

Indsamling af kiselalger på havisen. Foto: Ditte Hjort.



NÅR VANDLOPPEN GØR ALGEN GIFTIG

Om forfatteren
Carsten R. Kjaer
Aktuel Naturvidenskab
crk@aktuelnaturvidenskab.dk



DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er professor ved Aarhus Universitet, Lars Arge. Læs mere på www.dff.dk

Hvordan vekselvirker vandlopper og giftige kiselalger i det sårbare arktiske miljø? Det har danske forskere undersøgt, da denne vekselvirkning er baggrunden for, at gift kan akkumulere gennem fødekæden og gøre dyr og mennesker syge.

I 1987 blev over 100 mennesker syge og fire døde i Canada efter at have spist muslinger, som indeholdt nervegiften domoisyre. Dette giftstof produceres af visse arter af kiselalger, og når muslinger filtrerer vandet for plankton, kan giftstoffet koncentreres i muslingernes kød i

så store mængder, at det bliver dødeligt for mennesker og andre dyr højere oppe i fødekæden. Når man snakker om skaldyrsforgiftning, er det således oftest giftige alger, der i virkeligheden er synderen.

Selvom det kun er en lille andel af verdens tusinder af algearter, der er

giftige, udgør de et reelt problem, som de fire dødsfald tydeligt understreger. Giftige arter af kiselalger er vidt udbredt i hele verden og er kendt for at lave tætte opblomstringer. Specielt langs USA's vestkyst er der hvert år opblomstringer af giftige kiselalger, som jævnligt har kostet talrige søløver, havoddere



Kiselalgen *Pseudo-nitzschia* danner kæder af enkelte celler. Foto: Sara Harðardóttir

Kiselalger

Kiselalger (eller diatoméer, som de også kaldes) er encellede alger, der er fra 0,002 mm til 1 mm i diameter. Kiselalger findes i alle vandige miljøer; i ferskvand, i havet, i og på havis. De findes enten fritlevende som enkeltceller eller i kolonier, der i form kan være bånd-, zig-zag-formede eller stjerneformede. De hedder kiselalger, fordi cellen er omgivet af en todelt skal af kisel (SiO_2), der varierer i form og ornamentering fra art til art. De kaldes ofte havets juveler på grund af den lys-brydende effekt, som kiselshallen har.

Kiselalger er en af de store grupper af alger, og tæller flere end 200.000 arter (nulevende såvel som fossile – for eksempel består moleret på Mors primært af kiselalger). Langt de fleste kiselalger er fotosyntetiserende, og de udgør økologisk set en af de vigtigste grupper af fytoplankton. Specielt i kolde og tempererede egne bidrager kiselalger til en høj primærproduktion, og dermed er de et vigtigt led i fødekæderne. Kiselalger er anslået til at stå for 20-25 % af den globale primærproduktion.



Kiselshaller fra forskellige kiselalger Foto: Nina Lundholm

og andre dyr livet. I den mere kuriøse afdeling har en episode, hvor tusinder af "gale" – sandsynligvis domoinsyre-forgiftede – havfugle invaderede blandt andet Santa Cruz i Californien, efter sigende inspireret Alfred Hitchcock til sin berømte film *Fuglene* fra 1963.

Mens man efterhånden ved en hel del om de giftige algers effekt på økosystemerne i tempererede egne af verden, ved man meget lidt om, hvilken effekt de har i det arktiske økosystem. Ja, indtil for relativt nylig (2011) vidste man faktisk ikke med sikkerhed, om der overhovedet fandtes giftige kiselalger i Arktis. »Men det gør der, og de er vidt udbredte,« fortæller Nina Lundholm, som er lektor ved Statens Naturhistoriske Museum, Københavns Universitet. Hun har i mange år forsket i giftige alger og

har været med til at beskrive de første giftige kiselalger fra Arktis. I et projekt finansieret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers har hun sammen med ph.d.-studerende Sara Harðardóttir og kolleger fra DTU, Tyskland og Sverige nu nærmere undersøgt, hvordan giftige alger vekselvirker med vandløpper, som er det næste trin i fødekæden.

Når algen bliver giftig

Når alger er giftige, er det måske ikke bare en tilfældighed, men en egentlig forsvarsmekanisme – det er i hvert fald den antagelse, de fleste forskere går ud fra. Der er da også konkrete observationer, der støtter den antagelse. »Vi kan for eksempel se i laboratorieforsøg, at kiselalgerne mister deres giftighed over tid, når de er i fred for andre organismer, der æder dem,« fortæller Nina. Det tyder på,

at algerne ikke bruger energi på at producere giftstofferne, når der er fred og ingen fare. Den svenske forsker Erik Selander har endvidere for nylig fundet en mulig forklaring på, hvad visse alger mere specifikt reagerer på, nemlig særlige signalstoffer, som udskilles af vandløpper. Disse signalstoffer er blevet døbt copepodamider – da copepoder er fagudtrykket for vandløpper – og de har vist sig at kunne stimulere produktionen af giftstoffet saxitoxin hos en art af dinoflagellater (også kaldet furealger).

For at kaste mere lys over signaleringsmekanismerne eksperimenterede Sara og Nina samt deres kolleger med giftige kiselalger og vandløpper.

»Eksperimenterne blev foretaget i to beholdere med havvand adskilt

Planktonforsøgene

Forskernes forsøg omtalt i artiklen foregik på Arktisk station i Qeqertarsuaq, Grønland. I forsøgenes modelsystem indgik arter af diatomeslægten *Pseudo-nitzschia* og vandloppen *Calanus*. Algerne blev indsamlet året inden forsøgene, etableret i rene kulturer og taget med tilbage til Grønland. Vandlopperne blev indsamlet samme år som forsøget, og individer blev indsamlet enkeltvis.

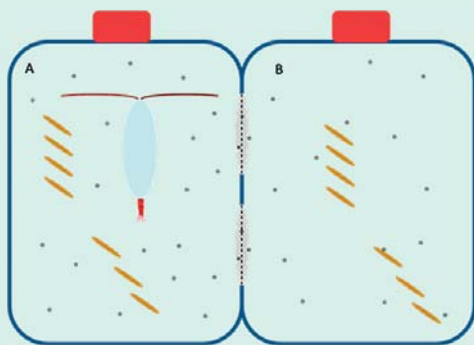
Planteædende vandlopper udskiller til stadighed små mængder af signalstoffer kaldet copepodamider (polære lipider). Kiselalgerne registrerer tilstedeværelsen af vandlopper ved at detektere forekomsten af copepodamider. Algerne reagerer på dette ved at producere giftstoffet do-



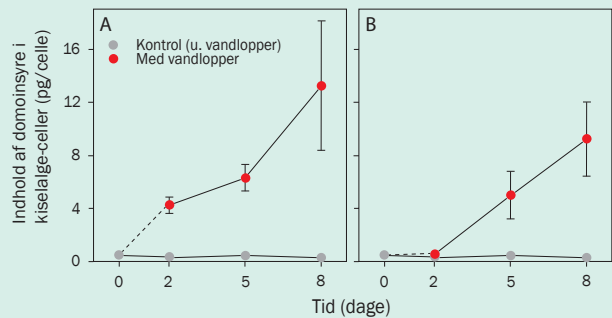
Planktonforsøg i feltlaboratoriet. Foto: Nina Lundholm

moinsyre, der virker som et kemisk forsvar, da det påvirker vandlopperne negativt. Ved at have et model-

system kunne forskerne registrere den rent kemiske interaktion mellem alger og vandlopper.

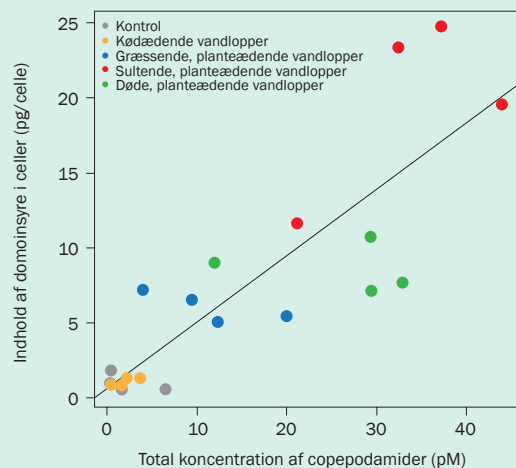


Figuren viser en principskitse af forsøget, som består af to beholdere med havvand adskilt af en membran med en porrestørrelse på 5µm. I den ene beholder er der kun kiselalger, i den anden både kiselalger (føde for vandloppen) og vandlopper. Graferne viser, hvordan indholdet af domoinsyre i kiselalge-cellerne ændres over tid, svarende til situationen i de to beholdere. Til venstre (A) ses ændringer i toxinindholdet, når vandlop-



per græsser direkte på kiselalgerne, mens grafen til højre (B) viser alger, der kun er udsat for vandlopperne kemiske signalstoffer (copepodamider). I kontrolerne, hvor algerne ikke udsættes for vandlopper, er toxinindholdet uændret. Det ses også, at toxinindholdet stiger hurtigere i den container, hvor vandlopperne græsser direkte på algerne, da der er en vis forsinkelse på transporten af signalstoffer over membranen.

Figuren viser, hvordan niveauet af domoinsyre i alge-cellerne har en lineær sammenhæng med niveauet af copepodamider. Desuden viser grafen, at kødædende vandlopper ikke udskiller copepodamider (det svarer til niveauet for kontrol) og derfor ikke inducerer et øget toxinindhold i algerne, hvorimod både aktivt græssende, sultende og døde vandlopper udskiller copepodamider (det afhænger altså ikke af, hvorvidt de græsser eller ej) og derfor inducerer øget toxinindhold i algerne.



af en membran, hvor kun opløste stoffer kan passere. I den ene beholder var der både kiselalger og vandlopper, mens der i den anden kun var kiselalger. På den måde kunne vi undersøge effekten af vandlopper på kiselalgerne, både når de blev græsset direkte, og når de kun blev udsat for stoffer, der lækkes fra vandlopperne», forklarer Sara Harðardóttir.

Langvarig effekt på økosystemet

Forsøgene bekræftede, at nogle arter af kiselalgen *Pseudo-nitzschia* reagerer på signalstofferne fra vandlopper ved enten at begynde at producere domoinsyre eller øge produktionen af det – helt op til 130 gange. Andre arter af kiselalger reagerede derimod ikke på signalstofferne ved at producere giftstof, sandsynligvis fordi de har andre forsvarsmekanismer. Nogle deler sig meget hurtigt og påvirkes derfor ikke meget af græsningen, mens andre, som kiselalgen *Skeletonema*, reagerer ved at forkorte længden af de kæder, som celler af kiselalger ofte danner. Når kiselalgerne er i kæder, er de lettere at spise for vandlopper, da de enkelte celler er meget små. Ved at forkorte kæderne mindskes risikoen for at blive spist af vandlopper.

»Vores forsøg viser tydelige tegn på, at produktionen af gift er en forsvarsmekanisme hos algerne. Algerne reagerede nemlig på alle arter af plankton-spisende vandlopper ved at producere gift, mens kødædende vandlopper derimod ikke fremkaldte nogen giftproduktion hos algerne. Algerne reagerer således kun på organismer, der udgør en reel fare for dem,« fortæller Sara. »Grunden til, at algerne ikke producerer domoinsyre hele tiden, er muligvis, at giftproduktionen kræver energi og derved er kostbar at sætte i gang.«

Forskergruppen fandt også, at når algerne øger produktionen af domoinsyre som respons på signalstoffer fra vandlopper, tager det 20-50 dage, før niveauet af domoinsyre i algerne falder tilbage til



Vandlopper er små krebsdyr, der findes både i havet og i ferskvand. De udgør ofte størstedelen af dyreplankton i havet og er derfor vigtige økologisk set. De lever af at spise fytoplankton som kiselalger og er derfor et essentielt led i fødekæden, der transporterer energien fra algerne videre til fisk, fugle og pattedyr. Her ses nyindsamlede vandlopper i en spand. Foto: Claudia Bruhn

Om forskerne



Sara Harðardóttir er ingeniør fra DTU Aqua. Hun færdiggjorde sin ph.d.: *Marine Battlefields: Toxic Diatoms and Their Copepod Grazers*, hos Nina Lundholm ved Statens Naturhistoriske Museum i 2017. Hendes forskning fokuserer på fytoplankton i Arktis, specielt den giftige *Pseudo-nitzschia* og de alger, der findes i hav-is. For nuværende er Sara ansat GEUS, hvor hun arbejder videre med havis-alger i sedimenter.



Nina Lundholm er lektor på Sektion for Evolutionary Genomics ved Statens Naturhistoriske Museum. Hun arbejder med økologi samt molekylær og morfologisk evolution og diversitet af fytoplankton. Hun er specielt fokuseret på toksiske alger og deres toksinproduktion. nlundholm@snm.ku.dk Foto: Claudia Bruhn

udgangsniveauet. På den måde kan de "skræmte" alger have en langvarig økologisk effekt på miljøet. Et godt spørgsmål er derfor, hvor ofte algerne bliver bragt i denne alarmtilstand. At dømme ud fra målinger af koncentrationen af copepodamider i miljøet, kan det være ofte.

»Målinger direkte i havet i tempererede egne viser, at koncentrationen af copepodamider i vandet i flere måneder om året er høj nok til, at det kan inducere en 100 % forøgelse af koncentrationen af domoinsyre. Men hvor ofte, det sker i Arktis, ved vi endnu ikke,« siger Sara.

Sundhedsteknikere fra Vandenberg Air Force Base i Californien, USA, indsamler muslinger på Minuteman Beach som en del af den løbende kontrol af, om muslinger indeholder giftstoffer som domoisyre. Foto: U.S. Air Force photo/Staff Sgt. Andrew Satran.



Kiselalger og skaldyrsforgiftning

Når mennesker bliver syge af at spise skaldyr, skyldes det oftest, at de har akkumuleret giftstoffer fra alger (forurening med bakterier eller vira kan dog også være årsagen). I de fleste tilfælde er det giftige arter af den gruppe af alger, der kaldes dinoflagellater, der er årsagen. Men en særlige form for skaldyrsforgiftning, der kaldes "hukommelsestabsfremkaldende skaldyrsforgiftning" (på engelsk *Amnesic Shellfish Poisoning*, ASP), skyldes giftige arter af kiselalger tilhørende slægten *Pseudo-nitzschia*. Som navnet antyder, er et karakteristisk symptom på sygdommen hukommelsestab. Det skyldes, at domoisyre binder sig til nerveceller (neuroner) i hjernen og forstyrrer deres calcium-balance, således at neuronerne svulmer op og dør. Forud for hukommelsestab vil forgiftede personer normalt opleve andre symptomer som diarré, hovedpine, åndenød, lammelser og svimmelhed. I alvorlige tilfælde kan pa-

tienten gå i koma indenfor 48 timer efter indtagelse af giften og i værste fald dø.

Udover mennesker kan pattedyr og fugle blive forgiftet af domoisyre, og ved længere tids indtagelse af lave doser af domoisyre kan pattedyr få en kronisk forgiftning, der blandt andet kan påvirke deres reproduktion.

I langt det meste af verden monitoreres forekomsten af giftige alger og deres giftstoffer, så mennesker ikke bliver syge. I Danmark oplever vi ind imellem, at blåmuslinger indeholder så høje koncentrationer af domoisyre, at Fødevarestyrelsen advarer folk mod at indsamle og spise dem – det skete for eksempel i marts 2016.

Der findes endnu ingen modgift mod domoisyre. Og giften uskadeliggøres heller ikke ved opvarmning.

Forgiftede vandlopper

Hvis algernes produktion af gift er en forsvarsmekanisme, vil man forvente, at en giftig alge virker afskrækkende på en sulten vandloppe. Men umiddelbart lader vandlopperne sig ikke mærke af, at algerne er nok så giftige. »Vi kunne i hvert fald ikke i vores forsøg observere nogen forskel på, hvor mange alger vandlopperne spiste, hvad enten algerne var giftige eller ej. Og der var heller ikke forskel på, hvor

mange æg vandlopperne producerede, eller hvor stor en andel af æggene, der klækkede,« fortæller Nina Lundholm.

Målt på disse parametre kan det således synes forgæves for algerne at forsvare sig med giftstoffer. Men der er alligevel noget, der tyder på, at algernes giftstof har en effekt på vandlopperne.

»I forsøg lavet over længere tid så

vi, at giften faktisk kan slå vandlopperne ihjel,« siger Nina. »Og forsøgene viste også, at forgiftede vandlopper på nogle punkter opførte sig anderledes end deres giftfrie artsfæller. De var mindre tilbøjelige til at lave karakteristiske hop, som vandlopper benytter sig af, når de forsøger at flygte fra fjender. For en vandloppe kan konsekvensen af at spise giftige alger derfor være en øget risiko for selv at blive ædt. Derved opnår algerne samlet set,

at de selv har mindre risiko for at blive spist, altså at deres forsvar virker.«

Når forskerne ikke har kunnet observere andre tydelige effekter på vandlopperne på kort sigt, behøver det dog ikke betyde, at der ikke er sådanne effekter: »Det kan være, at vi bare ikke har kigget på de rigtige fysiologiske karakterer,« siger Nina. »Men det er også en mulighed, at vandlopperne har tilpasset sig giftstoffet. De vandlopper og alger, vi arbejdede med i forsøgene, kom fra den samme lokalitet, og vandlopperne kan derfor have en lang historie, hvor de har været udsat for domoinsyre, og ligesom bakterier bliver resistente overfor antibiotika, er vandlopperne blevet modstandsdygtige overfor giftstoffet.«

Et kig ind i genomet

En anden måde at undersøge, om domoinsyre påvirker vandlopperne, er ved at se på, om der er forskel på, i hvilken grad forskellige gener bliver udtrykt i henholdsvis forgiftede og ikke-forgiftede vandlopper. I projektet har forskergruppen udført sådanne funktionelle genomstudier, og de viste tydeligt, at vandlopperne er påvirkede af giftstoffet. »Der bliver populært sagt skruet ned for en række gener, som regulerer forskellige processer relateret til stofskiftet og andre processer i cellerne, når vandlopperne udsættes for domoinsyre. Og det antyder, at både vandlopperne aktivitet og vækst er påvirket af giften,« fortæller Nina. »Men vi kan dog ikke mere præcist sige, hvilken fysiologisk betydning, det har, da man endnu ikke kender den specifikke funktion af de fleste gener hos vandlopper.«

Hos kiselalgerne er der også en række gener, der bliver påvirket, når de bliver udsat for vandlopper. Ikke overraskende viser det sig her, at hovedparten af de gener, der ændrer udtryk, bliver mere aktive – formodentlig fordi de på forskellig vis har en regulerende funktion i produktionen af

domoinsyre. »Vi kunne til sammenligning se, at en anden ikke-giftig art af kiselalge overhovedet ikke ændrede udtryk af sine gener, når den blev udsat for vandlopper,« siger Nina.

Konsekvenser af mere gift i Arktis

Som nævnt er et væsentligt perspektiv i at forstå denne vekselvirkning mellem kiselalger og vandlopper, at den er udgangspunktet for, at domoinsyre sendes opad i fødekæden.

»Vi kan se, at domoinsyre akkumuleres i vævet på vandlopper, der er på en diæt af giftige kiselalger,« siger Nina. »Og giften forbliver i vandlopperne i op til seks dage, efter de har spist de alger, så der er altså et relativt langt tidsrum, hvor giften kan nå videre til næste led i fødekæden og akkumuleres der.«

Nina og Sara fortæller også, at de mængder domoinsyre, de og forskerkollegerne har målt i vandlopperne i deres forsøg, er 100 gange højere end grænseværdierne fastsat af EU for, hvad mennesker må indtage. Det sætter en tyk streg under den potentielle risiko, som forgiftede vandlopper udgør, når de spises af dyr højere oppe i fødekæden. Man ved for eksempel, at planktonædende hvaler kan indeholde mængder af domoinsyre, som kan gøre dem syge, og som nævnt er der flere steder i verden fundet pattedyr og fugle, der er døde på grund af domoinsyre.

Samspillet mellem giftige kiselalger og vandlopperne er et eksempel på, hvor kompliceret samspillet mellem planteplankton og dyreplankton kan være, hvor organismene påvirker hinanden ved hjælp af kemiske stoffer som copepodamider og domoinsyre. At forstå de grundlæggende vekselvirkninger mellem organismene nederst i fødekæden, det vil sige mellem plante- og dyreplankton, er også vigtigt for at undersøge og forstå effekten af andre faktorer som klimaforandringer, da algerne

udgør basis af fødekæderne i havet.

»Man kan forestille sig, at afsmeltning af is i Arktis kan give anledning til en ændret sammensætning af planteplankton. Man kan også forestille sig flere og større opblomstringer af giftige alger. Forårsopblomstringen står for langt den største del af den marine primærproduktion, og den vil kun blive større i et varmere klima,« siger Nina.

For menneskene i Arktis vil opblomstringer af giftige alger kunne få store konsekvenser – både på grund af den lokale fare for at blive forgiftet, og fordi det kan ramme økonomien hårdt. Således udgøres 80-90% af Grønlands eksport af marine produkter.

På jagt efter mere viden

Nina Lundholm og hendes kolleger planlægger nu at udnytte den viden, de har opnået i projektet, i fremtidige studier.

»Vi vil for eksempel undersøge kombinerede effekter af faktorer, der påvirker algerne vækst og giftproduktion. Og vi vil se mere på omkostningerne for algerne af at benytte sig af en sådan induceret forsvarsmekanisme,« siger Nina. »Vi vil også nærmere undersøge, hvordan domoinsyre transporteres videre i fødekæden, og hvordan det spredes i det arktiske miljø.«

Nina fortæller, at der også er andre små organismer som ciliater og dinoflagellater, der er vigtige græssere i Arktis, og hun vil gerne undersøge, hvilke effekter disse har på de giftige kiselalger.

»Nu har vi fokuseret på, at kiselalgerne kan være giftige, men vi skal ikke glemme, at de er helt centrale spillere i både marine og ferske fødekæder. Og så tæller det også til deres fordel, at de er smukke på grund af deres fantastiske kiselalger, der varierer fra art til art. Det gør dem bare endnu mere værd at interessere sig for,« slutter Nina. ■

Videre læsning

Artiklen bygger på projektet: *Grazer-Phytoplankton Interactions in a Co-evolutionary Context in the Arctic Ecosystem*, som var et såkaldt Forskningsprojekt 1, finansieret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.



DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK