arktis [1].

Tidligere har det været antagelsen,



Isbjørne og tandhvaler er blandt de højest eksponerede dyr i Arktis i forhold til kviksølvforurening og indeholder i dag koncentrationer op til 20-30 gange højere end før industrialiseringen.

at Hg-koncentrationerne i dyrelivet var tæt koblet til globale Hg-udledninger til atmosfæren med efterfølgende langtransport og deponering i Arktis, men uoverensstemmelsen viser, at vi mangler viden om Hg-kredsløbet. Nu

er der imidlertid hjælp at hente, der kan gøre os klogere. I de senere år har udviklingen i massespektrometre og et videnskabeligt momentum medført, at Hg-isotoper kan anvendes til at give et os et helt nyt indblik i kviksølvets kredsløb, herunder kilder, transportveje og biogeokemiske transformationsprocesser i miljøet [2]. Det vil forbedre mulighederne for både at forstå og forudsige effekterne af Hg-reguleringen under Minamata Konventionen og dermed på sigt nedbringe Hg-belastningen.

Kviksølv-isotoper og fraktionering

Kviksølv har syv naturligt forekommende isotoper med følgende forekomst: ^{196}Hg (0.16%), ^{198}Hg (10%), ^{199}Hg (17%), ^{200}Hg (23%), ^{201}Hg (13%), ^{202}Hg (30%) og ^{204}Hg (6.8%). Data viser, at forskellige primærkilder til Hg ofte har små, men målbare, forskelle i isotopernes fordeling [2]. I kviksølvets efterfølgende kredsløb i naturen indgår en række processer som oxidation/reduktion, optag i vegetationen, fordampning og methylering/demethylering (figur 1).

Disse processer kan alle resultere i fraktionering, dvs. ændringer i isotopfordelingen. Alle reaktionerne kan medføre "Mass Dependent Fractionation (MDF)", der skyldes forskelle i bindingsenergier knyttet til isotopernes vægt med de laveste energier for de letteste isotoper. På grund af det forhold vil produkterne være opkoncentreret i de lettere isotoper og de tilbageblivende reaktanter være opkoncentreret i de tungere.

I kviksølvets kredsløb indgår imidlertid også processer knyttet til påvirkning af sollys, der kan resultere i en anden type fraktionering kaldet "Mass Independent Fractionation (MIF)". Denne fraktionering skyldes andre egenskaber ved isotopernes end kemisk bindingsenergi, blandt andet forskelle i kernespin og dermed magnetisk moment. MIF kan opdeles i "even-isotope MIF" og "odd-isotope MIF", der knytter sig til fraktionering af isotoper med hhv. et lige og ulige antal neutroner i kernen. Even-isotope MIF sker ved oxidationsprocesser i tropospausen [3] og odd-isotope MIF ses ved fotokemisk reduktion af methyl-Hg og uorganisk Hg i vandmiljøet [4] (figur ►

Sætter tempoet blandt vakuumpumper. HiPace turbopumper.

Vores turbopumper leverer vakuum til kemi- og laboratorieprocesser, hvor ekstremt lave tryk er nødvendige. HiPace turbopumper er ideelle til processer indenfor destillation, ekstraktion og massespektrometri. De sikrer dig præcise målinger og pålideligt vakuum.



Part of the **BUSCH GROUP**

PFEIFFER
VACUUM+FAB SOLUTIONS

www.pfeiffer-vacuum.com

1). MDF og MIF udtrykkes som en række deltaværdier (se faktaboks 1).

Hvad kan kviksølv-isotoper fortælle om kilder, transportveje og processer i Arktis?

En række studier er de senere år blevet udgivet om Hg-isotoper, der har forbedret vores viden om Hg-kredsløbet i Arktis [blandt andet 5-7]. Senest har en gruppe fra Aarhus Universitet (AU) og Københavns Universitet (KU) inkl. forfatteren af denne artikel undersøgt over 700 prøver af biologiske vævsprøver og tørveprofiler fra Grønland indsamlet over de seneste 40 år publiceret i det anerkendte tidsskrift Nature Communications [8]. Studiet viser blandt andet signifikante forskelle i Hg-isotoper mellem regioner i Grønland, der ikke umiddelbart kan forklares med forskelle i atmosfærisk langtransport og deponering, men

Faktaboks 1:

Beregning af deltaværdier for kviksølv (Hg) isotoper.

Typisk måles de seks Hg-isotoper: ^{198}Hg , ^{199}Hg , ^{200}Hg , ^{201}Hg , ^{202}Hg og ^{204}Hg (^{196}Hg måles oftest ikke på grund af den lave forekomst).

Derefter beregnes δ -værdierne som ratioen af isotoperne relativ til ^{198}Hg normaliseret i forhold til NIST 3133 standarden med nedenstående ligning. NIST 3133 måles altid umiddelbart før og efter hver prøve og man anvender middelværdien af disse.

$$\delta^{xxx}\text{Hg} = \left(\frac{\left(\frac{xxx\text{Hg}}{^{198}\text{Hg}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{xxx\text{Hg}}{^{198}\text{Hg}} \right)_{\text{NIST 3133}}} - 1 \right) \times 1000$$

$\delta^{202}\text{Hg}$ anvendes som udtryk for "Mass-Dependent Fractionation" (MDF).

Dernæst beregnes Δ -værdierne, der anvendes som udtryk for "Mass-Independent Fractionation" (MIF) med nedenstående ligning. Δ -værdierne udtrykker afvigelsen af hhv. $\delta^{199}\text{Hg}$, $\delta^{200}\text{Hg}$, $\delta^{201}\text{Hg}$ og $\delta^{204}\text{Hg}$ fra den teoretiske værdi, hvis der kun var foregået MDF, og med udgangspunkt i $\delta^{202}\text{Hg}$.

$$\Delta^{xxx}\text{Hg} = \delta^{xxx}\text{Hg} - (\delta^{202} \times m)$$

$m = \text{mass scaling factor}$

$m=0.252, 0.502, 0.752$ og 1.493 for hhv. $\delta^{199}\text{Hg}$, $\delta^{200}\text{Hg}$, $\delta^{201}\text{Hg}$ og $\delta^{204}\text{Hg}$

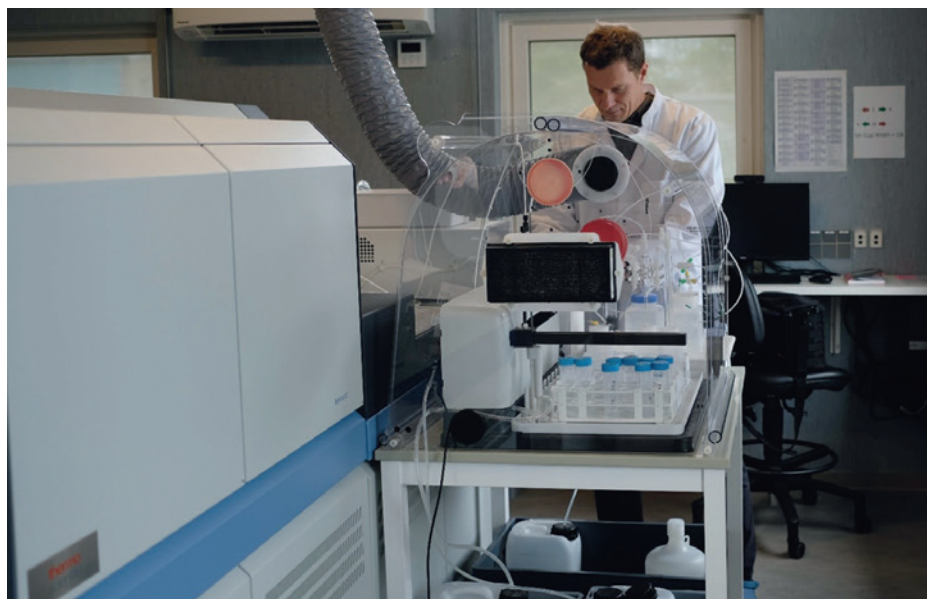


Foto: Michael Stranghøj

Analysen af kviksølv-isotoper foretages med et multi-collector induktivt-koblet plasma massespektrometer (MC-ICP-MS). Her ses Aarhus Universitets Thermo Neptune instrument på Institut for Ecoscience i Roskilde.

derimod korrelerer med havstrømme og påvirkning fra hhv. Polhavet og Atlanterhavet.

Andre studier har vist, at frigivelse af Hg fra havoverfladen (såkaldt evasion) med efterfølgende atmosfærisk deponering er en hovedkilde til Hg i de terrestriske arktiske områder [7,9]. Ovenstående tyder således på, at havstrømmene og dermed Hg oplagret i havet har større betydning for Hg-belastningen i Arktis end hidtil antaget. Det er vigtig viden, da den gennemsnitlige opholdstid for Hg i havet er over 300 år [10], hvor den i atmosfæren kun er 0,5-2 år [1], og kan være med til at forklare, hvorfor faldet i atmosfæriske Hg-koncentrationer over Arktis over de seneste årtier endnu ikke er slået igennem i dyrelivet. Studiet i Nature Communications giver desuden indblik i speciering af Hg ved atmosfærisk deponering, fraktionering af Hg i forskellige væv i nøgledyrearter som isbjørne og sæler og på forskellige trofiske niveauer samt udvikling i Hg-isotoper/kilder i Grønland over tid.

Arbejdet med Hg-isotoper på AU fortsætter i de kommende år, blandt andet under projektet GreenPath i samarbejde med KU støttet af Danmarks Frie Forskningsfond.

E-mail:

Jens Søndergaard: js@ecos.au.dk

Referencer

1. AMAP, 2021. AMAP Assessment 2021: Mercury in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway (<https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2021-mercury-in-the-arctic/3581>).

2. Tsui, M. T.-K., Blum, J.D., Kwon, S.Y., 2020. Review of stable mercury isotopes in ecology and biogeochemistry. *Science of the Total Environment*, 716, 135386 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719353793>).
3. Cai, H., Chen, J. Mass-independent fractionation of even mercury isotopes. *Science Bulletin*, 61, 116-124 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095927316302110>).
4. Bergquist, B.A., Blum, J.D., 2007. Mass-dependent and mass-independent fractionation of Hg isotopes by photoreduction in aquatic systems. *Science*, 318, 417-420 (<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1148050>).
5. Obrist, D. et al., 2017. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution. *Nature*, 547, 201-204 (<https://www.nature.com/articles/nature22997>).
6. Araujo, B.F., et al., 2022. Mercury isotope evidence for Arctic summertime re-emission of mercury from the cryosphere. *Nature Communications*, 13, 4956 (<https://www.nature.com/articles/s41467-022-32440-8>).
7. Huang, S., et al., 2025. Oceanic evasion fuels Arctic summertime rebound of atmospheric mercury and drives transport to Arctic terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 16, 903 (<https://www.nature.com/articles/s41467-025-56300-3>).
8. Søndergaard, J., Elberling, B., Sonne, S., Larsen, M.M., Dietz, R., 2025. Stable isotopes unveil ocean transported legacy mercury into Arctic food webs. *Nature Communications*, 16, 5135 (<https://www.nature.com/articles/s41467-025-60356-6>).
9. Sonke, J.E., et al., 2023. Mercury stable isotope composition of lichens and mosses from northern Eurasia reveals Hg deposition pathways and sources. *ACS Earth and Space Chemistry*, 7, 204-211 (<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsearthspacechem.2c00297>).
10. Kawai, T., Sakurai, T., Suzuki, N., 2020. Application of a new dynamic 3-D model to investigate human impacts on the fate of mercury in the global ocean. *Environmental Modelling and Software*, 124, 104599 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815219305894>).

Grønlandske miner og metaller

Mod en ansvarlig udnyttelse af råstoffer til den grønne omstilling.

Af Christian Juncher Jørgensen,
Christian Frigaard Rasmussen
og Jens Søndergaard,
Institut for Ecoscience
- Arktisk Miljø, Aarhus Universitet

Den moderne verdens umættelige appetit på teknologi er baseret på udvinding af metaller og mineraler fra bjergarter. Imens den tunge grønne omstilling er udnævnt som hovedløsningen på menneskeskabte klimaforandringer kommer den med en alvorlig pris, nemlig risikoen for ødelæggelse af natur og miljø, hvis ikke råstofudvindingen udføres på ansvarlig vis. Historien viser desværre, at tidligere tiders udvinding af mineraler og metaller har ført til omfattende forureninger rundt omkring i verden med blandt andet tungmetaller som bly, zink, kobber, cadmium og kviksølv grundet et utilstrækkeligt fokus på miljøbeskyttelse.

På Aarhus Universitet forsker vi i metoder til både forebyggelse og overvågning af miljøpåvirkninger fra minedrift i særligt Grønland, hvor undergrundens naturressourcer er kommet i fornyet fokus med EU's nye ramme for at sikre en sikker og bæredygtig forsyning med kritiske råstoffer.

Minedrift i Grønland

Minedrift begyndte for alvor i Grønland i 1850'erne med åbningen af kryolitminen ved Ivittuut i Sydgrønland. I det efterfølgende århundrede har der været udvundet bly, zink, sølv, guld, olivin, rubiner og anorthosit – og i mindre grad kul, grafit og kobber – ved et antal miner i Grønland. Tidligere tiders udvinding af kryolit, bly og zink ved minerne i Ivittuut (1854-1987), Mestersvig (1957-1963) og "Den sorte Engel" ved Maarmorilik (1973-1990) har medført en tungmetallforurening af det omkringliggende miljø med primært bly og zink.

Siden 1970'erne er miljøtilstanden ved de tidligere miner blevet overvåget ved regelmæssige indsamlinger af miljøprøver af marine og terrestriske nøglearter. Resultaterne fra miljøovervågningen viser, at forureningen primært er spredt til



Maarmorilik-minen efter nedlukning. En uafdækket gråbjergsdump ses på bjergsiden under aftegningen af "Den Sorte Engel".



Aktiv erosion af gråbjerg deponeret på en lokal dalgletsjer. Bemærk "orange mand" i bunden af elven for skala.

det marine miljø, hvor det i varierende koncentrationer og afstande fra kildeområderne kan spores i bundsedimenter, tang, muslinger og fisk. Men også i det terrestriske miljø kan forhøjede koncentrationer spores i både jord og vegetation koblet til spredning af mineralsk støv.

Kilder til tungmetallforurening

De konkrete kilder til tungmetallforurening fra tidligere miner i Grønland varierer fra sted til sted, men fælles for

alle er, at de er koblet til manglende afskærmning af det omkringliggende miljø fra det mineralske mineaffald, såkaldt gråbjerg (dvs. bjergarter uden økonomisk værdi) og tailings (dvs. det nedknuste restprodukt, der er tilbage, efter at de værdifulde mineraler og/eller metaller er udvundet).

Ved Ivittuut blev blyholdigt gråbjerg således deponeret i tidevandszonen langs kysten, hvorved opløseligt bly og zink blev udvasket til Arsukfjorden. ►



Prøvetagning af permafrossen tailings ved Mestersvig.

Ved Mestersvig blev finkornet tailings deponeret direkte i et elvleje. I tiden siden nedlukning af minen ved Mestersvig er størstedelen af den deponerede tailings blevet vasket ned gennem Tunneløven og ud i Kong Oskars Fjord, mens en mindre mængde stadig ligger tilbage med en ukendt andel nedfrosset i permafrost. Ved Maarmorilik blev store mængder bly og zinkholdigt gråbjerg dumpet direkte på bjergsiderne omkring minen, samt på en mindre dalgletsjer, hvorfra partikler og opløste grundstoffer blev udvasket til Wegener-elven og Qaamarujuk-fjorden. Tailings fra Maarmorilik blev deponeret på bunden af havet i en afsnøret sidefjord til Qaamarujuk-fjorden, hvorfra blyholdigt bundvand blev udvekslet med omgivelserne.

Vurdering af virkninger på miljøet

Resultaterne af miljøovervågningen ved de tre tidligere miner i Grønland har således med eksemplets magt vist, hvordan mangelfuld afskærmning af tungmetaller i mineaffaldsdeponier kan medføre langsigtede påvirkninger af miljøet. Men under mottoet *"Intet er så galt, at det ikke er godt for noget"* har disse tidligere mineområder været flittigt benyttet som vigtige studieområder for udvikling af metoder til miljømonitoring og kildesporing, som kan anvendes ved både nutidige og fremtidige mineprojekter i Grønland, samt givet en øget forståelse af mobilisering, spredning, bioakkumulering og effekter af især tungmetaller i det arktiske miljø.

Ny viden opnået ved studierne af miljøet ved de tidligere mineprojekter har

desuden bidraget til at indskærpe kravene til de projektspecifikke forundersøgelser, som indgår som en vigtig del af de VVM-redegørelser (dvs. Vurderinger af Virkninger på Miljøet) ved nye mineprojekters eventuelle godkendelse i Naalaakkersuisut (Grønlands regering).

Geokemisk karakterisering af udvaskning fra mineaffald

Alle nye mineprojekter i Grønland er underlagt skrappe dokumentationskrav for projektets mulige miljøpåvirkning fra blandt andet de planlagte deponier af gråbjerg og tailings. Mineselskaberne skal således fremlægge detaljerede planer for, hvordan de vil deponere de

mineralske restprodukter, samt hvordan de vil afskærme disse fra det omkringliggende miljø under drift og ved mine-lukning, så man minimerer risikoen for, at tungmetaller og andre fremmedstoffer undslipper til det omkringliggende miljø.

En vigtig forudsætning for denne planlægning er et indgående kendskab til forekomsten af miljøfarlige stoffer og tungmetaller i bjergarterne, mineralernes geokemiske sammensætning samt risikoen for udvaskning af potentielt miljøfarlige stoffer fra de faste partikler. Særligt bjergarter med et højt indhold af sulfid som for eksempel pyrit (FeS_2) har potentialet for at danne svovlsyre ved reaktion med ilt i atmosfæren, hvilket kan medføre dannelse af "Acid Mine Drainage", hvor grundstoffer som jern, mangan, kobber, zink, bly, arsen, cadmium og kviksølv, der ved neutral pH er mere eller mindre uopløselige, bliver udvasket i store koncentrationer til miljøet.

Til at dokumentere den kemiske stabilitet og udvaskningspotentialer fra gråbjerg og tailings på både kort og lang sigt efter deponering findes en række standardiserede geokemiske test, der varierer i både kompleksitet og varighed alt afhængigt af det konkrete formål. I mange tilfælde vil myndighederne kræve, at et større antal udvaskningstests ("humidity cell tests") bliver gennemført af op til 40 ugers varighed eller længere. I disse tests udsættes repræsentative prøver af gråbjerg og tailings for cyklisk eksponering til både vand og ilt, og drænvandets tidlige udvikling i pH, ledningsevne, indhold af



In situ måling af grundstofsammensætning af miljøprøver med bærbar XRF (pXRF).



Forfattergruppen ved feltarbejde ved Maarmorilik: Fra venstre: Christian Juncher Jørgensen, Jens Søndergaard og Christian Frigaard Rasmussen.

anioner (særligt sulfat SO_4^{2-}) og tungmetaller bestemmes ved kemisk analyse i laboratoriet.

Mod ansvarlig minedrift

Den grønne omstillings energiforsyning er råstofintensiv og afhængig af tilstrækkelig tilgængelighed af mineraler og metaller. Fremtidens råstofforsyning rummer grundlæggende en risiko for, at den øgede efterspørgsel på kritiske råstoffer kan føre til negative miljømæssige og sociale virkninger, såfremt den ikke forvaltes på ansvarlig vis. I Grønland er der et behov for til stadighed at udbygge vidensgrundlaget for håndtering og deponering af mineralsk mineaffald, særligt i områder med gletsjere og permafrost, hvis fremtidige stabilitet udfordres af igangværende ændringer i klimaet.

Et forbedret kendskab til de geologiske ressourcers geokemiske karakteristika og variation koblet til den til enhver tids bedst tilgængelige miljøbeskyttelsespraksis, miljølovgivning

teristika og variation koblet til den til enhver tids bedst tilgængelige miljøbeskyttelsespraksis, miljølovgivning



Kemisk forvitring af pyrit (FeS_2). Minerallets sulfider reagerer med atmosfærisk ilt og danner svovlsyre. Efterfølgende udvaskning af tungmetaller ses i den rustbrune fane nedenfor klumpen af pyrit.

og miljøovervågning er essentielt for at forebygge en gentagelse af fortidens synder. Men i sidste ende er det op til mineindustrien selv at skabe den nødvendige forandring indefra og integrere økonomisk bæredygtighed med miljømæssig ansvarlighed.

E-mail:

Christian Juncher Jørgensen:

cjj@ecos.au.dk

Referencer

- Søndergaard, J., Hansen, V., Bach, L., Jørgensen, C.J., Jia, Y., & Asmund, G. (2018). Geochemical test work in Environmental Impact Assessments for mining projects in Greenland - Recommendations by DCE and GINR. Aarhus University. <http://dce2.au.dk/pub/TR132.pdf>.
- Søndergaard, J., Hansson, S.V., Bach, L., Hansen, V., Sonne, C., Jørgensen, C.J., Nymand, J., & Mosbech, A. (2020). Environmental monitoring at mine sites in Greenland. A review of research and monitoring practices and their role in minimising environmental impact. Aarhus University. <https://dce2.au.dk/pub/SR364.pdf>.
- Søndergaard, J., & Jørgensen, C.J. (2021). Field Portable X-Ray Fluorescence (pXRF) Spectrometry for Chemical Dust Source Characterization: Investigations of Natural and Mining-Related Dust Sources in Greenland (Kangerlussuaq Area). Water Air and Soil Pollution, 232(4), Article 144. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05095-2>.
- Søndergaard, J., & Mosbech, A. (2022). Mining pollution in Greenland - the lesson learned: A review of 50 years of environmental studies and monitoring. Sci Total Environ, 812, 152373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152373>.
- Jørgensen, C.J., Aastrup, P., Bach, L., Bagger, A.M.T., Blockley, D., Boertman, D., Fredsgaard, S.L., Fritt-Rasmussen, J., Jacobsen, I.B.D., Jia, Y., Johansen, K.L., Nyemand, J., Rasmussen, C.F., Raundrup, K., Søndergaard, J., Vad, K.T., Zinglersen, K., og Gustavson, K. (2025). DCE/GN's rådgivning vedr. opdatering af: Retningslinjer for udarbejdelse af VVM-redegørelse for udnyttelse af mineralske råstoffer i Grønland. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 78 s. 2025. (in press).

Har du bæredygtighed i fokus?



Bæredygtigt laboratorieudstyr fra CAPP – præcision med omtanke

- CAPP Ecopipette fremstillet af genanvendeligt plast
- CAPP ExPelIPlus PaperBox racks i genanvendeligt karton
- CAPP plast-racks fremstillet af 100 % genanvendt plast
- CAPP pipettespidser i refill-racks af genanvendeligt karton



DACOS
- EN DEL AF DIATOM A/S

DRIFTON
THE SCIENCE OF DISPENSING

Besøg drifton.dk, eller kontakt os på 3679 0000 eller info@drifton.dk

Bliv fri for begroning: Del 3

Væskens vilde vej.



Foto: Freepik.com

Af Isaac Appelquist Løge,
DTU Kemiteknik, Center for Energy
Ressource Engineering (CERE)

I de to første afsnit af denne serie beskrev vi, hvordan krystalvækst sker, og hvordan det sætter sig fast. Nu er vi nået til den tredje hovedaktør: selve væskestrømmen, der bærer de reaktive materialer.

I laboratoriet kan forskere måle, at højere flow enten accelererer eller sænker mængden af krystaller, der bliver siddende på væggen. Når man læser hele den akademiske litteratur på emnet igennem, springer paradokset i øjnene: 14 studier peger på, at højere væskehastighed giver mere vækst, hvorimod 17 studier mener, at der bliver mindre vækst. I denne artikel vil vi se nærmere på forklaringen bag dette paradoks [1].

Når buffet og madpakke forveksles

Den tilsyneladende uenighed bliver

mindre mystisk, når man opdager, at forsøgene falder i to lejre. I de "åbne" systemer – altså dem, hvor der hele tiden tilføres friske ioner – vokser krystallerne næsten altid hurtigere, jo mere vandet piskes rundt. I de "lukkede" systemer, hvor opløsningen gradvist tømmes for byggesten, giver ekstra flow derimod et fald i nettoaflejringen, fordi krystalaget bliver revet løs, før nye ioner kan erstatte de mistede molekyler.

Det hjælper at tænke på to frokost-scenarier, der i praksis er hinandens modsætninger.

Forestil dig først en kontinuerligt fyldt buffet på et hotel: ethvert fad, der bliver tømt, fyldes øjeblikkeligt igen, så gæsterne kan øse uendelige portioner op. Jo hurtigere de bevæger sig gennem buffeten, jo mere mad kan de indtage, lidt som ionerne i et åbent system, hvor øget flow blot skaffer flere byggesten til overfladen, hvor reaktionshastigheden stiger.

Tager vi derimod på vandretur med en

madpakke i rygsækken, er mængden af rugbrødsmadder fastlagt fra start. Hvis man spiser hurtigere, når man hurtigere igennem maden og ender sulten, længe inden turen slutter; på samme måde skylles ionerne hurtigere forbi overfladen i et lukket system, og laget får ikke tid til at vokse.

Tre regimer – én fælles ramme

Man kan forstå effekten af væskens hastighed på, hvor hurtigt krystallerne gror med en konceptuel tre-regime-model, der sætter ord på de modstridende observationer. Hvert regime er defineret ved, hvilken grundlæggende mekanisme der begrænser væksten.

I transportregimet er det tilførslen af ioner, der halter, og derfor stiger lagtykkelsen, hver gang pumpehjulet får et nøk opad.

I reaktionsregimet kan overfladen ikke "spise" ionerne hurtigere, uanset hvor kraftigt de kommer susende.

Og i adhæsionsregimet er det væskens forskydningsspænding τ , der overgår krystalagets indre styrke, så aflejringen falder. Nogle gange helt til nul.

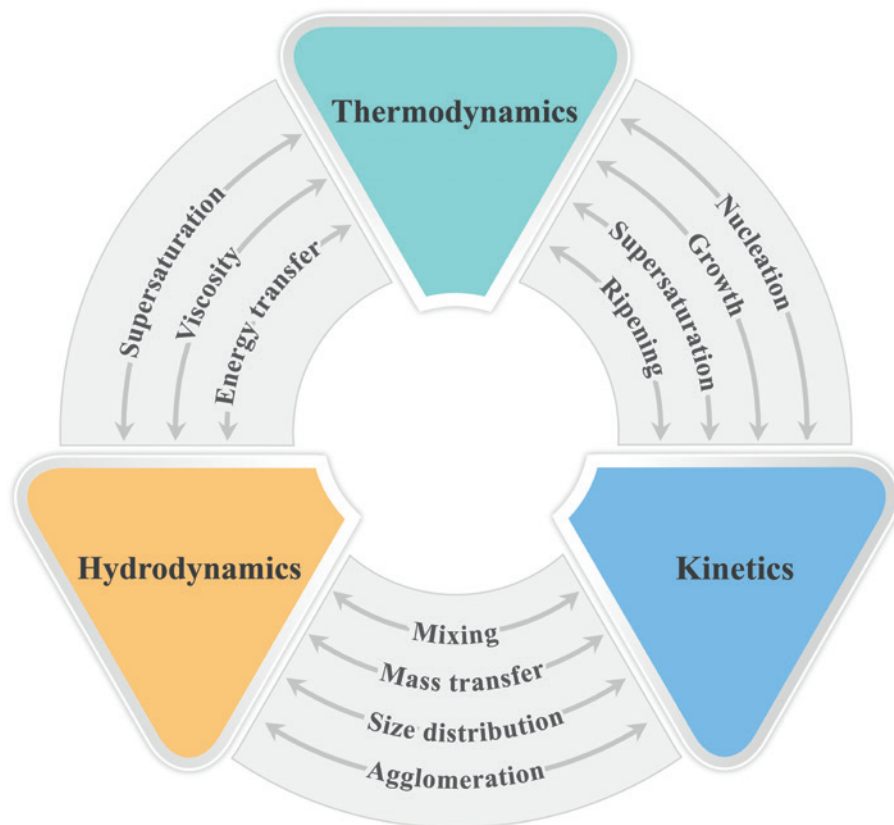
Overgangen fra ét regime til et andet sker ikke ved én universel hastighed, men afhænger af både mineral, overflade og temperatur. Netop derfor dukker man ofte ned i forskellige regimer, når man flytter et forsøg fra glasrør i laboratoriet til en stålvarmeveksler på et procesanlæg.

Eksempler på, at virkeligheden skifter gear

To forskere, Al-Hadhrani og Quddus, viste, at når CaSO_4 bliver dannet ved en højere og højere hastighed, fladede kurven ud, hvilket peger på, at man gled over i et reaktionsbegrænset felt, hvor ekstra turbulens ikke gjorde nogen forskel. De kom altså i et tilfælde af, at der var nok mad til gæsterne i buffeten, og selvom fadene blev fyldt hurtigere op, blev gæsterne ikke mere mætte [2].

I et varmevekslerstudie fra Mwaba og kolleger opstod der derimod et tydeligt maksimum for CaCO_3 : Da shearstress først oversteg lagets adhæsion, begyndte krystallerne at slippe, og nettoaflejringen faldt asymptotisk, i takt med at man skruede yderligere op for hastigheden.

Det mest dramatiske eksempel kommer fra Masoudi, som målte, at et CaSO_4 -lag ophørte fuldstændigt med at eksistere, når den kraft, overfladen oplevede oversteg 23 mPa; systemet hoppede direkte ind i adhæsionsregimet [3].



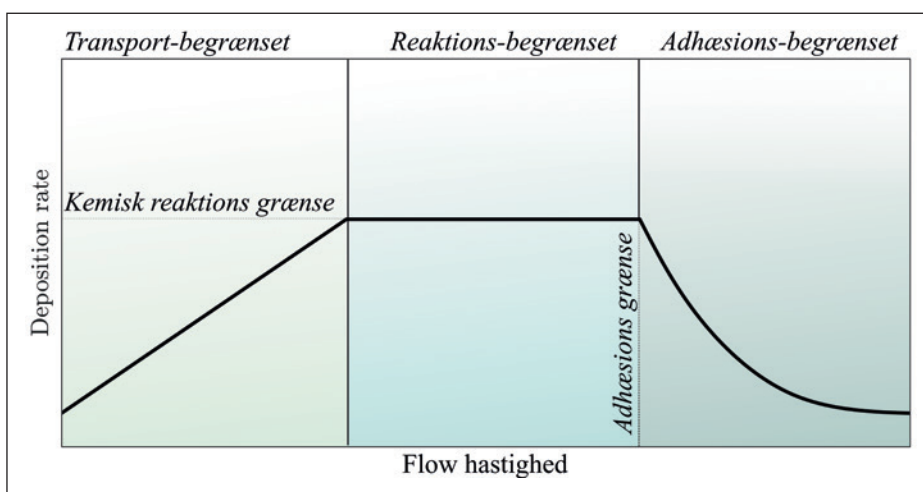
De tre hjørneste i overfladeaflejring; termodynamik, kinetik og hydrodynamik, er forbundet i et dynamisk kredsløb. Termodynamikken sætter drivkraften via overmætning og temperatur, kinetikken omsætter drivkraften til kimdannelse, vækst og modning, mens hydrodynamikken styrer blanding, masstransport og partikelstørrelse. Kun ved at se de tre discipliner samlet kan man forudsige, om krystaller bygger videre på overfladen eller skylles væk.

Den hemmelige styrke under laget

Hvorfor kan to tilsyneladende ens lag reagere så forskelligt?

En del af svaret ligger i, at krystal-lag ikke er homogent. Allerede i 1990'erne viste forskere, at lagstyrken kan variere med en faktor 30 fra

inderst til yderst i et fem millimeter tykt CaSO_4 -lag [4]. Porøsitet, defekter, indlejrede partikler og mikroporer betyder, at σ ændrer sig, mens laget vokser; de tal, vi måler i ét tykt stykke skala, gælder derfor ikke nødvendigvis to centimeter længere henne i systemet.



Krystallaflejring følger en tre-regime-kurve: Ved lav væskehastighed er iontransport begrænsningen, og aflejningsraten vokser næsten lineært med flowet – som gæster ved en hotelbuffet, hvor retterne fyldes konstant, og hurtigere bevægelse giver mere mad (flere ioner). Når tilførslen overstiger den kemiske reaktionsgrænse, når et reaktionsbegrænset plateau, hvor overfladen "spiser" så hurtigt, den kan, uanset hvor kraftigt vandet piskes rundt. Øges hastigheden yderligere, skifter scenariet til "madpakke": ionerne skylles forbi uden at blive indbygget, shear-kræfterne overskrider lagets adhæsionsgrænse, krystaller rives løs, og nettoaflejringen falder mod nul.

De største ubekendte

Selv om tre-regime-modellen giver et fælles sprog, er der mange åbne spørgsmål, der hindrer vores evne til at forudsige, hvor hurtigt krystallerne gror. For det første er der stadig ingen konsensus om, hvordan man beregner den reelle adhæsionsstyrke, når krystaldefekter, forskellige krystalformer og temperatur ændrer sig undervejs i vækstens tilkomst.

For det andet er de lokale stressfordelinger vanskelige at måle i rør, hvor selve krystallerne forvrænger strømningens feltet og skaber mikrovirvler, som standardmodeller overser.

Endelig står det uklart, hvordan ionkoncentration påvirker lagets interne vekselvirkninger; studier antyder, at højere koncentrationer kan gøre lagene mere tætte og dermed stærkere [5].

Afslutning

Fra ioner i opløsningen over overfladens mikromønstre til væskens vilde vej tegner der sig et fælles motiv: Krystalliseringsfouling er ikke én fjende, men et levende samspil mellem kemi, materialer og hydrodynamik.

Først når modellerne rummer alle tre dimensioner, og især når de tør tage fat på de stadig ukendte mekanikker bag adhæsion og mikro-shear, kan vi begynde at forudsige og forhindre de driftsstop, der hvert år koster industrien milliarder.

Indtil da vil den bedste kurs være at forstå krystalstyrken og vækststyrken. Dertil skal man huske, at selv den mest uskyldige vandstråle kan skifte rolle, når betingelserne ændrer sig.

E-mail:

Isaac Appelquist Løge: isacl@kt.dtu.dk

Referencer

1. Løge, I.A. & Anabaraonye, B.U. The importance of detachment processes in modelling crystallization fouling. *Chemical Engineering Journal* 497, 154642 (2024).
2. Qudus, A. & Al-Hadhrani, L.M. Hydrodynamically deposited CaCO_3 and CaSO_4 scales. *Desalination* 246, 526-533 (2009).
3. Masoudi, A., Irajizad, P., Farokhnia, N., Kashyap, V. & Ghasemi, H. Antiscaling Magnetic Slippery Surfaces. *ACS Appl Mater Interfaces* 9, 21025-21033 (2017).
4. Bohnet, M.W. Crystallization Fouling on Heat Transfer Surfaces-25 Years Research in Braunschweig. *Heat Exchanger Fouling and Cleaning – Challenges and Opportunities* RP2, 295-302 (2005).
5. Løge, I.A., Anabaraonye, B.U., Bovet, N. & Fosbøl, P.L. Crystal Nucleation and Growth: Supersaturation and Crystal Resilience Determine Stickability. *Cryst Growth Des* 23, 2619-2627 (2023).

Er der salat i solcreme?

Afhængigt af ens ophold udendørs, solindfaldet dér og ens lysfølsomhed kan man få brug for solcreme på alle tider af året, så her skriver vi også om det i november. Som ved de fleste andre kemibaserede produkter kan man støde på ejendommelig nomenklatur, når man studerer ingredienslisterne for solcremer.

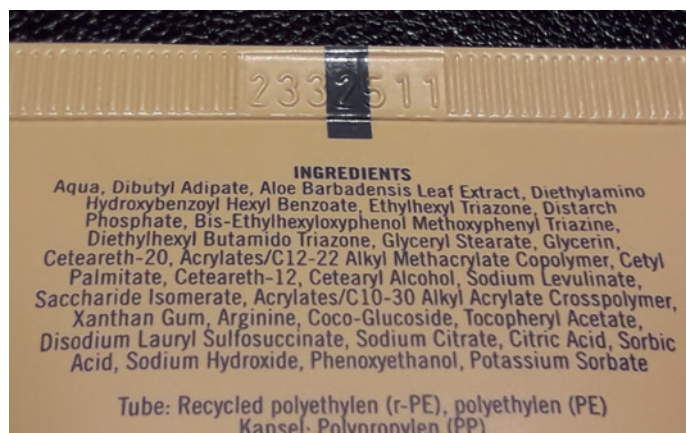
Som det kan anes på de to (anonyme) produkter vist i grønne omgivelser på figur 1, er ingredienslisterne umådelig lange. På flasken er anført 34 ingredienser. Listen på tuben med 29 indholdsstoffer ses på figur 2. Hvis læsere med farmaceutisk indsigt kan fortælle, hvorfor *så mange* ingredienser er nødvendige, er vi meget lydhøre. Billedet er i øvrigt det samme på mange kosmetiske præparater. (Der er stof til mange nomenklaturklumper der!). Der er flere forbindelser, der formentlig har virkning som solfiltre, men også rigtig mange hjælpestoffer. Navnene i figur 2, der kan se lidt fremmedartede ud, er INCI-navne, som er nærmere beskrevet i en tidligere artikel [1].

Der er dog to ingredienser, der ikke er nævnt på de to produkter, men som var fremhævet i en artikel i Politiken [2], der beskæftigede sig med de mulige hormonforstyrrende virkninger af ingredienser i solcremer og henviste til en undersøgelse af en række solcremer udført i år af Forbrugerrådet Tænk Kemi. De to pågældende stoffer blev i artiklen benævnt **4-methylbenzylidene camphor** og **homosalat** (ja!). Nomenklaturistens interesse er vakt.

Det første navn, som ikke præcist specificerer strukturen



Figur 1. To solcremer indkøbt på dansk apotek i 2025 – og dansk grøn salat. Som det ses, er de to emballager tæt beskrevet med ingredienslister og anvendelsesanvisninger. Man skal have luppen frem.



Figur 2. Ingredienslisten fra tuben på figur 1, forstørret passende op.

af forbindelsen, giver anledning til et klassisk kedsommeligt skoleridt i systematisk nomenklatur. Præfikset 'benzyliden' (uden slut-'e' på dansk) er et andet navn for substituentgruppen phenylmethyliden, $C_6H_5-CH=$, og meningen her er, at der er sat en methylgruppe på benzyliden i 4-position i phenylgruppen. IUPAC har i den seneste *Blue Book* [3] indført *preferred names* (foretrukne navne) og derudover acceptable navne, der kan bruges i 'general nomenclature'. I preferred names accepteres substitution i benzyliden ikke, så det foretrukne systematiske navn for vores substituentgruppe her er (4-methylphenyl)methyliden. Så vidt så godt. Men hvor sidder gruppen fast på campher (som vi staver det på dansk)? Det siger navnet ovenfor ikke noget om. Figur 3 viser strukturen. Nu er campher ikke et systematisk navn og er sådan set principielt ikke født med en standardnummerering af skeletatomerne. Men det er stamhydridet bornan (som såmænd bare er campher uden oxogruppen; se [3, Appendix 3]); campher er systematisk bornan-2-on; skeletatomet med to hydrogenatomer ved siden af oxogruppen har nummeret 3; og så bliver et færdigt systematisk navn for vores solcremeforbindelse

3-[(4-methylphenyl)methyliden]bornan-2-on.

Bornan er her et trivialnavn, der er blevet ophøjet til acceptabelt stamnavn. (Er man ikke til det, er det fuldsystematiske navn for bornan selv 1,7,7-trimethylbicyclo[2.2.1]heptan).

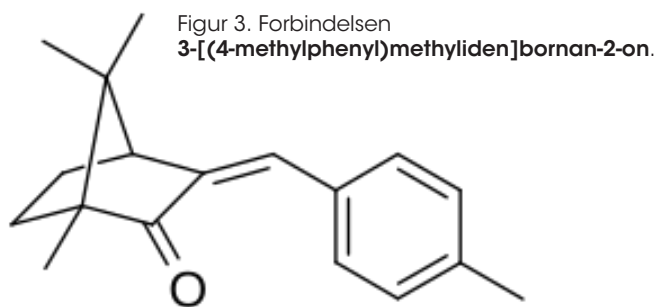
Det andet navn er mere spektakulært. Se strukturen i figur 4. Præfikset 'homo' kender vi fra navnlig aminosyrer som homocystein og homoserin; det betegner tilføjelse af en methylengruppe i carbonkæden, altså dannelse af en højere *homolog*. Der er også en anden betydning af 'homo', nemlig 'det samme', som for eksempel i *homocykliske* forbindelser med lutter ens ringatomer.

Men hvad med 'salat'? På engelsk er det ikke så sjovt som på dansk; dér hedder det noget med 'salate', således har CheBI [4] tre sådanne 'salates': salsalate, xenisalate og etersalate.

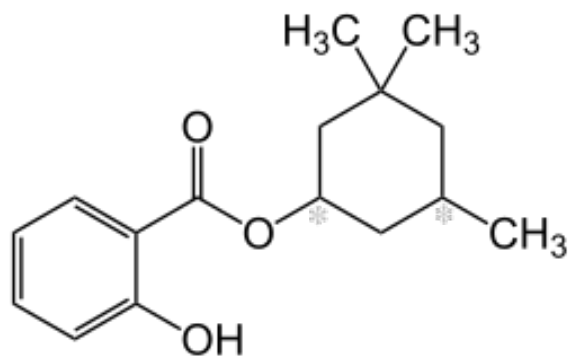
De er alle, ligesom homosalat, estere af **salicylsyre**. *Aha!* Forskellige netsteder forklarer homosalat/Homosalat (hhv. engelsk og tysk) som en afkorting af homomenthyl salicylate/Homomenthylsalicylat.

For eksempel [5,6]. *Hmmm*. Cyclohexandelen af vores forbindelse er *m*-menthan (*m* = meta), så en substituentgruppe afledt deraf kunne godt kaldes menthyl, men homo synes så ikke at passe ind her.

(Det viser sig faktisk, at CheBI også har vores forbindelse,



Figur 3. Forbindelsen
3-[(4-methylphenyl)methyliden]bornan-2-on.



Figur 4. Forbindelsen 'homosalat' med det systematiske navn **3,3,5-trimethylcyclohexyl[2-hydroxybenzoat]**. Navnet dækker over fire stereoisomere, to *cis*-forbindelser (med salicylatgruppen og den enlige methylgruppe på samme side af cyclohexanringen) og to *trans*-forbindelser; de to markerede carbonatomer er asymmetriske. I solcremer er der formentlig en blanding af disse isomere. Salicylatdelen af molekylet sørger for UV-absorption, mens cyclohexandelen sørger for, at forbindelsen ikke er vandopløselig. Forbindelsen i figur 3 har en lignende molekylær strategi.

blot ikke med navnet homosalat, men dog med synonymet homomenthyl salicylate).

Nok om det. Hvad med bekymringen om stoffernes eventuelle skadelige virkninger, som der blev refereret til i [2]? Regulatorisk trådte den seneste ændring til EU's kosmetikforordning [7] i kraft 1. september i år [8] – de to stoffer er ikke nævnt dér, men homosalat er nævnt i bilag VI, som er en liste over tilladte UV-filtre [9]. Homosalat må herefter kun bruges i ansigtsprodukter (dog ikke spray) op til 7,34 %. Forbindelsen fra figur 3 – der også er kendt under sit *international non-proprietary name* (INN, også berørt i [1]) **enzacamene** [10] – blev forbudt i 2024 [11] således, at stoffet fra den 1. maj 2026 ikke må forefindes i kosmetiske produkter i EU.

AM & TD, Nomenklaturudvalget

Referencer

1. A. Mortensen: Kemisk nomenklatur til kosmetik, *Dansk Kemi* 105 nr. 1 (2024) 24-25. Artiklen kan også findes i Nomenklaturudvalgets artikelarkiv på kemisknomenklatur.dk.
2. Politiken, 1. sektion, side 11, 15. juni 2025.
3. *Nomenclature of Organic Chemistry. IUPAC Recommendations and Preferred Names 2013*.
Online-version her: <https://iupac.qmul.ac.uk/BlueBook/PDF>.
4. <https://www.ebi.ac.uk/chebi/>.
5. <https://www.medchemexpress.com/>.
6. <https://de.wikipedia.org/wiki/Homosalat> (tilgået 17/10-25).
7. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02009R1223-20250901>.
8. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2025/877/oj/eng>.
9. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32022R2195>.
10. <https://en.wikipedia.org/wiki/Enzacamene> (tilgået 17/10-25).
11. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32024R0996>.

Dansk Kemi

Freelance-redaktør til fagbladet Dansk Kemi - deltidsstilling

Da vores redaktør Hanne Christine Bertram stopper, søger vi en redaktør til et af Danmarks ældre fagtidsskrifter, Dansk Kemi.

Dansk Kemi bringer aktuel og dybdegående information om kemien og dens udvikling inden for industri, forskning og uddannelse. Bladet er desuden medlemsblad for Kemisk Forening og Kemiingeniørgruppen under IDA.

Bladet har i mere end 100 år bidraget til at udbrede kendskabet til alle former for kemi inden for kemisk industri, levnedsmiddelindustri, bioteknologisk industri, farmaci, miljø mv.

Jobbet består i at indsamle, redigere og skrive artikler til bladet i samarbejde med bladets eksterne fagredaktion. Den eksterne fagredaktion består af personer fra universiteter og virksomheder, og mødes 4-6 gange årligt.

Det vil være en fordel, hvis du har erfaring med at skrive og formidle teknisk stof, og jobbet kræver indgående kendskab til kemi.

Stillingen svarer til en deltidsstilling, og der kan forventes et tidsforbrug på ca. 40 timer pr. udgave. Bladet udkommer 6 gange årligt. Honoraret er fastsat i overensstemmelse med dette.

Send gerne en ansøgning hurtigst muligt og senest den 15. december 2025.

For ansøgning eller for yderligere oplysninger om stillingen som redaktør på fagbladet Dansk Kemi rettes henvendelse til administrerende direktør David Wall, TechMedia A/S, mail: david@techmedia.dk - tlf. 40 13 00 29

Materialer til konstruktion af små modulære atomreaktorer med smeltet fluorid-salt

4. generations atomkraftreaktorer, der bruger smeltet salt som brændsel eller kølemiddel, er ved at blive udviklet i Danmark, men hvad kan vi bygge dem af?

Af Xenia Bredahl Gjelsten¹, Alfred Ager Bräuner², Nigel Lucas², Morten Stendahl Jellesen³, John Hald³ og Thomas Just Sørensen¹

¹ Kemisk Institut, Københavns Universitet

² Copenhagen Atomics A/S

³ DTU Construct

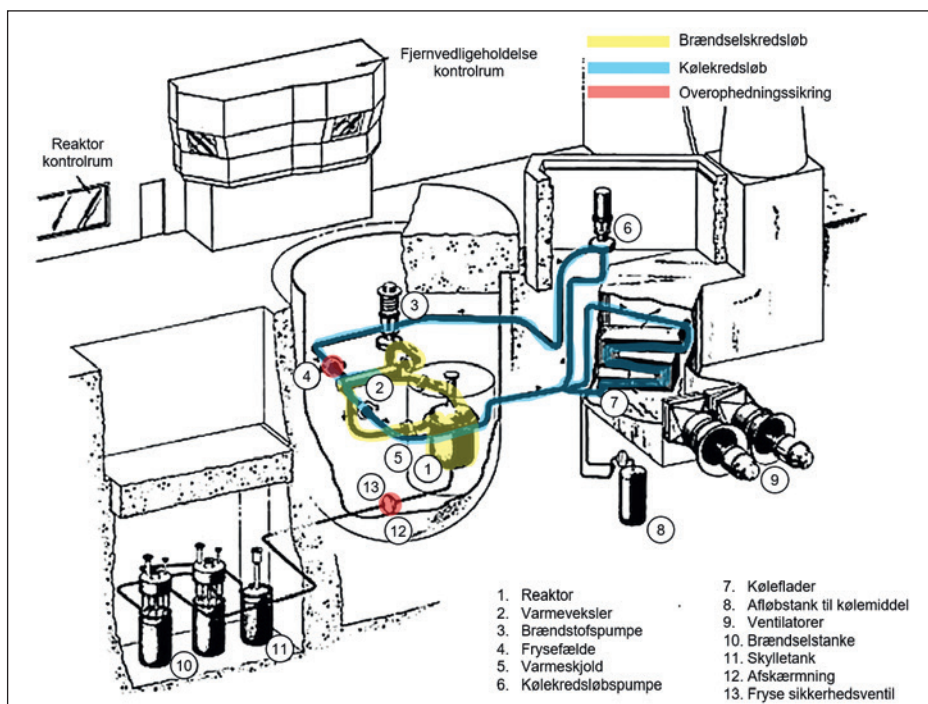
Selvom atomkraft ikke overvejes som en energikilde i Danmark, så aftager vi strøm lavet med atomkraft fra vores nabolande, og OECD antager, at vi kun kan nå vores klimamål i 2050, hvis vi får en betydelig andel af vores energi fra atomkraft [1,2]. En måde, det kan opnås, er gennem udviklingen af små modulære reaktorer som dem, der bliver ud-

viklet af Saltfoss Energy og Copenhagen Atomics. Begge er inspireret af et eksperiment med en saltsmelte-atomreaktor (the Molten Salt Reactor Experiment eller bare MSR-eksperimentet), der kørte ved Oak Ridge National Laboratory fra 1965 til 1969 [3]. Det forventes ikke, at der står en saltsmelte-atomreaktor klar før tidligst 2030. Der er klare sikkerheds- og driftsmæssige fordele ved at bruge smeltet salt, men der er også udfordringer ved at bruge reaktive salte ved høje temperaturer. Vi har undersøgt, hvordan smeltet fluoridsalt uden radioaktive grundstoffer påvirker materialer lignende dem, der blev brugt i MSR.

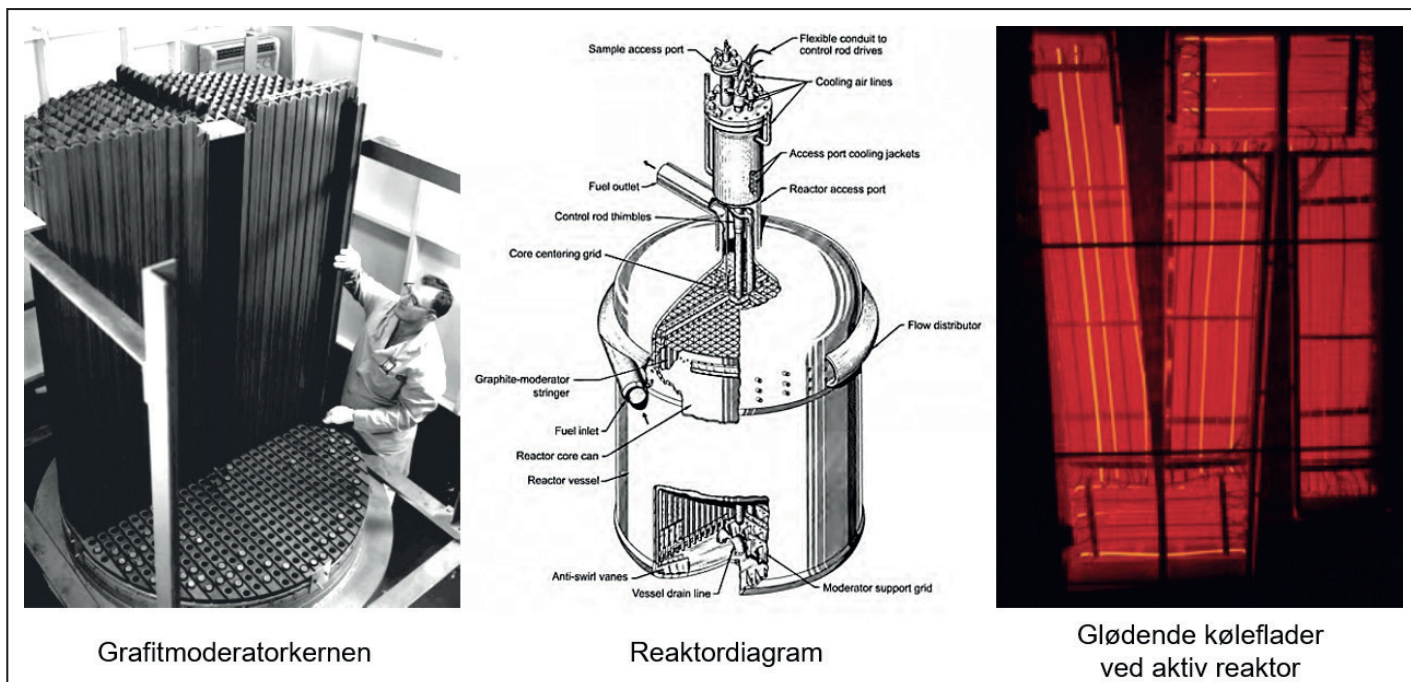
Smeltet saltreaktor-eksperimentet på Oak Ridge National Laboratory

Allerede i designfasen til MSR-eksperimentet var der store overvejelser om, hvilke materialer der kunne benyttes til at huse det smeltede salt. Det åbenlyse valg var rent nikkel, men det har ikke tilstrækkelig styrke. Derfor blev en nikkellegering indeholdende primært nikkel, krom, molybdæn og jern, kaldet Hastelloy N udviklet, og reaktoren blev bygget i dette materiale. Atomreaktoren kan ses i figur 1, og elementer af værket er vist i figur 2. Det består af to kredsløb, hvori der flyder smeltet fluorid-salt ved $>500^{\circ}\text{C}$.

Det første kredsløb – brændselskredsløbet – går mellem reaktoren og var-



Figur 1. Diagram over smeltet saltreaktor-eksperimentet på Oak Ridge National Laboratory [3].



Figur 2. Billede af moderatorkernen i grafit, der illustrerer størrelsen af MSR-reaktoren. Diagram over reaktoren. Billede af kølefladerne på smeltet saltreaktor-eksperimentet, da de var i drift [3].



Figur 3. Øverst: Korrosion i brændselskredsløbet ved tab af materiale for Hastelloy N (INOR-8) efter 800 dage ved $>500^{\circ}\text{C}$ i smeltet salt med bestråling på $1.5 \cdot 10^{21}$ neutrons/cm². Nederst: Korrosion i kølekredsløbet, blandt andet på grund af tab af krom i korngrenser Hastelloy N (INOR-8) efter 800 dage ved $>500^{\circ}\text{C}$ i smeltet salt uden bestråling [3].

meveksleren. Det flydende salt indeholdende beriget uran og fissionsprodukter bliver pumpet gennem dette kredsløb.

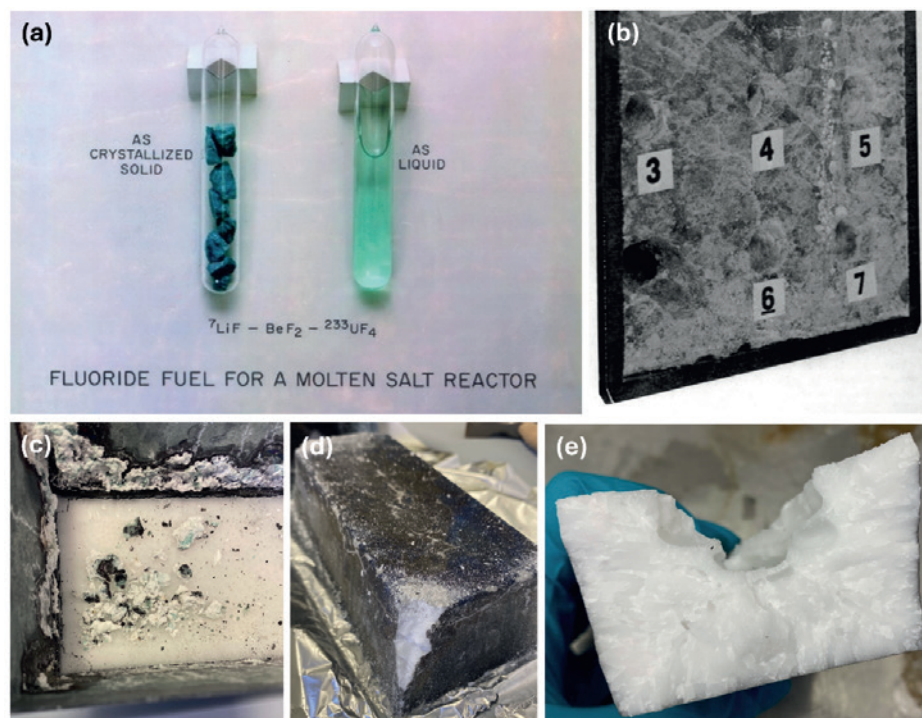
Det andet kredsløb – kølekredsløbet – går fra varmeveksleren over i en køleflade og tilbage i varmeveksleren. Her er det rent, ikke-radioaktivt salt, der flyder. I et atomkraftværk ville dette kredsløb bruges til at levere varme til for eksempel vand, og derved drive en turbine til at generere strøm.

De sidste elementer i figur 1 er sik-

kerhedselementerne, som er unikke for en saltsmeltereaktor. I kølekredsløbet sidder en frysefælde, der stopper kølekredsløbet, hvis der sker fejl på reaktoren. Derved bliver alt radioaktivt materiale isoleret inde i afskærmningen, og samtidig stoppes kernereaktionen ved, at alt det flydende brændsel drænes ned i sikkerhedstanke. Denne sikkerhedsmekanisme gør, at der ikke kan

undslippe radioaktivt materiale fra en saltsmeltereaktor. Samtidig opereres der under atmosfærisk tryk.

MSR-eksperimentet løb i 19.136 timer, og bagefter blev materialerne undersøgt. Figur 3 viser forskellen på legeringerne i henholdsvis brændselskredsløbet og kølekredsløbet. Altså forskellen på korrosionen i materialerne i atomkraftværket alt efter om de har været



Figur 4. FLiBe fra MSR-eksperimentet ved Oak Ridge National Laboratory i fast og flydende form (a). FLiBe-brændsel efter afslutningen af MSR-eksperimentet (b). FLiNaK syntetiseret i vores laboratorium i en molybdænform, hvorfra misfarvningen på overfladen kommer (c-e).

	AISI 316L	Hast. N	Hast. C-22	Ni-201
Ni	10,5	71	68,77	98,93
Fe	66,8	4	2,7	0,07
Cr	16,68	7	21,4	–
C	0,018	0,06	0,004	0,01
N	0,041	–	–	–
Al+Ti	–	0,5	–	–
Si	0,37	1	0,02	0,05
P	0,03	–	0,002	–
S	0,001	–	0,002	0,002
V	–	0,5	0,15	–
Mn	1,7	0,8	0,2	0,07
Co	–	0,2	0,1	0,01
Cu	–	0,35	–	0,01
Mo	2,1	16	13,6	–
W	–	0,5	2,7	–

Tabel 1. Kemisk sammensætning af rustfrit stål, 316L Hastelloy N og Hastelloy C-22 og ren nikkel, Ni-201 angivet i vægtprocent.

udsat for radioaktivitet eller ej. Begge billeder er tværsnit, og det fremgår tydeligt, at overfladen bliver ødelagt af stråling og fissionsprodukter, mens billederne viser sammenlignelig afkromning langs korngrenserne medførende øget risiko for revnedannelse.

Brændslet i MSR-eksperimentet var primært en blanding af lithium-, beryllium- og uranfluorid (Li^+ , Be^{2+} , $\text{U}^{3+}/\text{U}^{4+}$ og F^-). Dette salt kaldes for FLiBe, hvilket er helt omvendt af, hvordan IUPAC-navngivningen af materialet er, men det er mundret. I figur 4a (side 21) kan FLiBe fra MSR-eksperimentet ses. Det var et mørkt fast stof, der blev til en klar væske, når det blev varmet op over cirka 500°C. I figur 4b (side 21) kan brændslet ses, efter at det har været brugt til MSR-eksperimentet. Vi kan i Danmark ikke arbejde med radioaktive brændsler, og da beryllium er giftigt, har vi valgt at studere materialer udsat for et andet fluorid-salt, nemlig det der i branchen hedder FLiNaK. Det er en eutektisk blanding af lithium-, natrium- og kaliumfluorid (Li^+ , Na^+ , K^+ og F^-), der smelter ved 462°C [4]. I dag har vi nogle helt andre metoder til rådighed, end da MSR-eksperimentet kørte, så vi har kigget nærmere på, hvordan Hastelloy C-22 dekomponerer i flydende FLiNaK salt ved 700°C. Ved at køre eksperimenterne ved den højere temperatur går de kemiske reaktioner hurtigere, så vi ikke behøver at vente i 800 dage for at se en effekt – vi har kun ventet i 40 dage.

Korrosion af Hastelloy i FLiNaK

Hastelloy N kan ikke nemt erhverves i Danmark, så derfor har vi undersøgt Hastelloy C-22 og rent nikkel, Ni-201. Sammensætningen af materialerne samt det rustfrie stål AISI 316L, som vores digler er lavet af, er angivet i tabel 1. MSR-eksperimentet kørte i en argon-atmosfære, derfor gjorde vi det samme. Vi har her arbejdet med rensat FLiNaK-salt, doneret af Copenhagen Atomics. Saltet indeholder tilførte urenheder opnået ved, at saltet tørres i en beholder af rustfrit stål. Forsøget udføres ved at nedsænke kuponer af de udvalgte metaller (Hastelloy C-22 og Ni-201) i digler lavet af rustfrit stål (AISI 316L). Diglerne fyldes med fast salt, og varmes derefter i en beskyttet atmosfære til 700°C i en muffelovn. I det eksperiment vi gennemgår her, blev kuponerne eksponeret i FLiNaK i 1000 timer, før de blev taget op, rensat og undersøgt med optisk mikroskopi og elektronmikroskopi. Kuponerens overflade

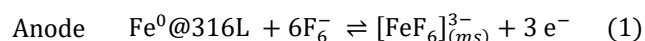
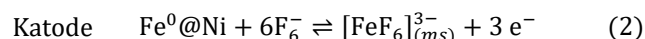
blev undersøgt, og de blev skåret over, således at deres tværsnit kunne studeres.

Figur 5 viser de ændringer, der sker i legeringerne, når de varmes op i smeltet salt. Ændringerne er umiddelbart ikke så drastiske som under MSR-eksperimentet. Vi ser en klar ændring af morfologien, men ikke de tydelige korngrenseangreb, der blev set i Hastelloy N. En umiddelbar forklaring er, at det salt vi har arbejdet med, til trods for den bevidste kontaminering med jern, er markant renere end det sorte salt, der blev brugt til MSR-eksperimentet. Det er velkendt, at korrosion øges af urenheder i systemet.

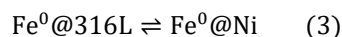
Ved at skære kuponerne over kan vi sammenligne direkte med resultaterne fra MSR-eksperimentet. Det er gjort i figur 6, og her ser vi også markant mindre korrosion i SEM-billederne, end de gjorde i figur 3. I dag kan vi lave Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), der lader os se grundstofsammensætningen i SEM-billeder. Således kan vi se ændringerne i sammensætningen af kuponerne, der ikke fremgår direkte i morfologien. De reaktioner, vi observerer, er, at krom trækkes ud af legeringen, og at jern ophobes i nikkellegeringerne. Fraværet af krom er det, som relateres til korngrenseangrebene i figur 3. I figur 6c ser vi skader og huller i kuponen i det område, hvor der ikke er mere krom tilbage. Dette er forventeligt og en kendt korrosionsproces. Jernet havde vi ikke regnet med at se akkumulere. Det kommer fra de rustfrie ståldigler, og er et fremragende eksempel på den kemi, der driver korrosion. Nemlig at hele systemet går mod et termodynamisk minimum.

Kemien i det smeltede salt

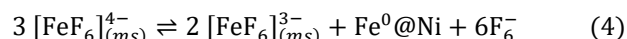
Det er almindeligt kendt, at der kan ske galvanisk korrosion, når to forskellige metaller er i kontakt. Mængden af ioner, der går i opløsning ved reaktion med vand, ilt og syre fra det uædle metal, for eksempel jern, accelereres af elektrisk kobling til kobber, hvor reduktionsreaktionen finder sted og derved tæres jern hurtigt væk. Galvanisk korrosion sker, når der er en elektrisk kontakt mellem de to metaller, og der kan gå en strøm. I det smeltede salt, hvis der er elektrisk kontakt mellem rustfrit stål og nikkellegeringerne, kan der ske følgende reaktioner ved anoden og katoden:



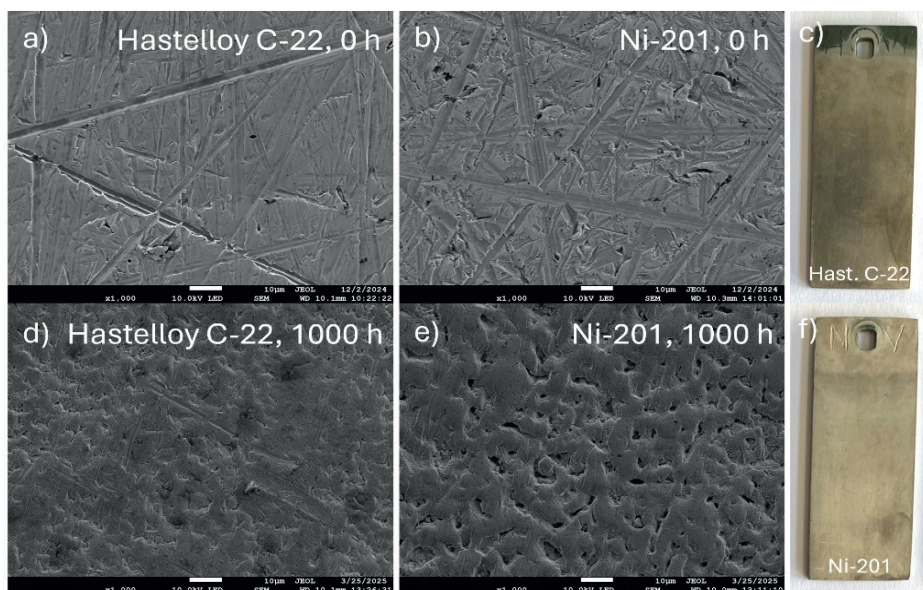
I alt vil der ske følgende totalreaktion i den galvaniske celle:



Denne reaktion er helt ækvivalent til de batterier, der regnes på i den almene kemi. I dette tilfælde er saltbroen erstattet med en fælles opløsning, saltsmelten, indeholdende en urenhed af jern(III) ioner. Det må forventes, at den ion, der findes i opløsningen, er hexafluoroferrat. Da jern er redoxaktivt, er den elektriske kontakt ikke nødvendig. For et hexafluoroferrat stabil i opløsning, kan tre af disse disproportionere på nikkel-overfladen og danne to hexafluoroferrat ioner og et jern(0)atom, der inkorporeres i nikkellegeringen. Der sker denne reaktion:



Slutresultatet af de to processer er det samme, men hastigheden, hvormed korrosionen sker, er vidt forskellig. Den galvaniske reaktion afhænger af diffusionen fra anode til katode. Den redoxdrevne reaktion afhænger primært af totalkoncentra-



Figur 5. Resultatet af eksponering af legeringer i smeltet FLiNaK-salt ved 700°C i 1000 timer. Scanning-elektronmikroskop (SEM) billeder af overfladen af Hastelloy C-22 kuponen før (a) og efter (d) eksponering. SEM-billeder af overfladen af Ni-201 kuponen før (b) og efter (e) eksponering. Fotografier af Hastelloy C-22 (c) og Ni-201 (f) kuponer efter eksponering.

tionen af hexafluorferrit i det smeltede salt. Den redoxdrevne reaktion kan også drives af andre redoxaktive urenheder i saltet. Det kan den galvaniske korrosion ikke.

Konklusion

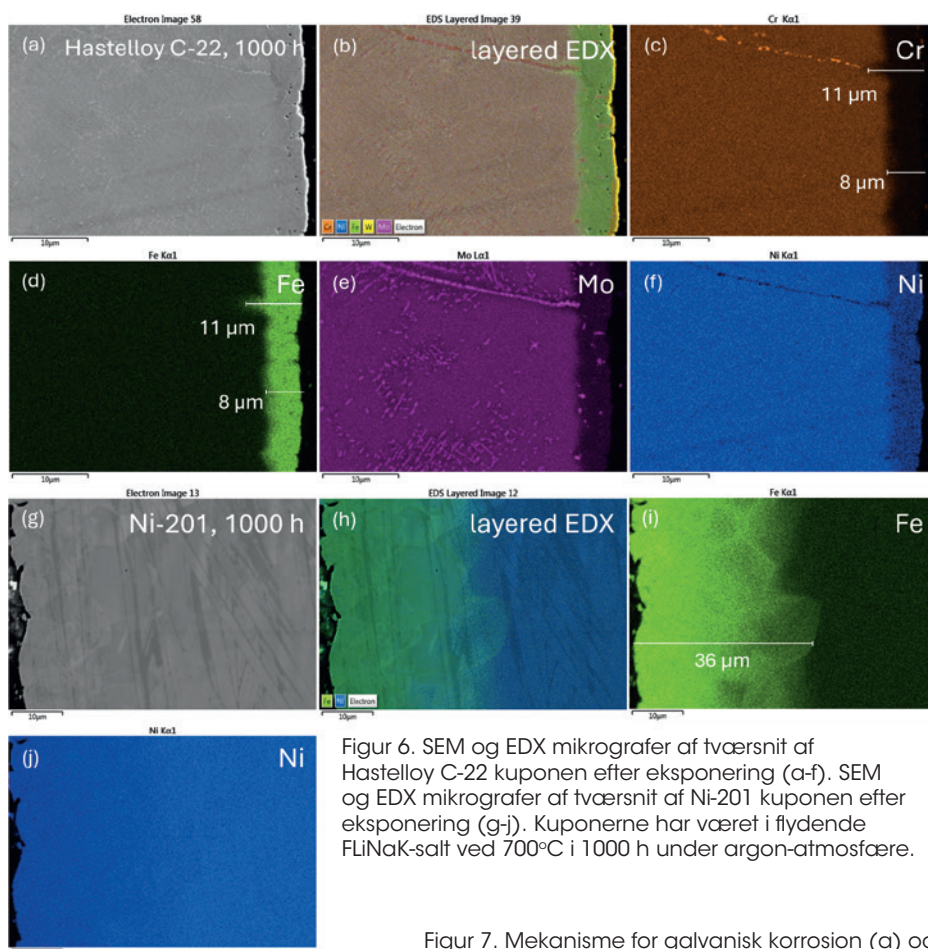
Vi har undersøgt korrosionen af Ni-201 og Hastelloy C-22 i smeltet FLiNaK ved 700°C under argon-atmosfære efter 1000 timers eksponering. Vi observerede tab af krom og tilgang af jern i korrosionsprodukter dannet på overfladen for Hastelloy C-22. Begge processer er kendte. Vi ser markant mindre korrosion i materialet, end de så på Oak Ridge National Laboratory i materialerne efter MSR-eksperimentet. Dette studie tyder på, at urenheder i saltet accelererer korrosionen, samt at massetransport vil have en effekt på korrosionsraten. At finde det bedste materiale til konstruktion kræver fortsat videre undersøgelse. Denne afsøgning kan gå i mange retninger. Et forslag til det næste skridt er at tilføje saltet bestemte urenheder, samt undersøge effekten af flow og hermed komme tættere på det virkelige scenarie i en saltsmeltereaktor.

E-mail:

Thomas Just Sørensen: tjs@chem.ku.dk

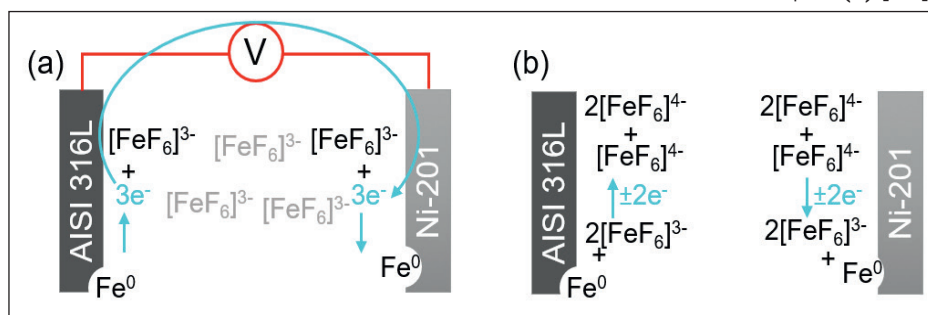
Referencer

1. Agency, N.E. *The NEA Small Modular Reactor Dashboard*; 2023.
2. Agency, N.E. *The NEA Small Modular Reactor Dashboard, 2nd edition*; 2024.
3. Report for the US Department of Energy, Office of Nuclear Energy Workshop. In *Molten Salt Chemistry Workshop*, Oak Ridge National Laboratory, 2017; Britt, D.F.W.P.F., Ed.
4. Rogers, D.J.; Yoko, T.; Janz, G.J. Fusion properties and heat capacities of the eutectic lithium fluoride-sodium fluoride-potassium fluoride melt. *Journal of Chemical & Engineering Data* **1982**, 27 (3), 366-367. DOI: 10.1021/jc00029a041.
5. Falconer, C.; Doniger, W.H.; Bailly-Salins, L.; Buxton, E.; Elbakhshwan, M.; Sridharan, K.; Couet, A. Non-galvanic mass transport in molten fluoride salt isothermal corrosion cells. *Corrosion Science* **2020**, 177, 108955. DOI: doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108955.
6. Falconer, C.; Elbakhshwan, M.; Doniger, W.; Weinstein, M.; Sridharan, K.; Couet, A. Activity gradient driven mass transport in molten fluoride salt medium. *npj Materials Degradation* **2022**, 6 (1), 29. DOI: 10.1038/s41529-022-00239-z.



Figur 6. SEM og EDX mikrografer af tværsnit af Hastelloy C-22 kuponen efter eksponering (a-f). SEM og EDX mikrografer af tværsnit af Ni-201 kuponen efter eksponering (g-j). Kuponerne har været i flydende FLiNaK-salt ved 700°C i 1000 h under argon-atmosfære.

Figur 7. Mekanisme for galvanisk korrosion (a) og redoxdrevet massetransport (b) [5,6].



Per- og polyfluorerede alkylstoffer (PFAS)

– et problem i hele Kongeriget Danmark

Seneste års monitoring viser, at miljøet og mennesker i Danmark, Færøerne og Grønland kan være kritisk belastet af de såkaldte PFAS-stoffer.

Af Christian Sonne¹,
Rossana Bossi², Katrin Vorkamp²,
Jens Søndergaard¹,
Kim Gustavson¹, Niels Kanstrup³,
Henrik Skov² og Rune Dietz¹

¹ Aarhus Universitet,
Institut for Ecoscience, Roskilde

² Aarhus Universitet,
Institut for Miljøvidenskab, Roskilde

³ Aarhus Universitet,
Institut for Ecoscience, Aarhus

I Danmark har brugen af PFAS – i særligt industrien, landbruget og brandøvelser – været årsag til markante belastninger af både det akvatiske og terrestriske miljø.

Selv langt fra kilder som for eksempel i Østgrønland har de seneste års monitoring vist, at dyr i toppen af fødekæden har kritisk høje koncentrationer af PFAS, herunder isbjørne, tandhvaler og sæler. De mennesker, som fanger og spiser ovennævnte dyr på Færøerne og i Grønland, er særligt eksponeret, og risikoen for effekter på immunsystemet kan være stor. Selvom flere PFAS-stoffer er blevet reguleret på globalt plan i de seneste år, er gruppen af PFAS så stor, at mange forskellige PFAS fortsat er i brug. Da mange af disse forbindelser er meget svært nedbrydelige i miljøet, vil forureningen med PFAS-forbindelserne være et problem i mange årtier fremover.

Langt de fleste problematiske kemikalier, som måles i mennesker og dyr i de arktiske og nordatlantiske områder, herunder Færøerne og Grønland, er kemikalier, som via luft og havstrømme er transporteret fra kilder i Nordamerika og Eurasien. Disse kemikalier er kendetegnet ved at være særdeles stabile i miljøet og ophobes i biologiske organismer [1].

I miljøsammenhæng betegnes disse svært nedbrydelige organiske kemikalier som "persistent organic pollutants"

(POP'er), som, udover deres stabilitet, transport over lange afstande og ophobning i fødekæder, også er identificeret som toksiske. POP-forureningen forsøges reguleret via FN's Stockholm Konvention, som er tiltrådt af de fleste lande med effekt fra år 2004. Eksempler på POP'er er blandt andet polyklorerede bifenyler (PCB) og visse per- og polyfluorerede alkylstoffer (PFAS).

Fluor-kulstof-bindingen i PFAS-molekylerne gør PFAS særligt resistente mod nedbrydning. Derfor kaldes disse forbindelser også "evighedskemikalier". PFAS-definitionen blev revideret af en arbejdsgruppe under OECD i 2021 og omfatter alle de molekyler, som indeholder en mættet CF₃- eller CF₂-gruppe [2]. I USEPA's database CompTox er der pt. cirka 14.000 PFAS-stoffer. PFAS bruges

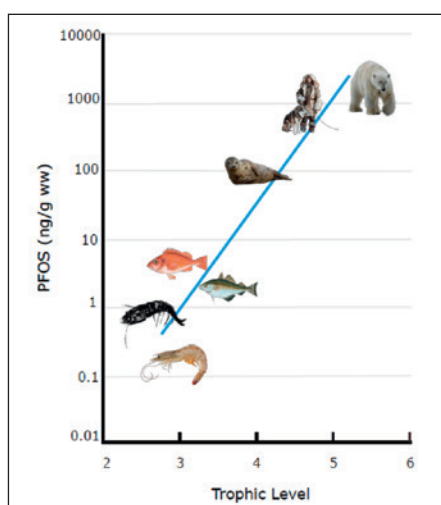
i næsten alle industrigrene og findes i mange almindelige forbrugerprodukter som for eksempel tekstiler, tæpper, sko, madindpakning, kosmetik, brandskum, pizzabakker og pesticider. I Danmark blev brugen af PFAS i fødevareemballage forbudt i 2020, og brugen af PFAS i tekstiler samt PFAS-pesticider er under udfasning, se Miljøstyrelsen¹.

Mens tre PFAS-stoffer har været på FN's Stockholm Konvention i flere år, er det netop blevet besluttet i år, at gruppen af langkædede perfluorcarboxylsyrer (PFCA'er) også skal reguleres under Stockholm Konventionen. Disse stoffer har altså til fælles, at de er meget stabile i miljøet, de kan transporteres over store afstande, de ophobes i fødekæder og har toksiske egenskaber (figur 1).

AMAP – overvågningen af Arktis

Siden 1994 har Miljøstyrelsen støttet et overvågningsprogram i Grønland med fokus på POP'er og tungmetaller i sæler, isbjørne og andre arktiske nøglearter. Dyrene er vigtige som miljøindikatorer, i forhold til toksiske effekter i disse organismer, samt belastningen af mennesker via konsum af disse arter. Prøverne, som indsamles i samarbejde med lokale fangere, opbevares i en miljøprøvebank på Aarhus Universitet og har tilvejebragt tidsserier af farlige kemikalier i dyr, der går tilbage til 1980'erne. Herved har man blandt andet kunnet vise, at nogle PFAS-stoffer har været stigende, indtil international regulering har trådt i kraft.

De nyregulerede PFCA'er har været stigende i en lang årrække, og fremtidig monitoring må vise, om den nye regulering også vil ændre denne trend. Prøvebanken gør det muligt at gennemføre analyser tilbage i tiden, når der opstår interesse for ikke tidligere undersøgte kemikalier eller at bruge



Figur 1. Ophobning af perfluoroktansulfonat (PFOS) i de grønlandske marine fødekæder (x-aksen viser det trofiske niveau). Det ses, at der kan være en koncentrationsfaktor (biomagnificering) fra bund til top af fødekæden på op til 1.000.000 (bemærk at y-aksen er logaritmisk) [12].

prøverne i screeningundersøgelser for nye potentielle kontaminanter.

Det arktiske miljøovervågningsprogram AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Program) er en arbejdsgruppe under Arktisk Råd og består af repræsentanter fra de otte arktiske lande, repræsentanter fra den oprindelige befolkning i Arktis og en række observatører fra andre lande og organisationer. Det videnskabelige arbejde med blandt andet cirkumpolar dataindsamling og -vurdering foregår i ekspertgrupper med forskellige fokusområder, heriblandt POP'er, tungmetaller, effekter og human sundhed.

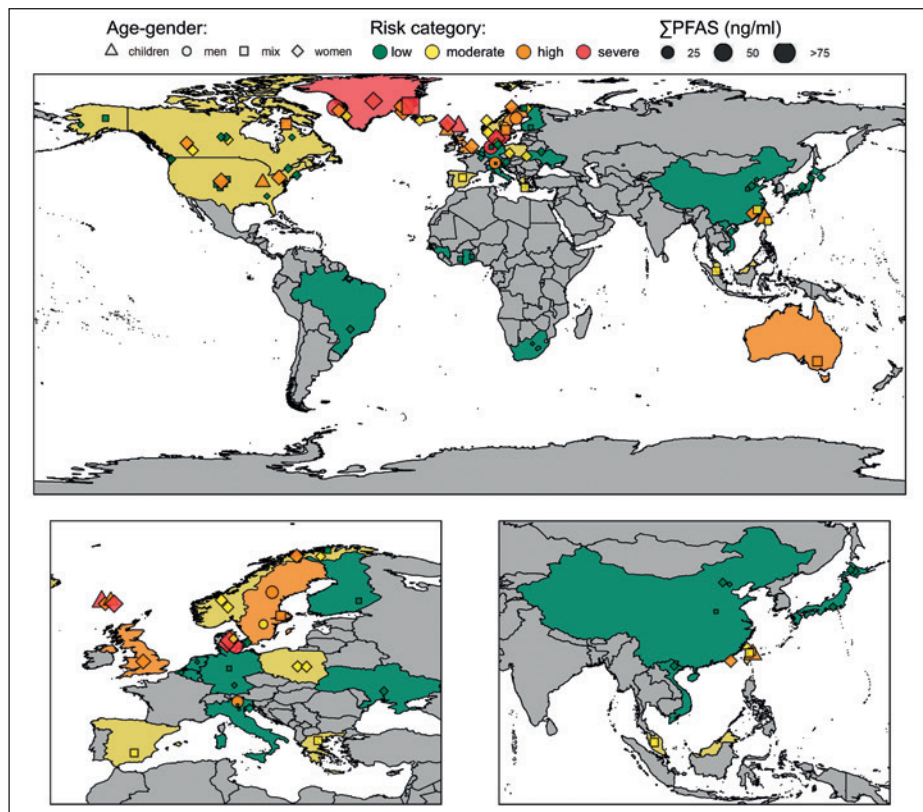
Belastning af fangersamfund i Østgrønland

Nogle af verdens højeste koncentrationer af PFAS i blodet er fundet hos mennesker i fangersamfundet i Østgrønland (Ittoqqortoormiit/Scoresbysund). Eksponeringen af fangersamfundet stammer primært fra fangst og konsum af ringsæler og isbjørne. Risikoanalyse indikerer, at mennesker i Ittoqqortoormiit har en meget høj belastning af PFAS, som overstiger den koncentration af PFAS, som det Europæiske Fødevaresikkerhedsautoritet (EFSA) har lagt til grund for deres anbefaling af den mængde PFAS, der anses for sikkert som ugentligt indtag (Tolerable Weekly Intake, TWI) [3].

En overskridelse af TWI er blevet associeret med mulige effekter på børns immunsystem [4,5]. Høje PFAS-værdier i blod øger risikoen for infektioner og nedsætter effekten af vaccinationsprogrammer mod blandt andet stivkrampe, difteri, influenza og covid-19 [3]. Herudover har forskning vist, at langvarig forhøjet eksponering for PFAS kan betyde nedsat fertilitet og øge forekomsten af for eksempel hjerte-kar-sygdomme og kræft [3]. I lyset af den store gruppe PFAS og de alvorlige helbredsrisici forbundet med de mere velundersøgte PFAS bør indsatsen styrkes til at forbedre vores viden om andre, mindre velundersøgte PFAS-stoffer.

Generelt er PFAS-niveauerne høje i blod hos befolkningen i Danmark, Færøerne og Grønland på global skala (figur 2). Hvor de høje niveauer på Grønland menes at stamme fra konsum af særligt isbjørne og sæler, samt måske havfugle, og på Færøerne primært fra konsum af grindehval, så vides der kun lidt om PFAS-belastningen af vilde dyr (fugle og klovbærende vildt) til konsum i Danmark.

Første undersøgelser på havfugle og hjortevildt er gennemført i 2025 og tyder på høj PFAS-belastning i dyr



Figur 2. Publicerede koncentrationer af PFAS i blodet hos mennesker, som menes at stamme fra fødeindtag. Det ses, at befolkningen i særligt Grønland, Færøerne og Danmark har de højeste niveauer, og dermed er i størst risiko for effekter på immunsystemet [3-5,8-11].

fra nogle områder i Danmark, muligvis i forbindelse med tidligere brug af PFAS-forbindelser [6,7]. I Korsør er der fundet særdeles høje værdier af PFAS hos medlemmerne af et lokalt kogræsserlag, der spiste forurenet kød fra deres kreaturer, der græssede og drak vand på et areal, der tidligere har været anvendt til brandøvelser². Imidlertid er Levnedsmiddelstyrelsen i gang med at kortlægge PFAS-niveauerne i dansk kvæg. Forskerne bag undersøgelsen af PFAS i mennesker viser, at niveauet i befolkningernes blod generelt er højere i Europa og Nordamerika sammenlignet med lande i Asien og Afrika. De højeste koncentrationer findes (i faldende rækkefølge) i Grønland, Færøerne, Danmark, Australien, Sverige, Norge, Malaysia, USA, Taiwan, Grækenland, Polen, Spanien og Island [3].

Globalt problem

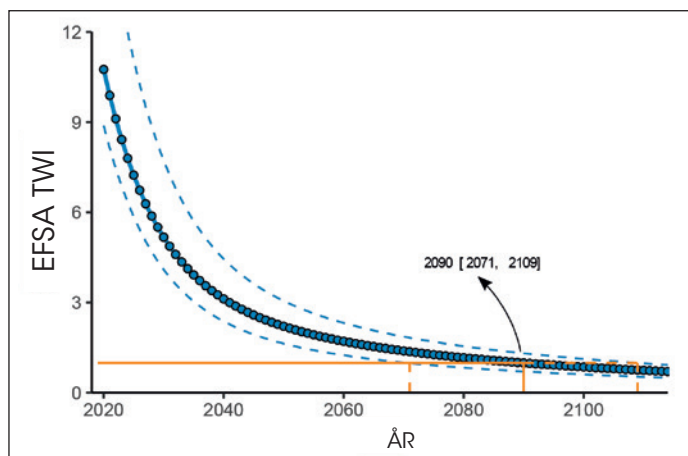
Hvis der ikke sker en reduktion i brug og udslip af PFAS, vil forurening af miljøet fortsat true befolkningssundheden overalt i verden. Den 7. februar 2023 offentliggjorde Det Europæiske Kemikalieagentur et forslag, der skal begrænse fremstilling, brug og markedsføring af mere end 10.000 PFAS-stoffer i EU. Formålet med forslaget er at begrænse spredningen af PFAS-stoffer til miljøet

og reducere miljøbelastningen. EFSA's TWI ligger på 4,4 mg/kg kropsvægt for summen af fire PFAS-stoffer.

Ud fra de koncentrationer, der er målt i isbjørne i Østgrønland, vil et ugentlig indtag via konsum af blot 10-20 gram isbjørnekød føre til overskridelse af EFSA's TWI [3]. På trods af, at niveauerne af de fleste PFAS-stoffer i muskel- og levervæv fra fangstdyrene er faldende, viser fremskrivninger, at befolkningen i for eksempel Ittoqqortoormiit/Scoresbysund i Østgrønland ikke vil komme under EFSA's ugentlige anbefaling på 4,4 ng/kg kropsvægt før cirka år 2100 (figur 3, side 26). Konsekvenserne heraf er alvorlige for fangersamfundene.

Overvågningen i Danmark – andet fokus

Overvågningen af PFAS i det danske miljø er blandt andet blevet gennemført i Novana-regi med fokus på PFAS i fiskelever. Dermed har man brugt fisk som miljøindikator, ikke som fødevarer, hvor fiskelever eksponeres, hvor fiskelever spises i større omfang. Andre overvågningsaktiviteter handler for eksempel om PFAS i spildevand og i grundvand. To forskningsprojekter har tidligere belyst geografiske og tidsmæssige mønstre af PFAS-forurening i danske havpattedyr [13,14]. Herudover blev der i 2024-2025 gennemført to



Figur 3. Hvor mange gange over EFSA's grænseværdi, fangerbefolkningen i litoqortoormiit/Scoresbysund i Østgrønland er i dag og prognose frem mod år 2100. Det ses, at først omkring år 2100 vil befolkningen være under EFSA's tolerable ugentlige indtag på 4,4 ng/kg kropsvægt [12].

undersøgelser af PFAS i jagtbare, danske fugle og klovbærende vildt. Disse studier har vist, at man ikke bør spise svømmeænder nedlagt ved Harboøre og Agger Tange langs den jyske vestkyst, idet disse har forhøjede koncentrationer af PFAS og man derfor vil overskride EFSA's TWI ved minimalt indtag [6,7].

Modsat dette, så viser en ny undersøgelse fra Aarhus Universitet, at det ikke umiddelbart udgør en sundhedsrisiko i forhold til PFAS og EFSA's TWI at spise dansk hjortevildt, selv ved Agger Tange, hvor de højeste værdier blev målt. For de mest belastede dyr anbefales dog et maksimalt indtag på under 100 gram for en person på 80 kilo, hvilket blandt andet angår rådyr indsamlet ved Agger Tange [7]. Undersøgelsen kaster lys på sundhedsrisikoen, men ikke hvad angår kilderne til PFAS-belastningen af vildt, men påpeger dog, at de tre lokaliteter, der viste de højeste belastninger, ligger tæt på Vesterhavet, hvormed fokus igen rettes mod, om PFAS-forureningen stammer fra havvand og havskum, der blæses ind over vestkysten. Kystnære lokaliteter i de indre danske farvande viste ikke tilsvarende eksponering.

Fremtiden

Som det fremgår ovenfor, er der et stor behov for at forbedre vidensgrundlaget om PFAS-belastning af miljøet og dyrelivet i Danmark og overalt i verden. Blandt andet mangler der viden om andre PFAS-stoffer end de mest gængse, der er blevet målt i overvågningsprogrammerne. En ny undersøgelse i forbindelse med den danske Videnstaskforce for PFAS har kombineret PFAS-analyser af enkeltstoffer med sumpparametre og skitseret nogle muligheder for fremtidige overvågningsstrategier, der kombinerer sumpparametre, enkeltanalyser og screeningmetoder [15].

I forbindelse med det danske PFAS-forsknings- og leverancecenter er der igangsat flere undersøgelser inden for miljø, fødevarer og human sundhed. På Aarhus Universitet vil der blive arbejdet mere med overvågningsstrategier, inklusive videreudvikling af avancerede screeningmetoder til PFAS. Forskere fra Aarhus Universitet er også involveret i flere studier af belastningen af miljøet og dyrelivet i Danmark. Sammenhængen mellem miljø, fødevarer og human sundhed kan styrkes, blandt andet ved bryg af "One Health"-modeller, dvs. monitorering af både natur og mennesker og deres interaktioner, hvad angår PFAS-forurening [16,17].

En vigtig del af dette er at fastlægge belastningen fra konsum af vildt, der jages i Danmark. Der er dog også andre

undersøgelser på vej fra den danske natur, nemlig på harer og oddere, ligesom der i europæisk sammenhæng gennemføres PFAS-undersøgelser på andre vildgrupper. Det samme gør sig gældende for drikkevand og konsumvarer. På den måde kan befolkningen vejledes, så man på personligt niveau kan regulere sin egen PFAS-eksponering. Herudover viser dette med tydelighed, at der er brug for en effektiv regulering af PFAS, der tager højde for stofgruppens kompleksitet. Ud over PFAS-bioakkumuleringen, der er et af kriterierne under Stockholm Konventionen, udgør mobiliteten i jord og grundvand af specielt kortkædede PFAS-stoffer et yderligere miljøproblem. I lyset af det store antal forskellige PFAS-stoffer og deres brede anvendelse i industrien og forbrugerprodukter er det en af de største miljødofordringer af vores tid at finde egnede og uproblematisk erstattingsstoffer. Dette er et langt sejt træk, men heldigvis er der allerede sat gang i mange tiltag på både europæisk og internationalt niveau³.

E-mail: Christian Sonne: cs@ecos.au.dk

Referencer

1. Rigét F, Bignert A, Braune B, et al. Temporal trends of persistent organic pollutants in Arctic marine and freshwater biota. *Sci Total Environ* 2019; **649**: 99-110.
2. OECD. Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance, OECD Series on Risk Management of Chemicals, 2021. https://www.oecd.org/en/publications/reconciling-terminology-of-the-universe-of-per-and-polyfluoroalkyl-substances_e458e796-en.html.
3. Sonne C, Desforges JP, Gustavson K, et al. Assessment of exposure to perfluorinated industrial substances and risk of immune suppression in Greenland and its global context: a mixed-methods study. *Lancet Planet Health* 2023; **7**(7): e570-e9.
4. Authority EFS. Outcome of a public consultation on the draft risk assessment of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Supporting Publications* 2020; **17**(9): 1931E.
5. Schrenk D, Bignami M, Bodin L, et al. Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA J* 2020; **18**(9): e06223.
6. Rune Dietz NK, Anders Galatius, David Boertmann, Rossana Bossi and Christian Sonne. PFAS i jagtbare fugle i Danmark 2023-2024. Aarhus University, 2025. https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2025/N2025_21.pdf.
7. Niels Kanstrup RD, Anders Galatius, Rossana Bossi og Christian Sonne. PFAS i jagtbart hjortevildt i Danmark 2024-2025. Aarhus University, 2025. https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2025/N2025_50.pdf.
8. Chain EPanel oCitF, Knutsen HK, Alexander J, et al. Risk to human health related to the presence of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid in food. *EFSA J* 2018; **16**(12): e05194-e.
9. Chain EPanel oCitF, Schrenk D, Bignami M, et al. Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA J* 2020; **18**(9): e06223-e.
10. Corsini E, Iulini M, Galbiati V, et al. EFSA Project on the use of NAMs to explore the immunotoxicity of PFAS. *EFSA Supporting Publications* 2024; **21**(8): 8926E.
11. Long M, Sonne C, Dietz R, et al. Diet, lifestyle, and contaminants in three east Greenland Inuit municipalities. *Chemosphere* 2023; **344**: 140368.
12. Sonne C, Gustavson K, Bossi R, et al. Ubiquitous global use of persistent PFAS threatens Arctic Indigenous peoples for decades to come. *Cell Reports Sustainability* 2025; **2**(3): 100341.
13. Dietz R, Rigét FF, Galatius A, Sonne C, Teilmann J, Bossi R. Spatial trends of perfluorochemicals in harbor seals (*Phoca vitulina*) from Danish waters. *Sci Total Environ* 2012; **414**: 732-7.
14. Galatius A, Dietz R, Rigét FF, et al. Temporal and life history related trends of perfluorochemicals in harbor porpoises from the Danish North Sea. *Mar Pollut Bull* 2011; **62**(7): 1476-83.
15. Katrin Vorkamp PG, Xenia Trier, Rossana Bossi. Further development of analytical methods for the monitoring of PFAS in environmental, food and human samples. Danish EPA, 2025. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2025/03/978-87-7038-722-4.pdf>.
16. Sonne C, Letcher RJ, Jenssen BM, et al. A veterinary perspective on One Health in the Arctic. *Acta Vet Scand* 2017; **59**(1): 84.
17. Sonne C, Jenssen BM, Ciesielski TM, Vorkamp K, Dietz R. Time to reboot circumpolar One Health collaboration. *Lancet* 2024; **404**(10460): 1304.



Foto: Freepik.com.

Sodpartikler i København

Luftforurening i byens gader påvirkes af få køretøjer med høje emissioner.

Af Thomas Bjerring Kristensen og Nanna Freja Christiansen, Force Technology

Force Technology kan, via luftkvalitetsmålinger udført for Københavns Kommune, vise, at ganske få køretøjer bidrager betydeligt til luftens indhold af sodpartikler i gademiljøet – også efter at udvidede miljøzoner blev indført i hele kommunen i efteråret 2024.

Luftkvalitet og helbredseffekter

Luftkvaliteten i Europa og København er blevet forbedret markant over de seneste årtier [1]. Denne positive tendens kan også ses i København over de seneste år, blandt andet som et resultat af at

emissioner fra vejgående trafik er mindsket [2]. Da der forekommer uønskede helbredseffekter selv ved relativt lave eksponeringsniveauer for flere typer af komponenter [3], ønskes luftkvaliteten fortsat forbedret.

Studiet præsenteret i denne artikel søger at forstå, hvilke kilder til luftforurening det giver bedst mening at forsøge at begrænse med henblik på at forbedre luftkvaliteten yderligere. Studiet fokuserer på gadeplansmålinger af sodpartikler i København.

Påvirkning fra sodpartikler

Sodpartikler skabes ved ufuldstændig forbrænding af visse organiske brændsler såsom for eksempel diesel eller træ.

Indånding af sodpartikler kan medføre en bred vifte af helbredsproblemer. I til-læg kan visse sodpartikler medvirke til en opvarmning af klimaet, og sodpartikler medvirker også til sværtning af for eksempel bygningsfacader. Der er derfor gode grunde til at begrænse kilderne til sodpartikler. Københavns Kommune samt flere andre kommuner har derfor ført en målrettet indsats for at mindske udledninger af sodpartikler fra vejgående trafik samt brændeovne gennem de seneste år.

Måleprogram for luftkvalitet

Force Technology har siden efteråret 2020 udført luftkvalitetsmålinger for Københavns Kommune på flere lokati-

oner. Black carbon (BC), som er et mål for indholdet af sodpartikler i luften, er blevet målt på Folehaven nær nr. 72 og på Backersvej nær Formosavej. Disse to målelokationer repræsenterer henholdsvis (i) et meget trafikeret miljø, og (ii) et villakvarter med en relativt lav trafikintensitet, men med et betydeligt antal registrerede brændeovne [2]. De gennemsnitlige målinger af black carbon og andre luftforureningskomponenter, inklusive årlige afrapporteringer, er tilgængelige på Københavns Kommunes hjemmeside.

Måleresultater for black carbon

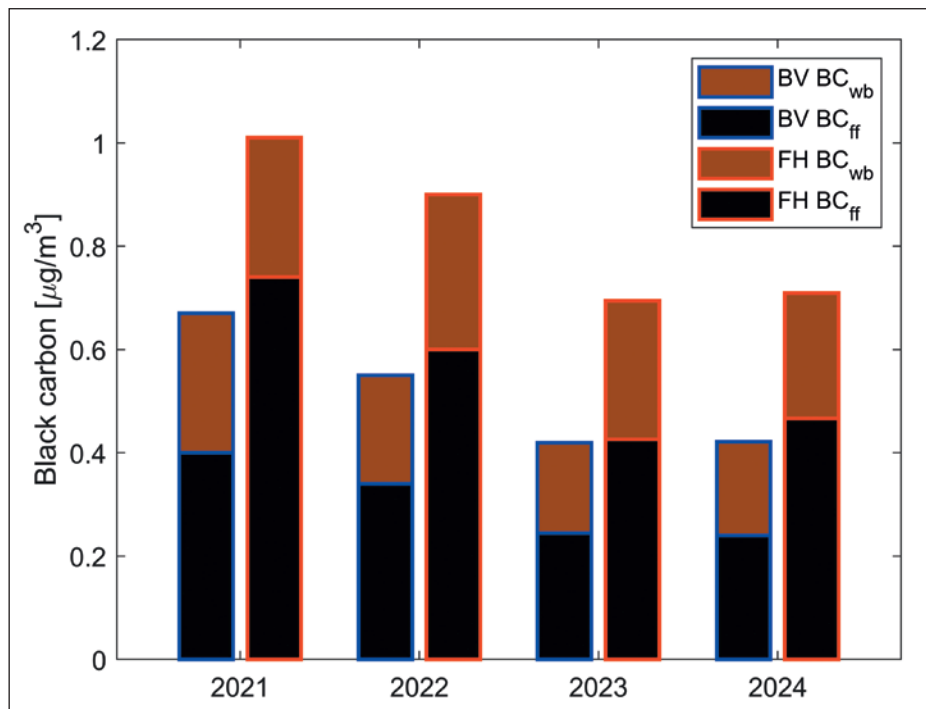
I figur 1 vises årsmiddel for black carbon relateret hhv. til trafikemissioner (BC_{ff}) og afbrænding af biomasse (BC_{wb}) for Backersvej og Folehaven i perioden 2021-2024. Der ses for perioden 2021-2023 en aftagende koncentration af total BC samt BC_{ff} på både Backersvej og Folehaven, mens niveauerne for BC og BC_{ff} var næsten identiske i 2023 og 2024. Der blev indført miljøzoner i hele Københavns og Frederiksbergs kommuner fra den 1. oktober 2024. Så man kunne have forventet, at det ville medføre en yderligere reduktion for BC_{ff} i 2024, hvilket altså ikke var tilfældet.

Der findes forskellige mulige årsager, der helt eller delvist ville kunne forklare observationerne. Det er for eksempel velkendt, at meteorologien lokalt og i større skala kan påvirke de målte niveauer af BC. Så det kan tænkes, at meteorologiske forhold har medvirket til ensartet BC årsmiddel i 2023 og 2024, selv hvis de lokale kilder kan have været mindsket i styrke i 2024.

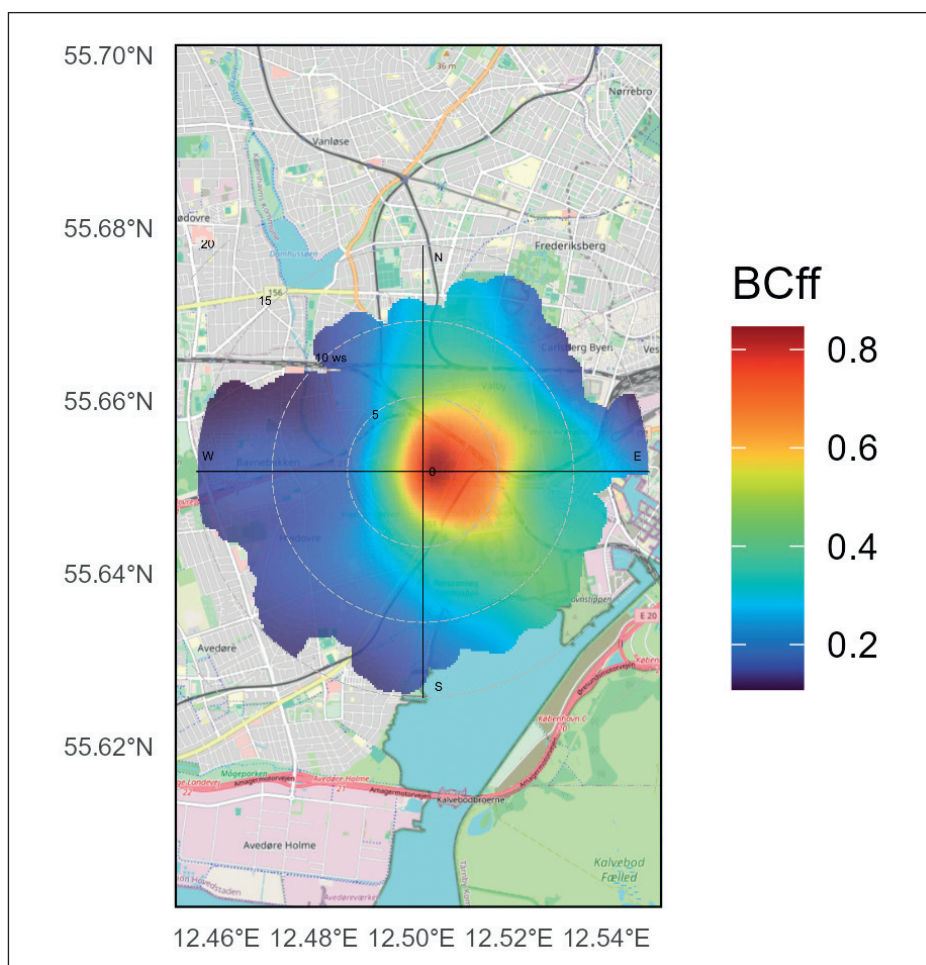
Det er en mulighed, at der kan have været ændringer i trafikintensitet eller trafikmønstre fra 2023 til 2024, hvilket ikke undersøges nærmere her. Alternativt kan det tænkes, at de fleste køretøjer, der tidligere ikke efterlevede kravene til miljøzoner, blev udfaset eller tilpasset allerede forud for 2023, hvorfor ensartede niveauer blev observeret for 2023 og 2024.

Meteorologi og koncentrationer af black carbon

Koncentrationerne af BC er ikke kun påvirket af indflydelsen fra trafikens sammensætning og intensitet, men også af meteorologien. I figur 2 vises med en farveskala sammenhængen mellem målt BC_{ff} og vindretning/vindhastighed i 2024 på Folehaven. De anvendte meteorologiske data er fra DMI. De mørkerøde nuancer i figuren indikerer de højeste BC_{ff} koncentrationer, og de



Figur 1. Årlige gennemsnitskoncentrationer af black carbon inddelt i fraktionerne "wood burning" (wb) og "fossil fuel" (ff) for hhv. Backersvej (BV) og Folehaven (FH).



Figur 2. Gennemsnitlige timemiddel-koncentrationer af BC_{ff} i $\mu\text{g}/\text{m}^3$ målt på Folehaven i 2024 som funktion af vindretning og vindhastighed. De farvede områder nær origo i det indlagte koordinatsystem repræsenterer vindhastigheder nær 0 m/s, mens længere afstand fra origo repræsenterer højere vindhastigheder. De hvide stiplede cirkler indikerer vindhastigheder på 5 m/s og 10 m/s.

forekom typisk ved lave vindhastigheder og vindretninger fra nord, nordøst og øst. De laveste niveauer af BC_{ff} blev på Folehaven i 2024 typisk observeret for relativt høje vindhastigheder fra vestlige retninger.

Figuren illustrerer dermed vindens påvirkning af de målte niveauer af BC_{ff} på Folehaven. Det kan desuden forventes, at meteorologiske parametre såsom nedbør, grænselagshøjde og langtransport vil påvirke de målte niveauer af BC. Derfor er det en meget kompleks udfordring at kvantificere meteorologiens indflydelse på de målte niveauer af BC fra år til år. Dermed er det oplagt at undersøge andre aspekter med betydning for BC-koncentrationen, som er nemmere at kvantificere, hvoraf et eksempel beskrives nedenfor.

Kvantificering af gadeplansbidrag til black carbon

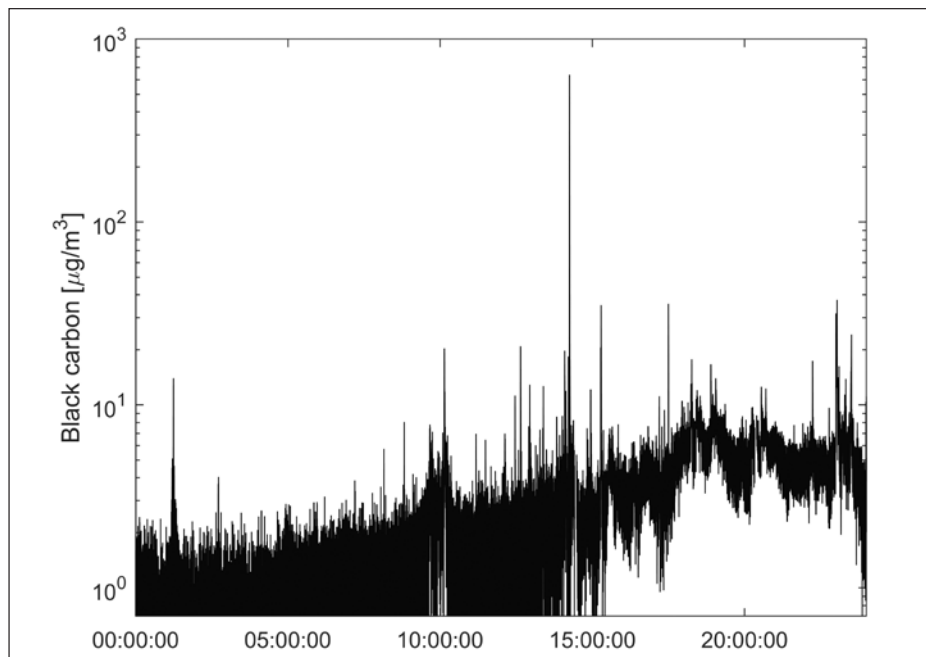
I dette studie har vi undersøgt, om kortvarige, høje koncentrationer af BC kan relateres til emissioner fra enkelte køretøjer. Dette er gjort ved at studere måledata med en højere tidsopløsning, end man normalt anvender til luftkvalitetsmålinger. I figur 3 vises et eksempel på BC-målinger fra Folehaven i en tidsopløsning på 1 sekund fra den 21. november 2024. Almindeligvis skal BC-data midles over længere tid end 1 sekund for at mindske støj og usikkerhed, hvilket er særligt udtalt, når

■ Målinger af black carbon

Black carbon måles optisk med et aethalometer (AE33, MAGEE). Der ledes en luftstrøm gennem et internt filter, der opsamler aerosolpartikler. Aethalometeret måler lysabsorptionen for de opsamlede partikler ved syv forskellige bølgelængder fra 370 til 950 nm.

Absorptionen ved 880 nm anvendes til at bestemme koncentrationen af BC. Forholdet mellem absorptionen ved supplerende bølgelængder giver information om, hvor sort eller brunligt sodpartiklerne fremstår.

Farven af sodpartiklerne er koblet til de mest sandsynlige kilder i form af hhv. forbrændingsmotorer (ofte mere sorte sodpartikler) eller brændeovne (ofte mere brunlige sodpartikler). Målt BC kan dermed groft opdeles i to fraktioner: BC_{ff} og BC_{wb} , hvor indeksene er forkortelser for hhv. "fossil fuel" og "wood burning" [4].



Figur 3. Koncentration af black carbon i 1 sekunds tidsopløsning målt på Folehaven den 21. november 2024. Y-aksen er på logaritmisk skala for at synliggøre det store spænd i målte koncentrationer det pågældende døgn.

BC-koncentrationen er lav. Der kan dog under de rette forholdsregler forefindes væsentlig information i dataserier med høj tidsopløsning. De kortvarige spidsværdier, som der forekommer 20-30 af i figur 3, har ofte en varighed på 15-30 sekunder. Disse spidsværdier er karakteristiske for passage af et enkelt køretøj, som udleder sodpartikler.

Dette helt lokale gadeplansbidrag til BC fra køretøjer kan kvantificeres ved at beregne differencen mellem målt BC og den løbende median af BC for et givent tidsinterval. For eksempel forøgedes timemiddelværdien for BC med cirka $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fra kl. 14 til 15 denne dag, hvilket primært kan tilskrives passage af et enkelt køretøj, der udledte store mængder BC. Trafiktællinger viser, at målestationen på Folehaven i myldretidstrafikken passerer af flere end 3000 køretøjer i timen, så få køretøjer kan påvirke niveauet af BC betydeligt.

Det skal nævnes, at maksimumsværdien nær $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der kan observeres i figur 3, var usædvanligt høj, men billedet af at få køretøjer kortvarigt kan forøge BC markant, er konsistent over flere års målinger.

Gadeplansbidrag til black carbon på Folehaven

Analyse af BC-data fra længere perioder på Folehaven understøtter, at en meget lille andel af køretøjerne bidrager betydeligt til den målte BC-koncentration. Timemiddelværdierne for BC forøgedes i gennemsnit med cirka $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i dagtimerne på grund af de få

udledende køretøjer på Folehaven i 2023 og 2024 – såvel før som efter indførsel af udvidede miljøzoner.

Visse grupper af køretøjer, som for eksempel veteranbiler, knallerter m.fl., er undtaget fra emissionskrav i miljøzoner. Det er i dette studie ikke muligt at afgøre, i hvilket omfang de få BC-udledende køretøjer er lovligt undtaget reglerne for miljøzoner, eller om der i et vist omfang kan være tale om køretøjer, der ikke efterlever lovgivningen.

Slutteligt er det værd at bemærke, at enkelte borgere, der færdes i trafikken i længere tid bag/nær et af de få kraftigt sodudledende køretøjer, potentielt kan blive eksponeret for en meget høj dosis af black carbon over kort tid.

E-mail:

Thomas Bjerring Kristensen:

tbkr@forcetechnology.com

Nanna Freja Christiansen:

nfc@forcetechnology.com

Referencer

1. Sicard et al., Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective, *Sci. Total Environ.*, 858, 2023.
2. Kristensen et al., Overvågning af luftkvalitet i Københavns Kommune, Årlig afrapportering for 2024, Force Technology, rapport 120-20142-E, 2025.
3. WHO: WHO global air quality guidelines, 2021.
4. Sandradewi et al., Using Aerosol Light Absorption Measurements for the Quantitative Determination of Wood Burning and Traffic Emission Contributions to Particulate Matter, *Environ. Sci. Technol.* 42, 3316-3323, 2008.

Forskningsprojekt:

Cement med markant lavere CO₂-aftryk ved hjælp af strøm

Hvis Danmark og resten af verden skal nå klimamålene, skal cementproduktionen blive grønnere. Et internationalt forskningssamarbejde, ECem, skal nu vise vejen – gennem elektrificering og avancerede måleteknikker.

Af Søren Bastholm Vendelbo,
Teknologisk Institut

Cement er rygraden i byggeriet, men dets klimaaftryk er enormt: Over 4 procent af Danmarks CO₂-udledning og hele 7-8 procent globalt stammer fra cement.

Problemet er især den såkaldte kalci-neringsproces, hvor kalksten opvarmes og omdannes til cement. Indtil nu har fossile brændsler været nødvendige, men det vil Teknologisk Institut og fem internationale partnere gøre op med.

Elektrisk opvarmning skal skære dybt i emissionerne

Et nyt projekt, støttet af Innovationsfonden med næsten 21 millioner kroner, vil udvikle avancerede, elektriske opvarmningsteknologier til cementfabrikkerne.

Når vi elektrificerer opvarmningen, får vi helt nye muligheder for at optimere processen og skære CO₂-udledningen markant. Her bliver både infrarød og induktiv opvarmning testet af som nye metoder. Hvis det lykkes, kan teknologien kobles sammen med CO₂-fangst, så produktionen i fremtiden bliver næsten fossilfri.

■ Fakta om ECem-projektet

- *Titel:* ECem - Electric Calciner Technologies for Cement Plants of the Future.
- *Varighed:* 3,5 år (2024-2028).
- *Partnere:* Teknologisk Institut, FLSmidth Cement, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Aalborg Universitet, Cementos Argos og European Energy.



Skarpt fokus på kvalitet

En vigtig del af projektet er at sikre, at den elektrisk fremstillede cement fortsat lever op til kravene fra byggebranchen. Derfor vil Teknologisk Institut bruge avancerede måleteknikker fra Big Science-verdenen til at kvalitetssikre slutproduktet. Der undersøges også, om reaktionstemperaturen kan sænkes eller varmeoverførslen i processen kan forbedres, hvilket kan give endnu større CO₂-besparelser og cement af højere kvalitet.

Et stærkt og internationalt samarbejde

Bag ECem står både danske og internationale spillere: FLSmidth Cement, Helmholtz-Zentrum Dresden-Ros-

sendorf, Aalborg Universitet, Cementos Argos og European Energy. Programleder hos FLSmidth Cement, Kiranmai Sanagavarapu, slår visionen fast:

- Vi vil udvikle teknologier, der kan blive en hjørnesten for fremtidens cementfabrikker verden over.

Projektet løber over 3,5 år med officiel start 1. september 2024. Med en samlet projektpulje på 28 millioner kroner sætter Danmark kursen mod mere bæredygtigt byggeri – og en stærkere international position i kampen mod klimaforandringer.

E-mail:
Søren Bastholm Vendelbo:
sbv@teknologisk.dk



KEMISK FORENING

Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

www.chemsoc.dk

The Danish Chemical Society
Founded 1879

Generalforsamling og lancering af ny hjemmeside

Vi indkalder hermed til ordinær
generalforsamling

Torsdag den 4. december
kl. 17.00 på HCØ, København.

Mødet indledes med en forelæsning ved
prof. Sonia Coriani, DTU Kemi, efterfulgt
af selve generalforsamlingen. Dagsorde-
nen udsendes rettidigt per e-mail til alle
medlemmer.

Bemærk også, at selskabet nu helt er over-
gået til vores nye hjemmeside: kemiskforening.com. Her kan I følge alle opdateringer
og nyheder.

På gensyn!

Ny hjemmeside – kig forbi kemiskforening.com

Vi har lanceret vores nye hjemmeside. På grund af vedvarende tekniske ud-
fordringer med chemsoc.dk lukker vi den side og samler alt på vores eneste
officielle platform: kemiskforening.com.

Hvad får du på den nye side?

- Aktuelle nyheder og events – lige til at tilmelde.
- Referater og foreningsdokumentation samlet ét sted.
- Adgang til medlemsinformation og hurtig tilmelding.

Gør det nu: besøg kemiskforening.com, bogmærk siden, og tilmeld dig
vores nyhedsopdateringer.

Vigtigt: Dine medlemskaber og aktiviteter fortsætter uændret
– du finder blot al information samlet på den nye hjemmeside.

På vegne af Kemisk Forening – Kira G. Astakhova

Naturvidenskabens ildsjæle

Naturvidenskabens ildsjæle
- Selskabet for Naturlærens
Udbredelse gennem 200 år
Redigeret af Cecilie M.K. Pedersen
& Charlotte Koldbye
1. udgave 2024
Antal sider: 304
Udgiver: Gads Forlag
Udgivelsesdato: 2024

Anmeldt af Kristian B. Krogh

En bog drevet og skrevet af ildsjæle!

Denne bog er en 200-års fejring af
Selskabet for Naturlærens udbredelse.
Hans Christian Ørsted opdagede i 1820
elektromagnetismen, og efterfølgende
besøgte han Europas hovedstæder for at
diskutere sin forskning.

Under et besøg i London i 1823 erfare-
de han, hvordan englænderne var i fuld
gang med fremsynede initiativer med at
udbrede kendskabet til naturvidenskab
og ”udbredelse af brugbar viden”.

Året efter stiftede han i Danmark såle-
des Selskabet for Naturlærens udbre-
delse (SNU). Et selskab, som har haft
en enorm betydning for udbredelsen af
naturvidenskaberne i dag.

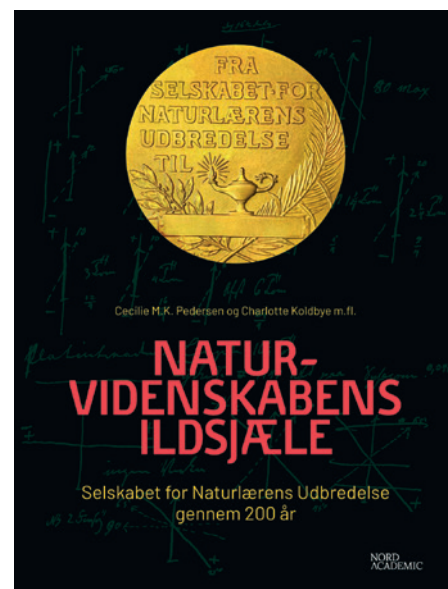
Bogen er opdelt i tidsperioder, og gen-

nem hver periode beskrives personer fra
pågældende periode engageret af bogens
18 forskellige forfattere. Forfatternes
frivillige passionerede arbejde ligger
meget i tråd med bogens beskrivelse af
persongalleriet fra SNU gennem tiden.

Bogen giver et godt indblik i histo-
riens gang i Danmark og den naturvi-
denskabelige udvikling. Der gives for
eksempel et godt indblik i passionen og
virkelysten for fysikeren Kirstine Me-
yer, som i 1909 blev den første kvinde
til at forsvare en naturvidenskabelig
doktordisputats. Bogen beskriver sam-
tidigt, hvordan hun var faster for Niels
Bjerrum, til hvem hun lånte kemibøger,
da han var skoleelev. Således forstår
man baggrunden for Kirstine Meyers
Mindelegat, som uddeles til ”unge lo-
vende danske Studerende til Fremme af
deres Uddannelse indenfor Naturlærens
Omraade”.

Samtidig kan man læse om stiftelsen
af Ungdommens Naturvidenskabelige
Forening (UNF) i 1944 og følge histo-
rien frem til de årlige Science Camps i
dag.

Denne bog kan varmt anbefales som
en dannelsesrejse inden for betydnings-
fulde personer og hændelser i dansk



naturvidenskab. Har man ikke tid til at
læse bogen, så kan man besøge hjem-
mesiden SNU.dk, hvor man kan finde en
oversigt over de månedlige spændende
foredrag; ”ved at komme til foredra-
gene bliver du ført ajour med det nyeste
og mest spændende, der sker i dansk
forskning”.

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

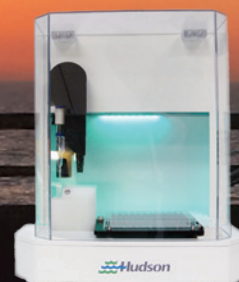
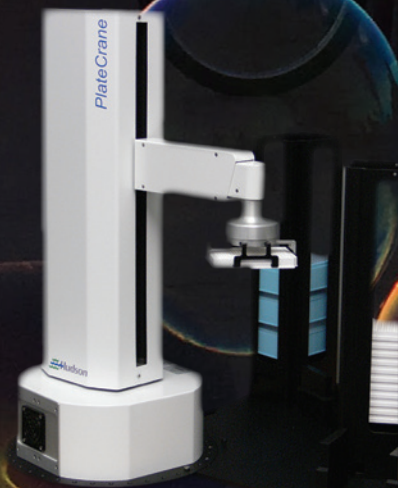
Automated Sample Concentration - Freezedrying

Gilson and Hudson Robotics Inc.

Advanced Automation solutions.

Rheosense - Viscosity on 15ul

Advanced Viscosity profiles



The only limitation is your imagination



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